

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Навчально-науковий інститут Природокористування  
Кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

студента Голуба Михайла Юрійовича  
(ПІБ)

академічної групи 183 – 20 –1  
(шифр)

спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою – «Технології захисту навколишнього середовища»

на тему: «Удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів» (назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
кваліфікаційної роботи	Борисовська О.О.		
<b>розділів:</b>			
Теоретичного	Борисовська О.О.		
Технологічного	Борисовська О.О.		
Охорона праці	Столбченко О.В.		
<b>Рецензент</b>			
<b>Нормоконтролер</b>	Грунтова В.Ю.		

Дніпро

2024

**Міністерство Міністерство освіти і науки України**  
**Національний технічний університет**  
**« Дніпровська політехніка»**

ЗАТВЕРДЖЕНО:  
завідувач кафедри ЕТЗНС  
Борисовська О.О.  
« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня бакалавра**

студенту Голубу Михайлові Юрійовичу  
(прізвище та ініціали )

академічної групи 183 – 20 – 1  
(шифр)

спеціальності – 183 «Технології захисту навколишнього середовища»  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою – «Технології захисту навколишнього середовища»

на тему «Удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 21.05.24 р. № 453-с

	Розділ	Зміст	Термін виконання
1	Теоретичний	Виконати аналіз процесу виробництва літій-іонних акумуляторів для електромобілів з позицій екологічної безпеки. Проаналізувати процес використання літій-іонних акумуляторів з міркувань безпеки для людини та довкілля. Оцінити прогнозовану кількість відпрацьованих літій-іонних батарей в світі та в Україні	17.01.24- 01.04.24
2	Технологічний	Проаналізувати досвід інших країн щодо організації збору та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів. Виконати порівняльний аналіз існуючих технологій переробки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів. Розробити рекомендації щодо удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів	02.04.24- 01.05.24
3	Охорона праці	Розробити заходи з охорони праці при реалізації запропонованих рішень	02.05.24- 01.06.24

Завдання видано

Борисовська О.О.  
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі 10.10.2023

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання

Голуб М.Ю.  
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 79 сторінок тексту, 22 рисунки, 4 таблиці, 53 літературних джерела, 5 додатків.

Мета роботи полягає у аналізі екологічної небезпеки процесу виробництва, використання та переробки літій-іонних акумуляторів для електромобілів та у розробці шляхів удосконалення системи поводження з цими відходами.

У вступі викладено актуальність роботи та задачі, які були поставлені для розкриття теми.

У теоретичному розділі викладено історію розвитку електромобілів та їх конструкцію, процес виробництва та використання літій-іонних акумуляторів з позицій екологічної безпеки, а також прогнозовану кількість відпрацьованих літій-іонних батарей в світі та в Україні.

У технологічному розділі наведено характеристику відпрацьованих літій-іонних акумуляторів як джерела корисних компонентів, проаналізовано досвід інших країн щодо організації збору та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів. Виконаний порівняльний аналіз існуючих технологій переробки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів. Розроблені рекомендації щодо удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів.

У розділі «Охорона праці» обґрунтовано заходи щодо безпечного обслуговування обладнання та безпеки праці на виробництві.

У висновках наводяться результати виконання кваліфікаційної роботи.

ПЕРЕРОБКА, ЛІТІЙ-ІОННІ БАТАРЕЇ, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, АКУМУЛЯТОР, ЛІТІЙ, ГІДРОМЕТАЛУРГІЯ, КАТОД, АНОД, ВІДПРАЦЬОВАНІ ЛІВ, ЦІННІ МЕТАЛИ, ВІДНОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, РЕЦИКЛІНГ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	8
1.1 Основні етапи розвитку електромобілів.....	8
1.2 Конструкція будови електромобіля.....	11
1.3 Аналіз процесу виробництва літій-іонних акумуляторів з позицій екологічної безпеки.....	16
1.3.1 Сировинна база.....	16
1.3.2 Технологічний процес виробництва акумуляторів.....	18
1.3.3 Можливі екологічні ризики на кожному з етапів процесу виробництва.....	21
1.4 Аналіз процесу використання літій-іонних акумуляторів з міркувань безпеки для людини та довкілля.....	24
1.4.1 Літій-іонні батареї поряд з іншими видами акумуляторів.....	24
1.4.2 Переваги використання літій-іонних акумуляторів.....	26
1.4.3 Недоліки використання літій-іонних акумуляторів.....	27
1.4.4 Можливі ризики при експлуатації літій-іонних акумуляторів.....	28
1.5 Прогнозована кількість відпрацьованих літій-іонних батареї в світі та в Україні.....	29
2 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ЛІТІЙ-ІОННИМИ АКУМУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	33
2.1 Досвід інших країн щодо організації збору та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів.....	33
2.2 Порівняльний аналіз існуючих технологій переробки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів.....	37
2.3 Розробка рекомендацій щодо удосконалення системи поводження з	

	5
відпрацьованими літій-іонними акумуляторами.....	52
<b>3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..</b>	<b>58</b>
3.1 Проблеми безпеки літій-іонних батарей .....	58
3.2 Перезарядка .....	60
3.3 Температура .....	61
3.4 Літієві батареї та безпека на робочому місці .....	62
3.5 Отримання відповідних вогнегасників .....	64
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>65</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>67</b>
Додаток А.....	73
Додаток Б.....	76
Додаток В.....	77
Додаток Д.....	78
Додаток Е.....	82

## ВСТУП

Переробка відпрацьованих літій-іонних акумуляторів викликала великий інтерес в останні роки. Багато підприємців починають відмовлятися від випуску модельних рядів з двигунами внутрішнього згорання та переходять на альтернативі, більш екологічні моделі. Відповідно зростає попит на літій-іонні акумулятори, адже вони є елементом живлення таких авто.

Із ростом популярності у цій сфері, відбувається також попит на цінні метали, з яких складається сама батарея, однак їх видобуток є шкідливим для навколишнього середовища та людини. Отже, потрібно шукати альтернативі варіанти їх добутку.

Головною проблемою постає їх накопичення, адже просто захоронення їх на звалищах чи утилізація як побутове сміття не стане вирішенням проблеми, навпаки – створить нові. Відповідно, повинні створюватись нові напрямки переробки, які спрямовані саме на переробку літій-іонних акумуляторів.

Отже, метою кваліфікаційної роботи є аналіз екологічної небезпеки процесу виробництва, використання та переробки літій-іонних акумуляторів для електромобілів та розробка шляхів удосконалення системи поводження з цими відходами.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі задачі:

1. Виконати аналіз процесу виробництва літій-іонних акумуляторів для електромобілів з позицій екологічної безпеки. Проаналізувати процес використання літій-іонних акумуляторів з міркувань безпеки для людини та довкілля. Оцінити прогнозовану кількість відпрацьованих літій-іонних батарей в світі та в Україні

2. Проаналізувати досвід інших країн щодо організації збору та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів. Виконати порівняльний аналіз існуючих технологій переробки

відпрацьованих літій-іонних акумуляторів. Розробити рекомендації щодо удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів

3. Розробити заходи з охорони праці при реалізації запропонованих рішень.

*Апробація результатів кваліфікаційної роботи.*

Апробація роботи проводилась на студентській науково-технічній конференції «Тиждень студентської науки - 2024» (8 – 12 квітня 2024 р.). За результатами досліджень надруковано тези доповіді.

Удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів / Голуб М.Ю., Борисовська О.О. // Тези студентської науково-технічної конференції «Тиждень студентської науки - 2024» (8 – 12 квітня 2024 р). Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2024, С. 264-266.

# 1 ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

## 1.1 Основні етапи розвитку електромобіля

Історію електромобілів можна розділити на п'ять окремих періодів: перші піонери електричної мобільності (1830-1880), перехід до моторизованого транспорту (1880-1914), розквіт двигуна внутрішнього згоряння (1914-1970), повернення електромобілів (1970-2003), електрична революція (2003-2020) і переломний момент (2021 і далі).

На початку 1800-х років серія технологічних проривів в акумуляторах і двигунах привела до появи перших електромобілів піонерами інженерів і автомобілебудування по обидва боки Атлантики.

Ще в 1830-х роках винахідники в Угорщині, Нідерландах, Великій Британії та США зосереджували свої зусилля на об'єднанні цих технологічних досягнень для створення механічного автомобіля. Хоча це суперечлива тема, багато хто каже, що перші невеликі електромобілі були розроблені між 1828-1832 роками [1].

Проте всі вони були лише прототипами електрифікованих візків, які рухалися на максимальній швидкості 7 миль/год із громіздким керуванням і малим запасом ходу. Потім у 1860-х роках французький фізик на ім'я Гастон Плант винайшов першу перезаряджувану свинцево-кислотну батарею — величезний прорив у галузі електричної мобільності. Однак лише наприкінці 1880-х ці винаходи – батареї та електродвигуни – були об'єднані піонером електромобільності Вільямом Моррісоном, щоб створити перший «практичний» електромобіль [2,3].

Автомобіль Моррісона був традиційним кінним екіпажем графства Суррей, популярним в Америці 19 століття, який був переобладнаний для встановлення акумулятора. Електрична карета Моррісона могла перевозити



максимум 12 осіб і мала максимальну швидкість 20 миль на годину (рис. 1.1).



**Рисунок 1.1 – Перший електроавтомобіль Вільяма Моррісона**

На початку 20-го століття багато людей почали міняти своїх коней і вози на моторизовані транспортні засоби, що призвело до популяризації автомобіля. У той час на американських дорогах було приблизно 40% транспортних засобів, що приводилися в рух парою, 38 % були електричними і лише 22% – бензином [4].

Парові автомобілі досить швидко зникли, адже мали труднощі в запуску та потребували постійного наповнення водою, що показало їх непрактичність у автомобільній сфері.

Приблизно в той самий час, коли Вільям Моррісон працював над своєю каретою з електричним приводом, Готліб Даймлер і Карл Бенц одночасно розробили перші в світі автомобілі з двигуном внутрішнього згоряння в 1886 році в Німеччині [5]. Проте автомобілі з бензиновим двигуном вимагали від водія перемикаєти передачі та заводити автомобіль важкою рукояткою. Крім того, вони були набагато шумнішими за парові чи електричні і викидали шкідливі речовини зі своїх вихлопів.

У порівнянні з двома іншими типами транспортних засобів на ринку, електромобілі виявилися конкурентоспроможним варіантом. Вони не

виділяли жодних неприємних забруднювачів, не вимагали перемикання передач і не мали тривалого часу запуску. Це означало, що ними було легше керувати та вони були набагато тихішими.

У результаті електромобілі швидко стали популярними серед жителів міст, де електрика була доступною, і чим більше людей отримували доступ до електроенергії, тим популярнішими вони ставали.

Однак, із розвитком електродвигуна, цей імпульс повільно закінчився після відкриття нафти в Техасі бензин став дешевим і доступним для багатьох [6], тоді як електрика залишилася доступною лише в містах. Протягом наступних 30 років розвиток електромобілів був незначним, і до середини 1930-х років вони майже повністю зникли з ринку.

Після сімдесятих років, коли ціни на нафту та дефіцит палива досягли нового максимуму, зацікавленість у зниженні залежності суспільства від нафти зростає.

Протягом наступних 20 років автомобільні компанії модифікували популярні моделі для створення електричних варіацій, сподіваючись, що вони зможуть покращити батареї та досягти запасу ходу та швидкості, ближчої до автомобілів з бензиновими двигунами.

Однак у 2003 році настав справжній поворотний момент для акумуляторних електромобілів, коли два підприємці на ім'я Мартін Еберхард і Марк Тарпеннінг побачили можливість.

Побачивши зростання ємності літій-іонних акумуляторів у своєму попередньому підприємстві, Еберхард і Марк заснували Tesla Motors у 2003 році [7]. У 2006 році стартап із Кремнієвої долини оголосив, що розпочне виробництво розкішного електричного спортивного автомобіля, який зможе проїхати понад 200 миль на одному заряді (рис. 1.2). Подальший успіх Tesla спонукав багатьох великих автовиробників прискорити роботу над власними електромобілями.

У той же час на ринок вийшли нові технології акумуляторів, які допомогли збільшити запас ходу та скоротити витрати на акумулятори для електромобілів.



**Рисунок 1.2 - Перший автомобіль Tesla Roadster 2006**

Щоб продемонструвати це, незважаючи на невелике зростання вартості акумуляторів у 2022 році, ціна на літій-іонні акумулятори знизилася більш ніж на 97% з 1991 року [8,9], що допомогло знизити загальну вартість електромобілів, зробивши їх більш доступними для споживачів.

За минулі роки майже кожен виробник автомобілів для масового ринку перейшов на виробництво електричних авто і багато з них пообіцяли взагалі припинити виробництво автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння [1].

## **1.2 Конструкція будови електромобіля**

Коли мова йде про електромобілі, більшість людей уявляє для себе тільки один певний тип – автомобіль, що повністю залежить від електроенергії. Проте їх існує 4 типи:

- Електромобіль на акумуляторі (BEV);
- Гібридний електричний автомобіль (HEV);
- Гібридний електричний автомобіль (PHEV);
- Електромобіль на паливних елементах (FCEV).

Принципи роботи **BEV**. Потужність перетворюється від акумулятора постійного струму на змінний для електродвигуна. Педаль акселератора посилає сигнал до контролера, який регулює швидкість автомобіля, змінюючи частоту живлення змінного струму від інвертора до двигуна. Двигун з'єднує і повертає колеса через зубчастий механізм. Коли натискаються гальма або гальмується електромобіль, двигун перетворюється на генератор і виробляє енергію, яка повертається до акумулятора

**Принципи роботи NEV**. Цей тип гібридних автомобілів часто називають стандартним гібридом або паралельним гібридом. NEV має як двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), так і електродвигун. У цих типах електромобілів ДВЗ отримує енергію від палива (бензину та інших видів палива), а двигун отримує електроенергію від акумуляторів. Бензиновий двигун і електродвигун одночасно обертають трансмісію, яка приводить в рух колеса.

Різниця між NEV порівняно з BEV і PHEV полягає в тому, що батареї в NEV можуть заряджатися лише ДВЗ, рухом коліс або комбінацією обох. Немає зарядного порту, тому акумулятор не можна заряджати поза системою, наприклад, від електричної мережі.

**Принципи роботи PHEV**. PHEV зазвичай запускаються в повністю електричному режимі та працюють на електроенергії, доки не розрядиться акумулятор. Деякі моделі перемикаються на гібридний режим, коли досягають крейсерської швидкості по шосе, як правило, вище 60 або 70 миль на годину. Коли батарея розряджається, двигун бере на себе роботу, і автомобіль працює як звичайний гібрид без підключення до електромережі.

Крім підключення до зовнішнього джерела електроенергії, батареї PHEV можна заряджати від ДВЗ або рекуперативного гальмування. Під час гальмування електродвигун діє як генератор, використовуючи енергію для зарядки акумулятора. Електродвигун доповнює потужність двигуна; в результаті можна використовувати менші двигуни, підвищуючи паливну ефективність автомобіля без шкоди для продуктивності.

**Принципи роботи FCEV.** Принцип роботи електромобіля на паливних елементах відрізняється від принципу роботи електромобіля, що підключається до мережі. Цей тип електромобілів пов'язаний з тим, що FCEV генерує електроенергію, необхідну для роботи транспортного засобу [10].

Незважаючи на певні відмінності між цими типами, всі вони мають спільну конструкцію та практично ідентичні за наявністю основних елементів.

Оскільки контролер забезпечує електроживлення від тягової батареї, електричні тягові двигуни працюватимуть, повертаючи трансмісію та колеса. Деякі гібридні електромобілі використовують тип двигуна-генератора, який виконує функції руху та регенерації. Загалом використовується електродвигун BLDC (безщітковий двигун постійного струму) (рис. 1.3) [11].

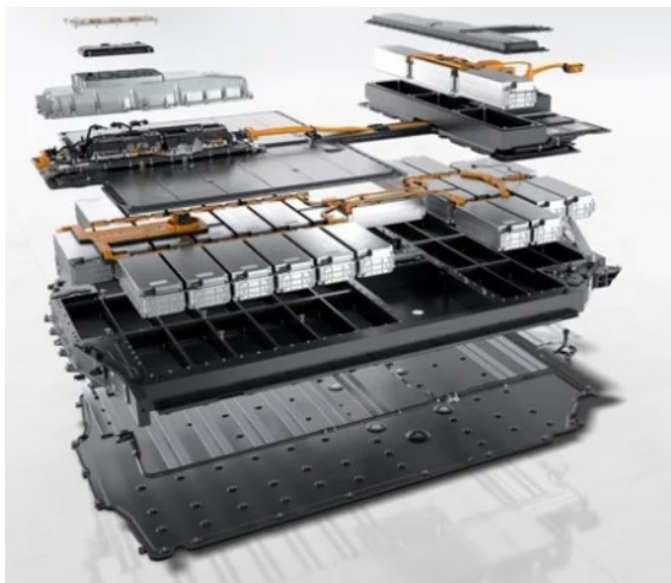


**Рисунок 1.3 - Безщітковий двигун постійного струму [11]**

**Коробка передач.** Тип двигунів, що встановлюються в електромобілях, можуть набрати високу швидкість майже зі старту і змінювати напрямки обертів, відповідно мають високий рівень крутного моменту. Через це подібним автомобілям не потрібні складні системи коробки передач та трансмісії, які мають автомобілі з ДЗВ. Достатньо планетарної коробки передач з понижувальним ефектом, яка приєднується до двигуна [12].

**Тягова батарея.** Функція батареї в електромобілі — це система накопичення електричної енергії у формі постійного струму. Якщо він

отримує сигнал від контролера, батарея подаватиме електричну енергію постійного струму до інвертора, щоб потім використовувати її для приводу двигуна. Використовується акумуляторна батарея, яка влаштована таким чином, щоб утворити так звану тягову акумуляторну батарею (рис. 1.4).



**Рисунок 1.4 – Тягова батарея**

Такі батареї мають напругу від 350 до 800 В, відрізняються ємністю, формою, які підлаштовують під конкретну модель авто та матеріалами, з яких виготовляють певні елементи для електромобіля.

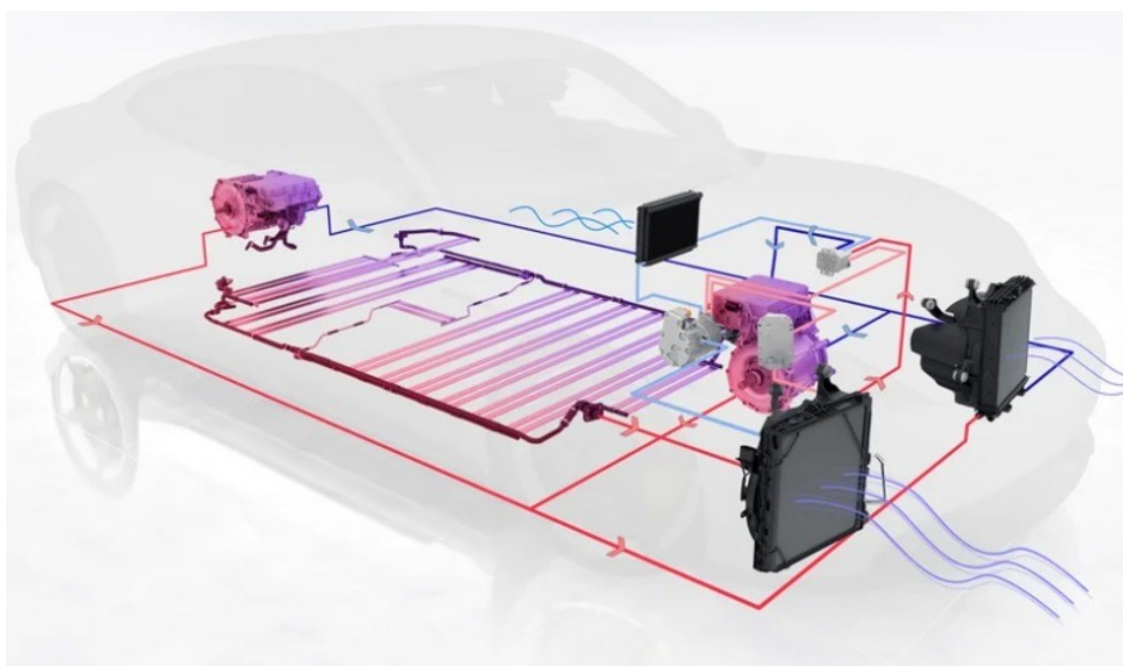
На сьогоднішній день найбільш популярними є літій-іонні батареї. Хоч вони значно дешевше ніж раніше, але все рівно є одним з найдорожчих компонентів авто.

Також на подібних авто є звичайна 12-вольтова батарея, яка служить системою живлення електроніки, освітлення та інших підсистем [11,12].

**Інвертор.** Функція інвертора – перетворювати постійний струм на акумуляторі на змінний, а потім цей змінний струм використовується електродвигуном. Крім того, інвертор на електромобілі також має функцію змінювати змінний струм при рекуперативному гальмуванні на постійний і потім використовувати для підзарядки акумулятора. Тип інвертора, який використовується в деяких моделях електромобілів, відноситься до категорії

двонаправлених інверторів.

**Система охолодження.** Електродвигуни не потребують потужної системи охолодження, однак вони встановлюються на кожному електрокарі, адже вона необхідна для тягової батареї. Через високе навантаження елементи авто схильні до сильного нагрівання, а так як тягова батарея найбільш ефективно працює лише в обмеженому температурному діапазоні, їй необхідна ця система. Для інвертора контроль температури не є важливим елементом, але також може знадобитися, адже він також пропускає дуже сильні струми (рис. 1.5).



**Рисунок 1.5 – Система охолодження**

**Зарядний пристрій.** Зарядка електромобіля – процес складний, через що в електромобілях є відповідний блок, який керує ним. Так як автомобіль заряджається від зовнішніх джерел, зарядні станції розробляються відповідно різних стандартів, але єдиного стандарту не існує. Відповідно від способу зарядки, змінюється час зарядки авто.

**Гальма.** BEV можуть обходитись лише силовим опором, який він створює в режимі генератора, однак всі електромобілі мають гальмівні системи. Але через те, що на електроавтомобілях значно менше навантаження,



ніж на звичайних авто, ці системи зношуються значно повільніше [12].

Електромобілі також мають функцію рекуперативного гальмування, яка збирає енергію, яка зазвичай втрачається під час гальмування, і використовує її для заряджання акумулятора. Коли водій натискає на гальма, електродвигун починає працювати заднім ходом, що сповільнює автомобіль і перетворює кінетичну енергію в електричну, яка повертається до акумулятора.

### **1.3 Аналіз процесу виробництва літій-іонних акумуляторів з позиції екологічної безпеки**

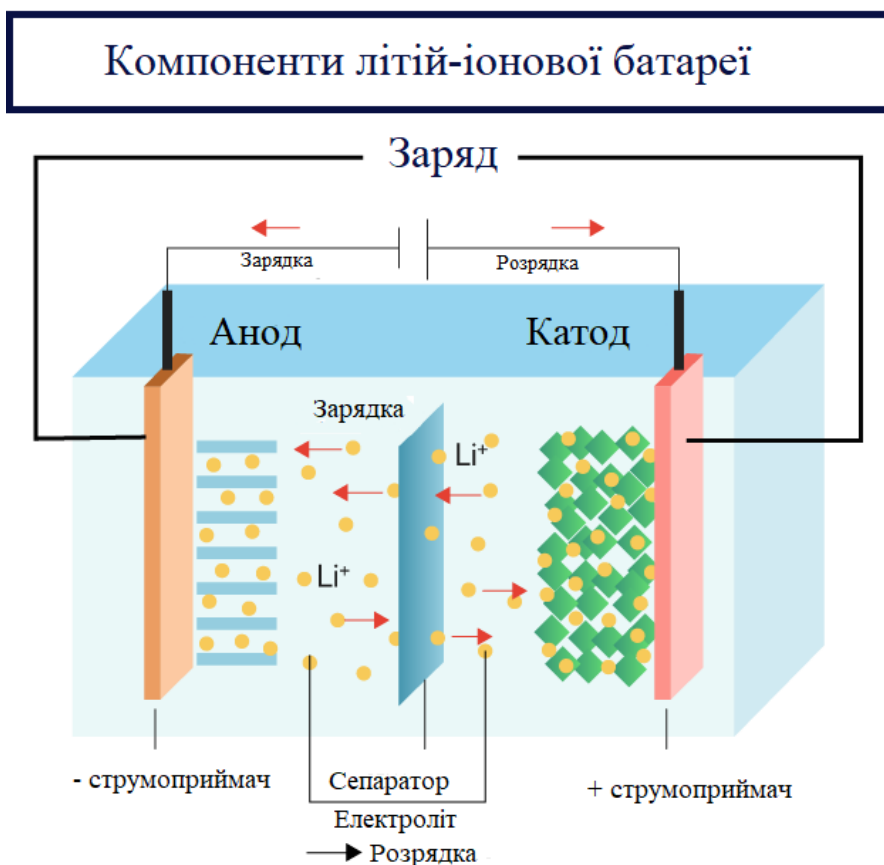
#### **1.3.1 Сировинна база**

Як зазначено вище, літій-іонні акумулятори є однією з найбільш популярних батарей для електромобілів. Їх виробництво є досить складним і потребує високих показників якості на кожних етапах виробництва, починаючи з сировини і закінчуючи кінцевим результатом, який повинен повністю відповідати вимогам споживача та ринку.

Літієва батарея складається, зокрема, з металевого літієвого анода та сірчаного катода [14]. Незважаючи на різницю в хімічному складі акумулятора, усі літій-іонні акумулятори використовують літій (Li) для транспортування іонів під час заряджання та розряджання акумулятора (рис. 1.6). Металевий літій є високоактивним і легкозаймистим за стандартних умов, тому його видобувають і використовують для виробництва акумуляторів у вигляді карбонату літію або гідроксиду літію.

Окрім літію, батареї також потребують анодних і катодних матеріалів, струмоприймачів і упаковки. Найпоширенішим матеріалом анода є графіт. У літій-іонних батареях використовуються два типи графіту: природний лусковий графіт, перероблений у сфери, і синтетичний графіт, отриманий з нафтового коксу та смоляного пеку при дуже високих температурах.





**Рисунок 1.6 - Типовий склад літій-іонової батареї**

Катоди для елементів літій-іонної батареї включають складні оксиди і фосфати перехідних металів, зокрема кобальту (Co), нікелю (Ni), марганцю (Mn), алюмінію (Al) і заліза (Fe). Серед цих елементів Co є найдорожчим і найбільш рідкісним. Частка Co в різних композиціях катодів різна, більшість комерційних катодів містять принаймні 10% кобальту за вагою. Кобальт є побічним продуктом видобутку нікелю та міді, його виробництво залежить від попиту на ці промислові товари і він токсичний на матеріалах катоду, тому його можна замінити на марганець. Це значно дешевше, він має високі швидкісні можливості та тепловий поріг, але також має невелику циклічність. Ще одним металом є срібло, що дозволяє досягти вищої напруги акумулятора порівняно з кадмієм [15,16].

Простір між катодом і анодом заповнений електролітом, тобто речовиною, яка дозволяє іонам літію, які несуть заряд батареї, вільно проходити від катода до анода. Електроліти літійових акумуляторів – це

полімерні, рідкі або твердо-тільні електроліти. Якщо електроліт рідкий, то між двома електродами використовується пінний сепаратор, щоб уникнути короткого замикання.

Електроліти та сепаратори необхідні, особливо коли йдеться про термін служби батареї. В електролітах найбільш підходящим матеріалом є той, що витримує високі температури та напругу. Крім того, у нього має бути довга полиця, щоб іони рухалися вільно. Найчастіше використовуються тверді та полімерні електроліти. Коли йдеться мова про сепаратори в літій-іонній батареї, ми маємо увазі матеріал, який запобігає змішуванню двох електродів один з одним. В іншому випадку, якщо вони об'єднуються, станеться коротке замикання, і акумулятор, ймовірно, перестане працювати [14].

### **1.3.2 Технологічний процес виробництва акумуляторів**

Як зазначалось раніше, виробництво літій-іонних – це складний та багатоступінчастий процес. В залежності від типу акумулятора, буде залежати і процес виробництва, однак основні процеси є спільними.

**Добуток та підготовка карбону літію, шляхом його очищення.** Рафінування та очищення карбонату літію передбачає впровадження різних технологій для забезпечення видалення домішок і виробництва високоякісного карбонату літію. Цей етап є вирішальним у процесі виробництва літійових батарей, оскільки впливає на загальну якість, вартість, ефективність і відповідність виробничим нормам.

Після цього відбувається **виготовлення електродів**. Аби запобігти забрудненню між різними матеріалами, створені окремі лінії підготовки катодних матеріалів, виробництва анодних матеріалів та виробництва сепараторів.

Процес виробництва аноду починається з відбору високоякісного графітового порошку, який потім змішується із зв'язуючими речовинами та

розчинниками для утворення суспензії. Потім цю суспензію наносять на підкладку з мідної фольги за допомогою технології, що називається ракелем або покриттям з рулону на рулон. Після нанесення покриття воно проходить процеси сушіння та каландрування для забезпечення однорідності та покращення адгезії.

Процес виробництва катода полягає у підготовці активного матеріалу, який змішується з провідними добавками, такими як сажа або графіт, щоб посилити перенесення електронів всередині катода. Після поєднання активного матеріалу та провідних добавок вони наносяться на струмоприймач, зазвичай виготовлений з алюмінієвої фольги та проходить процес сушіння.

Виробництво сепараторів є критичним етапом у виробництві літій-іонних акумуляторів, оскільки воно включає виготовлення тонкого та пористого матеріалу, який діє як фізичний бар'єр між анодом і катодом, дозволяючи селективному руху іонів літію, запобігаючи коротким замиканням. і підвищення безпеки батареї.

Процес починається з вибору відповідної сировини, такої як поліетилен або поліпропілен, які зазвичай використовуються через їхню високу температуру плавлення та хімічну стабільність. Потім ці матеріали розплавляються та екструдуються у форму плівки за допомогою спеціального обладнання.

Далі сепаратор покривається керамічним шаром для подальшого покращення його термічної стабільності та запобігання внутрішнім коротким замиканням, спричиненим контактом із металевими частинками електродів.

**Підготовка та покриття електродів.** Цей етап охоплює різні ключові моменти, такі як змішування активних матеріалів, приготування суспензії та технології покриття, процеси сушіння та каландрування, а також заходи контролю якості.

- Цей крок забезпечує рівномірний розподіл активних матеріалів, таких як оксид літію і кобальту для катода та графіт або кремній для анода, по всій батареї. Досягнення рівномірного розподілу має важливе значення для

оптимальної продуктивності та ефективності акумулятора.

- Приготування суспензії передбачає створення суміші активних матеріалів, зв'язуючих речовин, розчинників і добавок для утворення однорідної пастоподібної речовини, відомої як суспензія. Потім вона наноситься на підкладки струмоприймача за допомогою різних методів нанесення покриття, таких як ракельне покриття або методи екструзії щільною матрицею. Ці процеси дозволяють контролювати товщину осаження, одночасно забезпечуючи рівномірний розподіл на великих площах поверхні. Після нанесення випаровування розчинника має відбуватися ефективно, не викликаючи тріщини або дефектів у структурі електродної плівки. Контрольовані умови сушіння за допомогою печей або безперервних систем «рулон-на-рулон» забезпечують поступове видалення розчинників, зберігаючи структурну цілісність.

- Після висихання електроди піддаються каландруванню, яке передбачає їх стиснення під високим тиском для покращення їхніх механічних властивостей. Цей крок допомагає збільшити щільність і товщину електрода, а також покращити його електропровідність. Цей процес також допомагає усунути залишки розчинників, які могли не повністю випаруватися під час сушіння. Тиск, що застосовується під час каландрування, забезпечує хороший контакт між активними матеріалами та струмознімачами, оптимізуючи передачу електронів у системі батареї.

**Складання та формування клітини.** Під час конвеєрного процесу для літєвих батарей різні компоненти ретельно інтегруються, щоб створити функціональний елемент. Лінія збирання клітин розроблена для оптимізації виробничого процесу та забезпечення узгодженості кінцевого продукту. Зазвичай він складається з кількох станцій, де послідовно виконуються різні завдання:

- Укладання та намотування електродів – процес оптимізації продуктивності та ефективності літєвих батарей;
- Розміщення сепаратора – розміщення матеріалу між позитивним і

негативним електродами для забезпечення ефективного транспортування іонів під час роботи акумулятора;

- Введення електроліту – введення провідного розчину, який забезпечує транспортування іонів всередині акумулятора для ефективної роботи;

- Герметизація та інкапсуляція – забезпечує захист і цілісність компонентів батареї;

- Формаційний цикл – забезпечує оптимальну продуктивність і ємність, піддаючи елементи серії циклів заряджання та розряджання, перш ніж вони будуть готові до використання.

Завершальним етапом є **тестування та збірка батареї**. На цьому етапі батарея проходить серію тестів такі як: тест на вимірювання напруги, який показує важливу інформацію про стан заряду та працездатність елемента батареї; тест внутрішнього опору акумулятора, після якого можна оцінити, наскільки ефективно може передаватися енергія в елементах батареї; тестування життєвого циклу, щоб визначити, скільки циклів заряду-розряду може витримати літєва батарея, перш ніж її ємність значно знизиться; тести на безпеку, щоб переконатися, що елементи батареї не становлять ризику перегріву або займання [17].

### **1.3.3 Можливі екологічні ризики на кожному з етапів процесу виробництва**

Одна з основних причин того, що літєві та літій-іонні батареї вважаються шкідливими, полягає в тому, що видобуток літію дуже шкодить навколишньому середовищу.

Видобуток літію передбачає розчищенню землі, щоб звільнити місце для цих операцій. Рослинність і дерева повинні бути знищені, а ґрунт і земля видалені – те, що неминуче призводить до знищення природних середовищ існування та втрати екосистем і біорізноманіття (рис. 1.7 та 1.8).

На навколишнє середовище впливає не лише розчищення землі, щоб звільнити місце для заводів з видобутку літію, сам процес видобутку також завдає шкоди. Особливо там, де використовуються соляні розсоли.



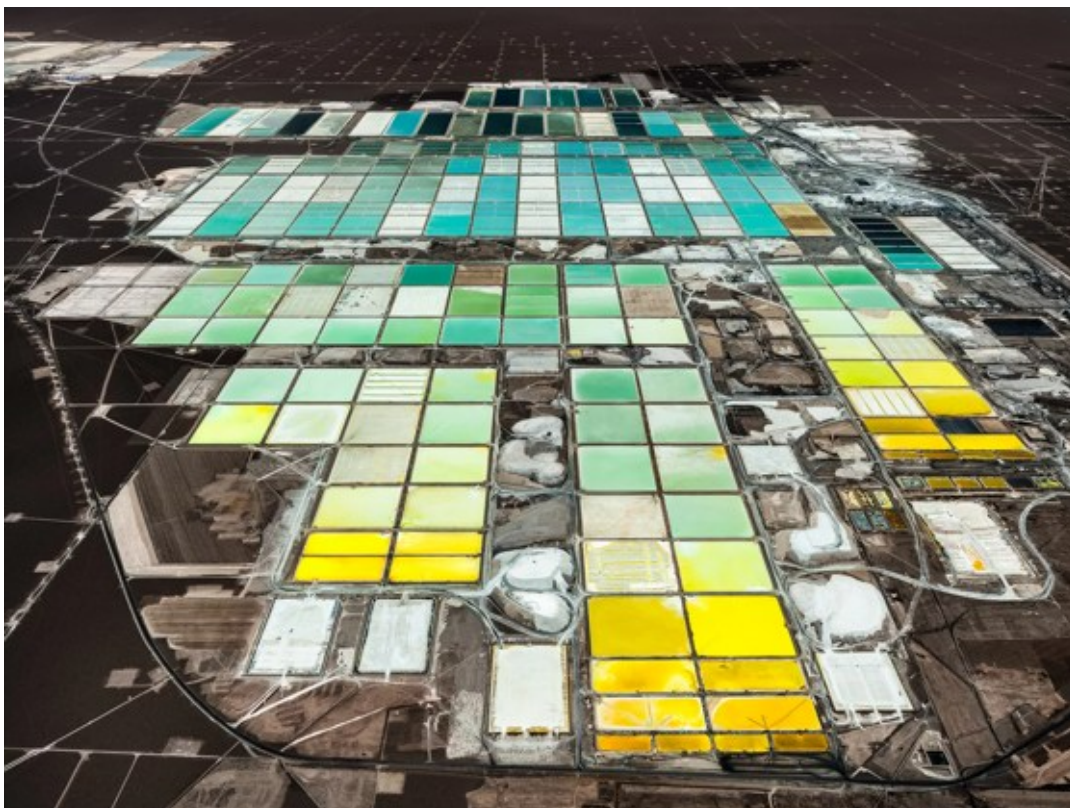
**Рисунок 1.7– Видобуток літію**



**Рисунок 1.8 – Розчищення землі для видобутку літію**



Однією з найбільших екологічних проблем, коли мова заходить про метод видобутку літію з розсолу, є величезна кількість води. Використання ставків-випарників для виділення літію вимагає величезної кількості води (рис. 1.9). Фактично, щоб виробити лише одну тону літію, потрібно майже мільйон літрів води [18,19].



**Рисунок 1.9 - Видобуток літію з розсолу**

Вода надходить з підземних джерел, що призводить до виснаження рівня ґрунтових вод у прилеглих районах і розширення пустельних земель, які є негостинними та непридатними для землеробства.

Іншим потенційним джерелом шкоди навколишньому середовищу, коли справа стосується видобутку літію, є ризик витоку токсичних хімікатів. Шкідливі хімічні речовини, що містяться в басейнах випаровування на заводах для видобутку розсолу, можуть потрапити в місцеві джерела води.

Шкідливі хімічні речовини включають соляну кислоту, яку спеціально додають під час процесу екстракції, а також інші відходи, які відфільтровують.

І ризик хімічного забруднення становлять не лише соляні розсоли.

Видобуток літію також вимагає використання хімікатів для видобутку літію.

Шкода навколишньому середовищу не починається і не закінчується видобутком літію. На жаль, у літієвих та літій-іонних батареях є кілька інших інгредієнтів, які також викликають занепокоєння. Наприклад, кобальт і нікель є двома компонентами, які завдають значних екологічних витрат.

Дослідження водойм, розташованих поблизу кобальтових шахт, виявили [20], що риба має високий рівень цього металу. Це забруднення руйнує екосистеми, і шкідливі мінерали можуть легко передаватися людям, коли вони їдять рибу або п'ють з тієї ж води. А оскільки кобальт вважається потенційним канцерогеном, він становить значну небезпеку для здоров'я людини.

Нікель — це метал, який широко використовується в різних промислових і споживчих товарах, а також є ключовим інгредієнтом літієвих батарей. Однак видобуток цього металу був пов'язаний з екологічними проблемами, такими як забруднення повітря та води, деградація ґрунту та знищення природних середовищ існування.

Нікелеві шахти знаходяться в основному в Австралії, Канаді, Індонезії та на Філіппінах, і залежно від країни положення та закони щодо процесу видобутку можуть відрізнятися.

Процес вилучення нікелю супроводжується високим ризиком, оскільки він вивільняє шлейфи діоксиду сірки та канцерогенного пилу (суміш нікелю, міді, кобальту та хрому). Таким чином, залежно від законів країни, працівники, місцеві громади та навколишнє середовище можуть бути під загрозою шкідливої практики видобутку нікелю [18].

## **1.4 Аналіз процесу використання літій-іонних акумуляторів з міркувань безпеки для людини та довкілля**

### **1.4.1 Літій-іонні батареї поряд з іншими видами акумуляторів**

Літій-іонна батарея не вимагає багато обслуговування, перевага, на яку



не може претендувати більшість інших хімікатів. Немає пам'яті, і для продовження терміну служби батареї не потрібно заплановане перемикання. Крім того, саморозряд є вдвічі меншим порівняно з нікель-кадмієвим, що робить літій-іонні добре підходящими для сучасних датчиків палива[21].

Хоча свинцево-кислотні батареї можуть бути дешевшими на момент покупки, вони зрештою мають меншу цінність у довгостроковій перспективі. Свинцево-кислотні батареї вмирають швидше, створюють більший ризик, викликають більше проблем і працюють менш ефективно, ніж їх літій-іонні аналоги.

Літій-іонні батареї мають вищу щільність енергії, ніж інші, тобто вони можуть заряджати та розряджати набагато більше енергії. Літій-іонні батареї вимагають менш частого заряджання, ніж свинцево-кислотні батареї, що призводить до меншої кількості незручних перерв під зарядку і заряджаються приблизно в чотири рази швидше, ніж, наприклад, свинцево-кислотні.

Літій-іонні батареї мають значно кращий термін служби, ніж свинцево-кислотні батареї, зазвичай вони працюють у 5-10 разів довше.

Як правило, вони дуже ефективні, з глибиною розряду до 80%, а свинцево-кислотні батареї мають неефективну глибину розряду, що дозволяє використовувати лише близько 50% енергії, зарядженої в батарею [22].

Незважаючи на загальні переваги, літій-іонні батареї мають свої недоліки. Вони крихкі і потребують схеми захисту для підтримки безпечної роботи. Вбудована в кожну упаковку схема захисту обмежує пікову напругу кожного елемента під час заряджання та запобігає надто низькому падінню напруги елемента під час розряду. Крім того, температура камери контролюється, щоб запобігти екстремальним температурам. Максимальний струм заряду та розряду на більшості упаковок обмежений між 1°C і 2°C. З дотриманням цих запобіжних заходів можливість утворення металевого літійового покриття через перезаряд практично виключається.

Літій-іонні батареї мають вищу щільність енергії, що означає, що вони, як правило, важать приблизно на 50% менше та менші за розміром, ніж

кисотно-свинцеві батареї. Легший і менший акумулятор забезпечує більшу гнучкість конструкції та зменшує навантаження.

Підтримання стану свинцево-кислотних акумуляторів може бути трудомістким, в той час як літій-іонні батареї не мають особливих вимог до обслуговування.

Гази, які утворюються в результаті перезарядки свинцево-кислотної батареї, можуть стати вибухонебезпечними. Літій-іонні батареї можуть відчувати перегрівання, що також може призвести до пожеж або іноді вибухів, але вони зазвичай постачаються зі складною системою керування батареями, яка запобігає цьому.

Літій-іонні батареї також містять менше токсичних хімікатів і металів і вважаються більш екологічними, ніж інші.

Вони досить герметичні і тому не протікають. Це означає, що при необхідності їх можна встановити вбік або догори дном. Однак свинцево-кислотні батареї можуть протікати, і їх потрібно належним чином вентилювати, щоб уникнути вибухів газу [22].

#### **1.4.2 Переваги використання літій-іонних акумуляторів**

Зберігання енергії в літій-іонних батареях пропонує низку переваг, які можуть допомогти нам досягти цілей сталого розвитку, враховуючи використання енергії: наприклад, це дозволяє нам зменшити нашу залежність від викопного палива на користь відновлюваних джерел енергії та літій-іонних батарей.

- **Відновлювані джерела енергії:** літій-іонні батареї можуть зберігати енергію відновлюваних джерел, таких як сонце, вітер, припливні течії, біопаливо та гідроенергія. Використання відновлюваної енергії означає, що ми отримуємо паливо для наших міст і будинків із джерел, які поповнюються природним шляхом і створюють менше викидів вуглецю, ніж викопне паливо.

- **Стійкість:** накопичена енергія, як і в акумуляторних системах, може бути корисною у випадку катастроф, які загрожують електропостачанню. Зберігання енергії в портативних контейнерах допомагає нам бути стійкими: здатними відновлюватися після нещасливих обставин, таких як стихійні лиха.
- **Довгий термін служби:** Літій-іонні акумулятори мають тривалий термін служби і можуть перезаряджатися тисячі разів. Хоча переробка літій-іонних батарей ще не оптимізована, тривале використання батарей і продуктів може призвести до зменшення споживання та електронного відходу.
- **Розумніше використання енергії:** ми можемо використовувати пристрої, що живляться від літій-іонних акумуляторів, щоб контролювати та керувати нашим використанням енергії та ефективністю [22].

### 1.4.3 Недоліки використання літій-іонних акумуляторів

Однак разом із цими перевагами є низка недоліків у всьому ланцюжку постачання батареї.

**Інтенсивний видобуток:** для видобутку корисних копалин для акумуляторів зазвичай потрібні два типи видобутку – відкритий видобуток і розсол. Ці процеси видобутку можуть спричинити ерозію та забруднення.

- **Розробка корисних копалин відкритим способом:** щоб звільнити місце для відкритого кар'єру, необхідно прибрати рослинність. Потім викопується глибока яма. Разом ці фактори створюють умови для ерозії. Видобуток корисних копалин може створити токсичні ґрунти та пил із високими концентраціями важких металів. Цей пил стає забруднювачем, що підвищує ризик захворювання людей і тварин.
- **Видобуток розсолу:** видобуток розсолу відводить воду з природних підземних запасів питної води. Ця вода виснажується з екосистеми швидше, ніж вона може бути замінена через кругообіг води. Видобуток розсолу також потребує токсичних хімікатів для обробки літію. Викид цих

хімікатів шкодить якості повітря, ґрунту та води.

- **Електронні відходи:** коли літій-іонні батареї утилізуються, вони стають електронними відходами, також відомими як електронні відходи. Організація Об'єднаних Націй оголосила електронні відходи однією з найактуальніших проблем для навколишнього середовища та здоров'я людини. Багато електронних відходів не утилізуються належним чином; Замість професійного демонтажу пристрої потрапляють у промислове сміття чи на сміттєзвалища, або небезпечно демонтуються чи спалюються для збору дрібних цінних компонентів. Батареї, викинуті в комерційні відходи та на звалища, можуть випадково замкнутись і спричинити велику пожежу в тих місцях, які надзвичайно важко контролювати через велику кількість горючих відходів, з якими вони змішані [23].

#### **1.4.4 Можливі ризики при експлуатації літій-іонних акумуляторів**

Очікується, що глобальний попит на літій, також відомий як біле золото, зросте більш ніж у 40 разів до 2040 року [24], головним чином через перехід до електромобілів. Електромобілі вже є найбільшим джерелом попиту на літій – м'який білий метал, який є загальним для всіх сучасних акумуляторних батарей.

Видобуток літію, як і будь-який видобуток корисних копалин, шкідливий для навколишнього середовища та суспільства. Більше половини нинішнього виробництва літію, яке є дуже водоемним, відбувається в регіонах, які страждають від нестачі води, яка, ймовірно, погіршиться через глобальне нагрівання.

Незважаючи на те, що видобуток літію є відносно новою галуззю, вона має досвід забруднення землі та води, руйнування екосистем та порушення прав корінних і сільських громад [25].

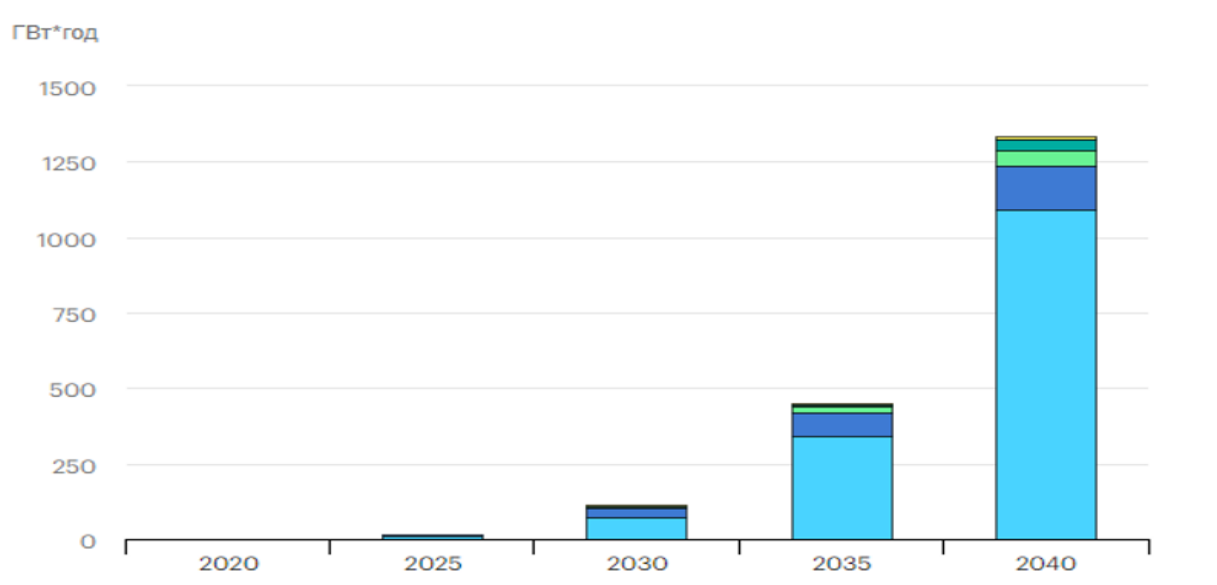
Хоч літієві акумулятори можна повторно використовувати, їх потрібно утилізувати. На сьогоднішній день, це є проблемою, адже таких підприємств

досить мало у цілому світі, а попит на електромобілі активно зростає. Саме тому, одним з «гострих» питань, стане їх накопичення.

### 1.5 Прогнозована кількість відпрацьованих літій-іонних батареї в світі та в Україні

Широке застосування літій-іонних батарей є важливою частиною переходу до безвуглецевої енергії в глобальному масштабі. А національні політики, спрямовані на скорочення викидів вуглецю та підвищення стійкості мережі, продовжуватимуть стимулювати попит на їх для електромобілів та систем зберігання енергії.

Зі збільшенням встановленої потужності систем цих батарей зростає і їх використана кількість. Виведені з експлуатації літій-іонні батареї досягнуть 640 000 [26] тон тільки в Китаї до 2025 року, а кількість у Сполучених Штатах може досягти 2 000 000 тон на рік до 2040 року (рис. 1.10) [24].



**Рисунок 1.10 - Кількість відпрацьованих літій-іонних акумуляторів від електромобілів та зберігання в Сценарії сталого розвитку, 2020-2040 рр.(1300 гігават годин  $\approx$ 8 млн тон відходів)**

Кількість батарей, виведених з експлуатації або списаних на металобрухт, зросте ще більше через несправності акумуляторів і велику кількість систем зберігання акумуляторів, які досягають свого безпечного

терміну служби. Це буде жахливою тратою ресурсів і серйозним забрудненням навколишнього середовища, якщо таку велику кількість не утилізувати належним чином [27].

Показників про відпрацьовані акумулятори по Україні немає, проте, за даними порталу Auto-Consulting, з кінця 2021 року, кількість електромобілів зросла на 230% (рис. 1.11). А це свідчить, що ближчим часом кількість відпрацьованих батарей буде значно зростати.



**Рисунок 1.11 – Кількість електрокарів, завезених в Україну з кінця 2021 року**

Середня вага повністю складеного акумулятора важить приблизно 500 кг. На основі цієї інформації та статистичних даних, можна легко порахувати орієнтовану кількість відпрацьованих батарей за формулою 1.1 та 1.2:

$$N_i = \frac{\sum N_i^{авт} \cdot n_i}{T_i}, \text{шт./рік} \quad (1.1)$$

де  $N_i^{авт}$  - кількість автомашин, забезпечених акумуляторами і-го типу;

$n_i$  - кількість акумуляторів в автомашині, шт.;

$T_i$  - експлуатаційний термін служби акумуляторів і-й марки, років.

Вага відпрацьованих акумуляторів, що утворюються, дорівнює:

$$M_i = \sum N_i \cdot m_i \cdot 10^{-3}, \text{т/рік} \quad (1.2)$$

де  $N_i$  - кількість відпрацьованих акумуляторів і-ої марки, шт./рік;

$m_i$  - вага акумуляторної батареї 1-го типу.

Прогнозовані результати утворення відходів відпрацьованих акумуляторів представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Прогнозована кількість утворення відпрацьованих акумуляторів в Україні на 2025 – 2027 рр.

Кількість авто з акумуляторами даного типу	Рік ввезення в Україну	Нормативний термін експлуатації, років	Рік виведення з експлуатації	Кількість акумуляторів на <i>i</i> -ій машині	К-сть відпрац. акумуля. <i>i</i> -ої марки, шт./рік	Вага акумулятора, кг	Вага відпрацьованих акумуляторів, т
8 996	2021	5	2025	1	1 899,32	500	899,6
13 938	2022	5	2026	1	2 799,2	500	1 399,6
37 953	2023	5	2027	1	7 590,6	500	3 795,3
<b>Разом</b>							<b>6094,5</b>

За результатами підрахунків картина постає не дуже радісна, адже цифра досить немаленька, а переробкою мало хто займається не тільки в Україні, але й у світі. Тому прогноз для більшості з них – звалище або захоронення.

Варто пам'ятати, що в кожному відпрацьованому акумуляторі є цінні метали, які можна переробити. Відпрацьовані ЛІВ зазвичай містять % ( за вагою): 5–20 % кобальту (Co), 5–10 % нікелю (Ni), 5–7 % літію (Li), 3-10% міді(Cu), 1-5% алюмінію(Al), заліза (Fe) 1-5%, марганцю (Mn) 2-10%, 15% органічних сполук і 7% пластику - хоча їхній склад відрізняється залежно від виробника. Такі цінні метали, як літій, нікель, кобальт і марганець із відпрацьованих літій-іонних акумуляторів (ЛІВ), приносять значні економічні вигоди, якщо їх можна переробити.

Розрахувати приблизну кількість цінних металів, яка міститься у відпрацьованих ЛІВ можна розрахувати за формулою 1.3:

$$M_{\text{метал}} = m_{\text{маса}} \cdot C_{\%} \quad (1.3)$$

де  $M_{\text{метал}}$ - маса металу, що вилучається;

$m_{\text{маса}}$  – загальна маса батареї, кг;

$C_{\%}$  - масова частка металу в батареї (у %, переведених у долі від 1).

Результати розрахунків представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Прогнозована кількість цінних металів з відпрацьованих ЛІВ

Назва речовини	%	Прогнозована к-сть на 2025, т	Прогнозована к-сть на 2026, т	Прогнозована к-сть на 2027, т
Кобальт (Co)	5–20	44,98-179,92	66,98-267,92	189,765-759,06
Нікель (Ni)	5–10	44,98-89,96	66,98-133,96	189,765-379,53
Мідь (Cu)	3-10	26,988-89,96	41,988-133,96	113,85-379,53
Літій (Li)	5–7	44,98-62,972	66,98-93,772	189,765-265,67
Алюміній (Al)	1-5	89,96-44,98	13,396-66,98	37,953-189,765
<b>Разом:</b>		251,888-467,792	256,234-696,592	721,098-1 973,555

За результатами розрахунків можна побачити, що з відпрацьованих батарей за три роки можна вилучити велику кількість цінних металів, яка з кожним роком росте. Відповідно, ці метали можна використовувати повторно для розробки нових батарей або в інших сферах. Отже, розвиток сфери переробки подібних акумуляторів є економічно вигідним.

На сьогоднішній день, поводження з даними відходами ще досить мало розвинуто по всьому світу. Багато приватних компаній пропонують послуги утилізації літій-іонних батарей, але, загалом, вони утилізуються в спеціальних контейнерах, як кольоровий метал. Однак потрібно розвивати цю сферу, адже стрімкий розвиток електротранспорту тягне за собою великі кількості накопичення відпрацьованих акумуляторів. Враховуючи загальне становище і законодавство поводження з різними відходами в нашій країні, ці батареї можуть просто захоронюватись на звалищах, що призведе до потрапляння токсичних речовин в навколишнє середовище і катастрофічних наслідків для навколишнього середовища [28].



## **2 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ЛІТІЙ-ІОННИМИ АКУМУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

### **2.1 Досвід інших країн щодо організації збору та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів**

Переробка відпрацьованих ЛІВ викликала великий інтерес в останні роки у відповідь на зростаючий попит на відповідні дорогоцінні метали та матеріали та зростаюче занепокоєння, викликане шкідливим впливом на навколишнє середовище звичайна утилізація твердих відходів акумуляторів.

Якщо припустити, що вміст цінного металу в катодах літій-іонних акумуляторів може бути ефективно відновлений у чистому металевому вигляді, то приблизно 10 000 доларів США грошової вартості Со міститься в 1 метричній тоні відпрацьованих літій-іонних акумуляторів [29-31]. З приблизно 500 000 тон акумуляторів, які можна було б переробити зі світового виробництва в 2019 році, можна було б відновити 15000 тон алюмінію, 35000 тон фосфору, 45000 тон міді, 60000 тон кобальту, 75000 тон літію та 90000 тон заліза [32]. Переробка може зменшити потребу у видобутку нових матеріалів і залежність від імпорту та розвивати новий напрям, який буде дуже вигідний. Крім того, нераціональне використання цінних матеріалів через безвідповідальну утилізацію відпрацьованих літій-іонних батарей значною мірою сприяє забрудненню та погіршенню навколишнього середовища.

Ефективне відновлення металів із відпрацьованих літій-іонних акумуляторів є обов'язковим через зростаючий інтерес до раціонального використання природних ресурсів і зменшення забруднення навколишнього середовища. Переробка та відновлення цінних металів може зменшити забруднення навколишнього середовища та вирішити кризу дефіциту Со, Ні та Лі та оборотності [33].

Наразі на основних ринках, зокрема в Китаї, ЄС і США, де поводження

з відпрацьованими акумуляторами суттєво різняться, немає спеціальних правил утилізації.

**Європа.** Законодавча Директива ЄС 2000/53/ЄС Європейського парламенту та Ради від вересня 2000 року щодо транспортних засобів з кінцевим терміном служби (EoL) вимагає, щоб транспортні засоби EoL мали бути розроблені таким чином, щоб їх можна було легко відновити, повторно використати та переробити. Крім того, директива також вимагає безкоштовної доставки транспортних засобів EoL до авторизованих очисних споруд і забороняє захоронення та спалювання цих акумуляторів [34]. Переробка ЛІВ також заохочується законодавством ЄС, де було прийнято Директиву щодо акумуляторів 2006/66/ЄС. Директива вимагає, щоб кожна держава-член ЄС відповідала коефіцієнту збору 45% і ефективності переробки щонайменше 50% [35, 36]. Положення Директиви ЄС щодо акумуляторів також вимагають від виробників акумуляторів нести відповідальність за свої відходи. Виробники повинні платити за збір, обробку, переробку та утилізацію відпрацьованих батарейок пропорційно своїй частці ринку [37].

У 2015 році набуло чинності Положення Великобританії про відпрацьовані батареї та акумулятори, які вимагають, щоб прилади були розроблені таким чином, щоб батареї можна було легко вийняти [38]. Схема відповідності також зареєструє виробників у відповідній екологічній агенції для відстеження відпрацьованих батарейок і посилення переробки [37].

У Німеччині нормативні акти вимагають від усіх учасників ланцюжка створення вартості акумуляторів брати на себе відповідну відповідальність за переробку акумуляторів. Зокрема GRS Battery Foundation (Німеччина) була створена як загальна схема збору для переробки батарей відповідно до Закону Німеччини про акумулятори..

**Сполучені Штати Америки.** У США деякі некомерційні організації та промислові асоціації відіграють важливу роль у переробці акумуляторів. На федеральному рівні в США немає законів про управління відходами ЛІВ. Однак Агентство з охорони навколишнього середовища (EPA) класифікувало

інші типи відходів акумуляторів, включаючи свинцево-кислотні і нікель-кадмієві батареї, як небезпечні відходи.

Відходи ЛІВ можуть бути класифіковані та регулюватися як небезпечні відходи на федеральному рівні, лише якщо вони не пройшли тести на займистість, корозійну активність, реактивність і токсичність, розроблені ЕРА. В даний час ЛІВ не вважаються небезпечними відходами на федеральному рівні США, хоча за останні кілька років було проведено кілька досліджень, щоб оцінити, чи слід їх класифікувати як небезпечні відходи за останні кілька років [39].

На даний момент існує дев'ять штатів, які регулюють програму EPR (Extended producer responsibility – розширена відповідальність виробника) для акумуляторних батарей. Як Каліфорнійський закон про переробку акумуляторних батарей 2006 року, так і Закон Нью-Йорка 2010 року забороняли викидати побутові батареї на смітник. Закон Каліфорнії класифікував ЛІВ як небезпечні через надмірні рівні металів Co, Cu та Ni і вимагає, щоб роздрібні продавці мали систему прийому та збору використаних акумуляторних батарей для повторного використання, переробки або належної утилізації, включаючи безкоштовне повернення замовнику. Відповідно до Законів, виробники акумуляторів також зобов'язані організувати повернення використаних акумуляторів та переробити їх за власний рахунок. У Нью-Йорку продукти ЛІВ повинні бути належним чином марковані, щоб полегшити етап сортування на передньому кінці, коли використані батареї надходять у процес переробки [40].

**Азіатсько-Тихоокеанський регіон.** В Австралії розробка політики та нормативних рамок щодо отримання ресурсів із відходів акумуляторів є відносно незрілою або взагалі не існує порівняно з міжнародними аналогами [39]. У 2011 році було прийнято Австралійський закон про управління продуктами, який визнав спільну відповідальність за управління відходами та їхній вплив протягом життєвого циклу продукту. Однак відходи акумуляторів, фотоелектричні елементи та електронні відходи з інших джерел наразі не

включені до Національної схеми переробки телебачення та комп'ютерів (NTCRS), але були визнані пріоритетними сферами управління відходами в Австралії протягом 2020–2021 років [41].

На сьогоднішній день Австралійська столична територія була першою, хто заборонив захоронення електронних відходів і зробив їх переробку обов'язковою в 2005 році, Південна Австралія та Вікторія послідували запровадженням заборони на звалища у 2010 та 2019 роках відповідно. Деякі організації та роздрібні магазини, як-от Australian Battery Recycling Initiative (ABRI), Mobilemuster, Aldi та Officeworks, пропонують послуги збору батарей для переробки.

В Австралії не існує складної індустрії переробки LiB, і зібрані LiB зазвичай відправляються за кордон для обробки. Оскільки Австралія є одним із найбільших світових виробників літію, це було рекомендовано створити систему лізингу літію, відому як обслуговування, щоб заохотити розвиток кращої практики управління та здорової інфраструктури переробки літію. В Австралії в 2020 році було створено національну схему управління акумуляторами, яка вимагає від виробників та імпортерів акумуляторів сплачувати комісію за обробку EoL за акумулятор.

На противагу цьому в Японії виробники акумуляторів почали переробляти акумулятори через роздрібних торговців ще з 1994 року. Починаючи з 2000 року уряд Японії надавав субсидії та вимагав від виробників батарей переробляти NiMH та LiB. Японські виробники акумуляторів створили компанії з переробки для утилізації відходів акумуляторів. Наприклад, Nissan і Sumitomo створили 4R Energy для переробки батарей. Крім того, японські профспілки також сприяють розвитку галузі переробки.

Політика підтримки переробки в Китаї зростає. Чітке розширення системи відповідальності виробника було прийнято в Китаї на початку 2016 року шляхом впровадження політики, включаючи методи переробки акумуляторів електромобілів і стандартні умови комплексної утилізації

відпрацьованих акумуляторів електромобілів [41], включаючи повторне використання знятих з експлуатації акумуляторів електромобілів в інших сферах застосування, таких як енергетика. Стимули та субсидії для переробки акумуляторів, зокрема акумуляторів електромобілів, та їх повторного використання були впроваджені в Китаї, наприклад:

- «Місто без відходів», яке було оголошено в 2019 році для створення «зеленого ланцюжка поставок», що включає компанії з переробки, великі корпорації, роздрібні торговці та підтримку державних відомств. Цілі включають переробку та повторне використання LАВ та LІВ.

- Міністерство промисловості та інформаційних технологій вимагало від виробників автомобілів дозволити громадськості ремонтувати, викидати або міняти старі акумулятори. З 2018 року виробники електромобілів були зобов'язані використовувати унікальні ідентифікатори для відстеження своїх батарей, щоб полегшити реалізацію вторинного життя та переробки.

- Неурядові платформи переробки електронних продуктів також з'являються в Сухуйшоу, Айхуйшоу та Хуйшоубао. Це призвело до створення понад 100 підприємств у Китаї, які мають відповідну кваліфікацію для демонтажу електронних відходів, включаючи LІВs.

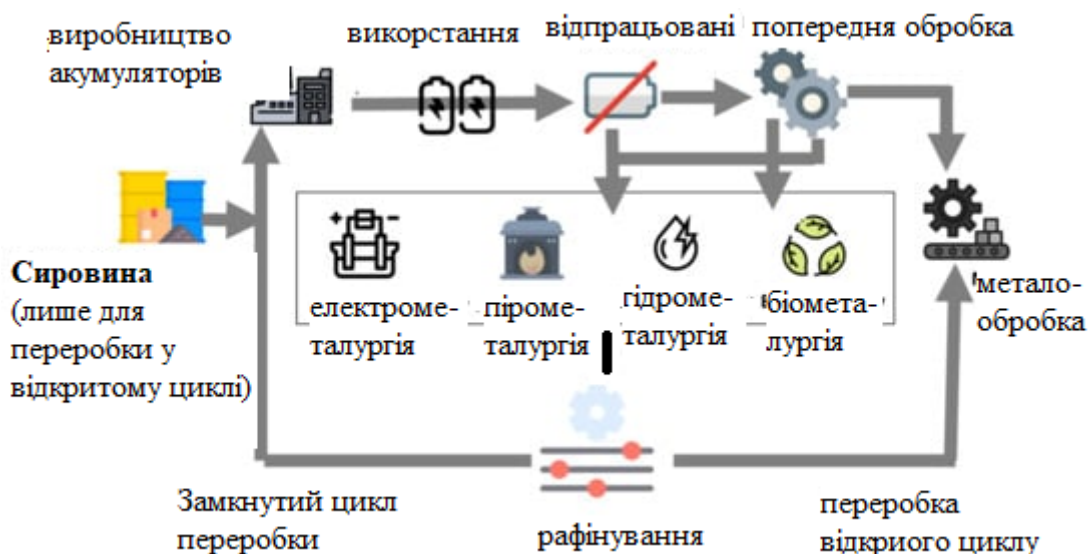
Основні перешкоди для переробки LІВ з потоку електромобілів у Китаї включають недостатні процедури збору, неналежний демонтаж, незаконні демонтажі та недостатній державний нагляд. Питання переробки LІВ, порушені в Китаї, одному з основних ринків LІВ, також є подібними проблемами, поширеними в інших глобальних регіонах, про що було зазначено в нещодавньому офіційному документі CSIRO про стан переробки LІВ в Австралії [42].

## **2.2 Порівняльний аналіз існуючих технологій переробки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів для електромобілів**

Відпрацьовані літій-іонні батареї традиційно переробляються за

допомогою гідрометалургії, пірометалургії, біометалургії або комбінації всіх або деяких із них у промисловому та пілотному масштабах.

На рисунку 2.1 показано схематичне зображення типової схеми переробки, яка зазвичай включає чотири основні етапи: попередню обробку, вилучення металу, очищення продукту та компонентів і виробництво акумулятора.



**Рисунок 2.1 - Традиційні етапи переробки використаних літій-іонних акумуляторів**

Щоб уникнути мимовільного самозаймання елементів батареї або короткого замикання під час наступного етапу розбирання або демонтажу, відпрацьовані літій-іонні батареї зазвичай спочатку повністю розряджаються, щоб звільнити весь залишковий заряд. Для розрядки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів їх зазвичай занурюють у розчин солі. Після етапу розрядки повністю розряджені літій-іонні батареї обробляються шляхом механічного відділення та автоматичного або ручного демонтажу. Метою цього етапу є видалення пластикових або металевих корпусів і відокремлення внутрішніх компонентів відпрацьованих літій-іонних батарей (тобто анода, катода та сепаратора) для подальшої переробки. Після етапу розбирання матеріал активного катода відокремлюється від струмоприймача за

допомогою процесів хімічної, термічної або фізичної обробки. Відновлений матеріал активного катода потім направляється на наступний етап для подальшої обробки. Традиційна схема переробки відпрацьованих літій-іонних акумуляторів зображена на рисунку 2.2.



**Рисунок 2.2 - Схема переробки відпрацьованих літій-іонних батарей**

Пірометалургія – це процес вилучення металів або металевих сполук із відпрацьованих LiB безпосередньо за допомогою високих температур. Це відносно простий процес; однак для цього потрібні високі температури та високі витрати енергії. Крім того, розчин електроліту та сполучна речовина вироблятимуть значні токсичні відпрацьовані гази при високих температурах, спричиняючи вторинне забруднення навколишнього середовища.

На рисунку 2.3 показана типова схема пірометалургійної процедури переробки відпрацьованих LiB.

Кольори рамки на рисунку вказують на різні категорії в процедурі: фіолетовий – потік відходів, червоний – реагенти, жовтий – матеріал, а синій – робочий процес.

Після розвантаження та розбирання відпрацьованих пакетів LiB оболонки переробляються окремо. Потім електродні матеріали можна помістити в піч для випалу в поєднанні з коксом і вапном для відновного випалу.



**Рисунок 2.3 - Схема процесу пірометалургійної переробки відпрацьованих LiB**

Діафрагми та електроліти спалюються та розкладаються на такі гази, як  $\text{CO}_2$ . Потім  $\text{LiCoO}_2$  відновлюється до металевого  $\text{Co}$  і  $\text{Li}_2\text{O}$ . Після того, як  $\text{Li}_2\text{O}$  виходить у вигляді пари, він може бути абсорбований водою.

Для таких металів, як  $\text{Cu}$  і  $\text{Co}$ , вони утворюються в сплавах, що містять вуглець, тоді як осад фіксує  $\text{F}$  і  $\text{P}$ , а  $\text{Al}$  окислюється до шлаку.

Пірометалургія є поширеною та зрілою технікою переробки, вона широко використовується завдяки своїй швидкості, простоті та гнучкості. Крім того, у пірометалургійному процесі попереднє сортування акумуляторів не потрібне.

Продукти пірометалургії, в тому числі елементарні «будівельні блоки», можуть бути використані для синтезу нових катодних речовин. З іншого боку, утворення токсичних газів (таких як  $\text{CO}_2$ ) під час пірометалургії є серйозною екологічною проблемою цієї техніки.

Процес плавки характеризується високими енерговитратами, і для отриманого сплаву необхідна подальша обробка, що збільшує вартість загальної процедури. Кількість речовин, які відновлюються за допомогою



пірометалургії, обмежена, відновлюються лише мідь із фольги та нікель і кобальт із позитивних електродів, що становить 30 мас.% батарей в електронних пристроях, у той час як інші матеріали, такі як пластик, графіт та Al – ні.

Можливо, ця технологія погано працює для LiB, які використовуються в електромобілях, через низький вміст кобальту. Крім того, індустрія LiB для транспортних засобів рухається до зменшення кобальту, зрештою досягаючи електродів із вільним кобальтом.

Підсумовуючи, основні пірометалургійні варіанти переробки відпрацьованого LiB включають піроліз, спалювання, випал, плавку та рідке вилуговування. Хоча ці стадії включають багато варіантів пірометалургійної процедури, ці процеси завжди вимагають високої енергоємності зі значним потенціалом вторинного забруднення повітря в навколишньому середовищі. Крім того, вплив пірометалургійного процесу на навколишнє середовище може змінюватися залежно від багатьох факторів, які можуть включати швидкість відновлення металу та інтенсивність вуглецю в сітці [43].

Гідрометалургійний процес є найпоширенішим процесом переробки на поточному ринку переробної промисловості LiB. В основному він включає чотири етапи:

1. розрядження та демонтаж;
2. попередня обробка для досягнення максимально можливого розділення активних матеріалів і струмоприймачів;
3. вимивання цінних металів із попередньо оброблених активних матеріалів у розчин;
4. екстракція металів, яка відокремлює та виділяє метали в розчині для вилуговування або знову готує та синтезує електродні матеріали чи неорганічні сполуки.

Принципова робоча схема гідрометалургійного процесу показана на малюнку 2.4 . Колір рамки на цьому рисунку вказує на різні категорії в

процедурі: фіолетовий – потік відходів, червоний – реагенти, жовтий – матеріал, а синій – робочий процес.



**Рисунок 2.4 - Схема гідрометалургійної процедури переробки відпрацьованих LiB**

Гідрометалургійний процес складніший за пірометалургійний, але метод має більш високу віддачу, м'які умови експлуатації та менше забруднення навколишнього середовища. Крім того, нещодавнє дослідження LCA (Life Cycle Assessment - Оцінка життєвого циклу) [42] показало, що найефективніший гідрометалургійний процес може знизити вплив на навколишнє середовище більш ніж на 50% порівняно із середнім показником процесів переробки. Таким чином, це стало популярним напрямком досліджень і широким занепокоєнням наукових кіл та промисловості.

Гідрометалургія демонструє перевагу низьких викидів, низьких потреб у енергії та високої швидкості відновлення металів високої чистоти порівняно з технікою пірометалургії. Отже, гідрометалургія вважається більш доцільною для переробки літій-іонних батарей, що вийшли з експлуатації. Однак у цього методу є і деякі недоліки. Однією з них є вимога сортування батарейок, що збільшує витрати та ускладнює загальний процес переробки. Крім того,

відокремлення алюмінію, міді, заліза, марганцю, нікелю та кобальту в розчині для вилуговування залишається проблемою через їх однакові хімічні властивості.

Ще одним недоліком гідрометалургійного процесу є вартість утилізації утворених стічних вод. Щоб зберегти прибутковість гідрометалургії в умовах тенденції зменшення цінних металів, таких як Co, у LIBs, необхідно забезпечити простоту процесу, високу ефективність відновлення металу та низьку витрату реагентів [44].

Процес біометалургії використовує мікроорганізми (бактерії) для обробки та відновлення металів. Здатність мікроорганізмів (або мікробів) перетворювати нерозчинні тверді матеріали в розчинні та екстраговані форми є рушійним фактором, що впливає на ефективність типового біометалургійного процесу.

Біометалургійні процеси використовують менше шляхів споживання енергії в м'яких умовах порівняно зі звичайними процесами, що робить їх ідеальними екологічно чистими процесами. Однак, має фатальні недоліки при застосуванні в промисловому виробництві. Це пов'язано з його повільною кінетикою та низькою щільністю м'якоті. В одному дослідженні щільність целюлози зросла з 1–4%, що призвело до різкого падіння ефективності біовилуговування Co та Li на 52–10% та 80–37% відповідно.

Біометалургійні процеси все ще дуже трудомісткі, навіть незважаючи на те, що висока концентрація пульпи може бути використана для отримання високої ефективності вилуговування Co та Li шляхом регулювання температури реакції вилуговування, збільшення дози змішаних енергетичних субстратів та зміни рН.

Таким чином, біометалургійні процеси переробки відпрацьованих літій-іонних батарей ще далекі від застосування в промисловості, незважаючи на те, що вони передбачають значні енергозберігаючі способи обробки [45].

У таблиці 2.1 узагальнено основні методи, які використовуються в описаних вище процесах вилучення металу, включаючи переваги, недоліки та

вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 2.1 - Порівняння методів процесів вилучення металів з LiB

<b>Процес</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>	<b>Екологічна небезпека</b>
Пірометалургія	Велика місткість, просте управління	Висока температура, високе споживання енергії, низька швидкість відновлення металу	Відпрацьовані гази, пил
Гідрометалургія	Низьке енергоспоживання, висока швидкість відновлення металу, висока чистота продукту	Тривалий процес відновлення, велика витрата хімічних реагентів	Стічні води
Біометалургія	Низьке енергоспоживання, м'які умови експлуатації, висока швидкість відновлення металу	Тривалий період реакції, бактерії важко культивуються	Стічні води

Пірометалургійні методи з відносно простою операцією та великою потужністю переробки застосовувалися в промисловості для переробки відпрацьованих LiB. Однак ці процеси обмежені їх високою вартістю, високим споживанням енергії та великими втратами металу. Крім того, пірометалургійні методи виділяють шкідливі гази через розкладання токсичного електроліту та органічних матеріалів. Тому при практичному застосуванні необхідно обладнати пристрій для очищення відпрацьованих газів.

У біометалургійних процесах кислоти, що утворюються в результаті мікробного метаболізму, використовують для розчинення катодного

матеріалу відпрацьованих LiB, щоб отримати фільтрат. Хоча ці процеси мають переваги низького споживання енергії та низької вартості, бактерії важко культивувати та легко забруднювати.

Завдяки своїм перевагам у високому відновленні металу та високій чистоті продукту, гідрометалургійні процеси розглядаються як багатообіцяючий спосіб відновлення відпрацьованих LiB. Однак процес відновлення вимагає витрати великої кількості хімічних реагентів. На чистоту відновленого продукту впливають домішки хімічних реагентів, процес відновлення та параметри процесу. Крім того, відокремлення та переробка металевих компонентів має такі недоліки, як складні процеси, низьке відновлення металевих компонентів, високі витрати на обробку та серйозне забруднення навколишнього середовища.

Порівняно з технологіями, наведеними в таблиці 2.1, механохімія, яка зазвичай впроваджується під час гідрометалургійної обробки, має переваги зниження споживання хімічних реагентів і більш м'яких умов реакції. Однак її високе енергоспоживання та великі інвестиції в обладнання обмежують промислове застосування.

На сьогоднішній день, досить мало існує заводів по переробці літій-іонних батарей, проте ця сфера стрімко розвивається. Багато підприємців патентують нові технології та займаються переробкою. Декілька з них представлено нижче.

Retriev, який спочатку називався Тохсо, розробив гідрометалургійну процедуру (рис.2.5) для переробки виведених з експлуатації LiB з річною потужністю 4500 тон.

Обробка пошуку починається з сортування та розбирання корпусів великих акумуляторних блоків. Відпрацьовані літій-іонні батареї згодом подрібнюють молотковим млином в рідкому розчині літйєвого розсолу або рідкого азоту з метою зниження бурхливої реактивності LiB, уникнення виділення токсичних газів і нейтралізації електролітів.

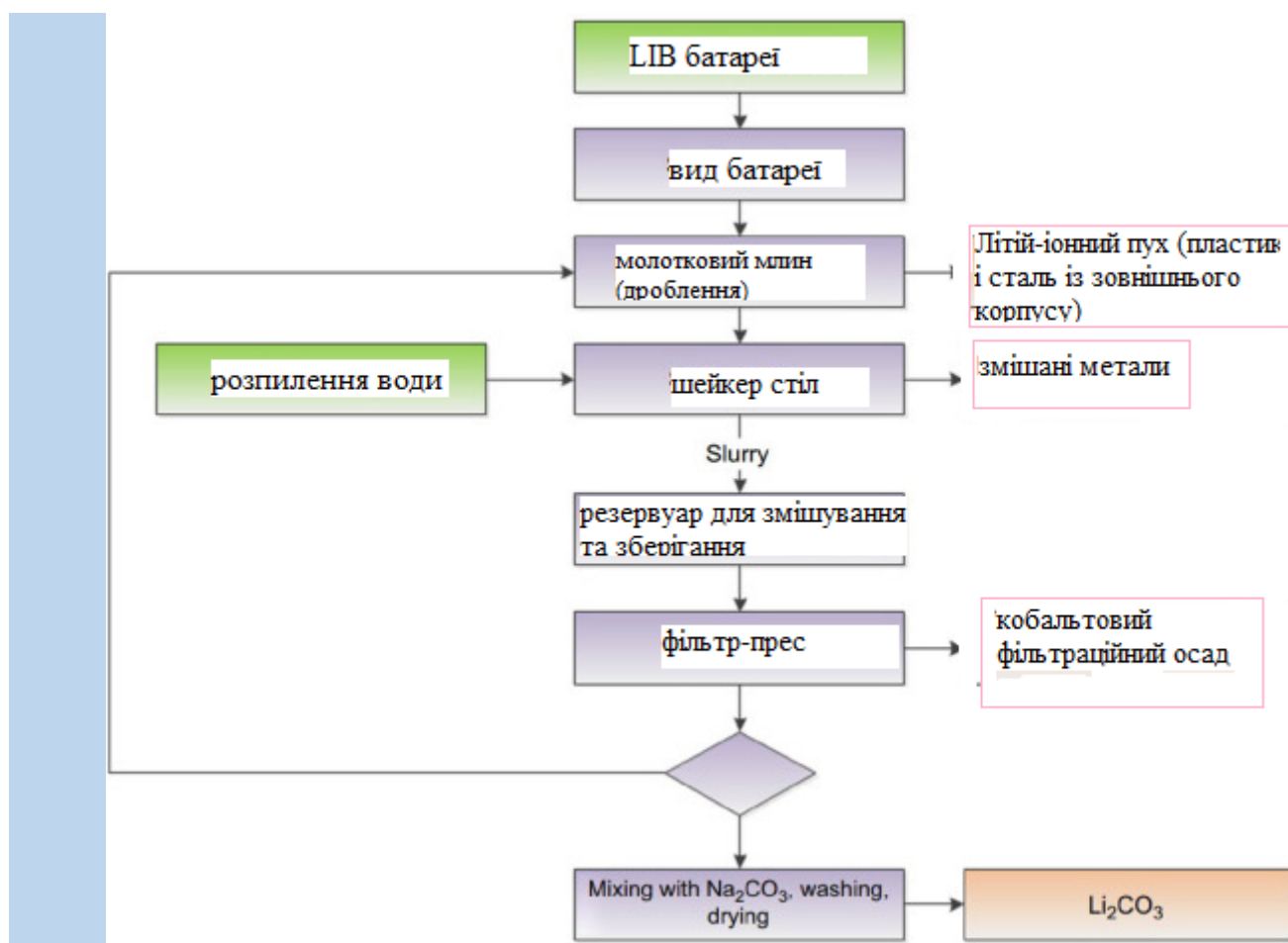
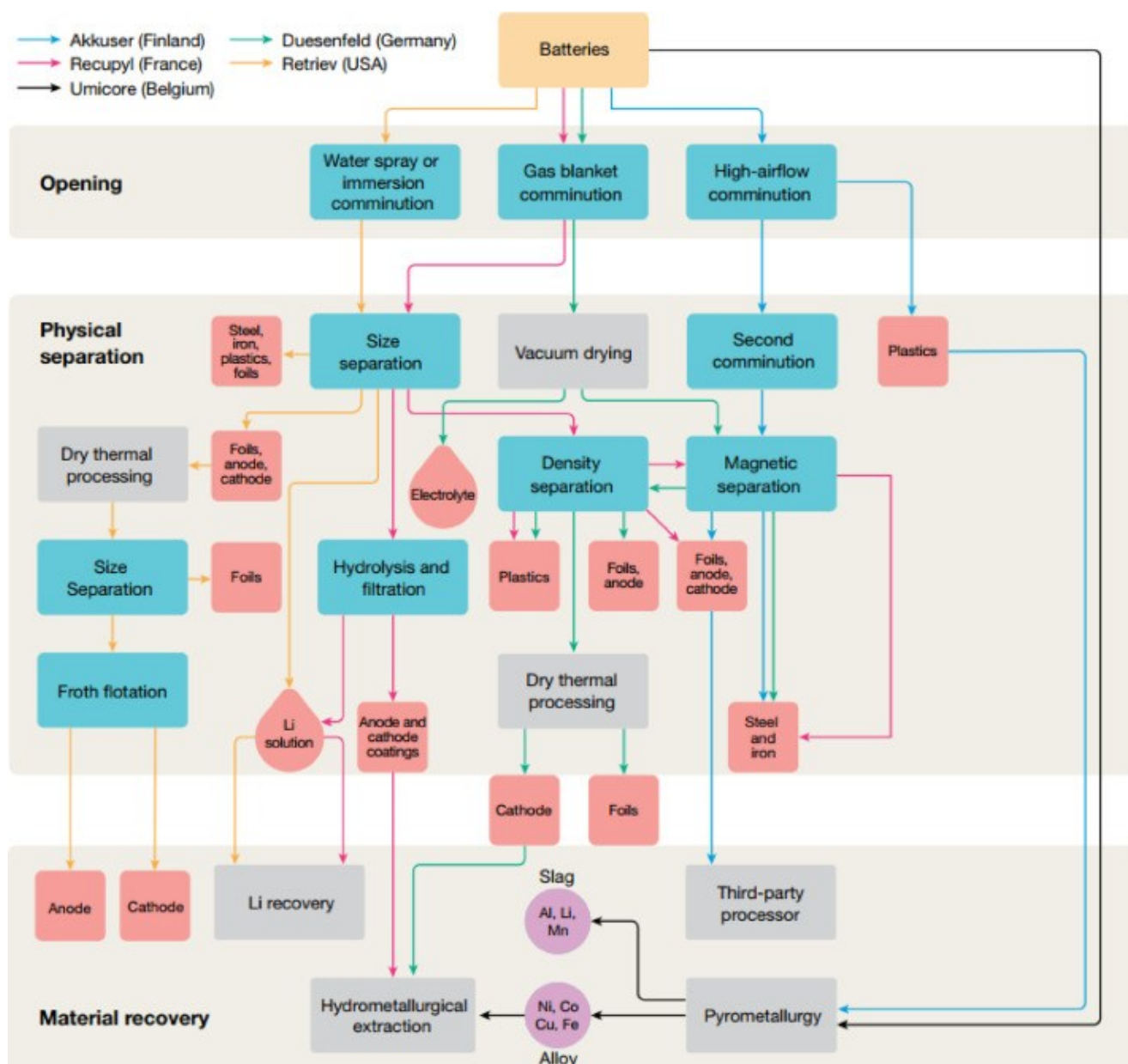


Рисунок 2.5 - Retriev (Тохсо) технологія переробки акумуляторів

Під час процесу подрібнення утворюється фракція пуху, що містить пластик і сталь, і сталь пуху може бути відновлена під час подальшої обробки. Залишок процесу подрібнення надсилається на струшувальний стіл, і звідти утворюється суміш Cu, Co та Al, цю суміш можна використовувати для відновлення металів у подальшій обробці. Залишки після шейкерного столу переносяться в суміш і резервуар для зберігання, де вони нагріваються і реагують з іншими матеріалами. Залишок із резервуару фільтрують для отримання кобальтового фільтраційного осадка та літійового розсолу. Кобальтовий осад на фільтрі дозволяє витягувати кобальт, а розсіл літію можна використовувати для вилучення літію в наступних процесах.

Ресурл запропонував гідрометалургійний підхід для переробки первинних або вторинних LiB. Річна потужність цього об'єкта – 110 тон. Більш детально процедура переробки Ресурл представлена на рис. 2.6.



**Рисунок 2.6 - Процеси переробки LiВ кількох компаній: Retrieval, Duesenfeld, Akkuser, Recupyl і Umicore**

У цьому процесі відпрацьовані LiВ спочатку проходять двоетапне подрібнення. Перше подрібнення має на меті виявити внутрішні сполуки, воно виконується зсувом при 11 об/хв в інертному газі Ar або CO<sub>2</sub> як захисній атмосфері. Вторинне подрібнення проводиться високошвидкісним обертовим (90 об./хв) ударним млином для зменшення розміру частинок матеріалів батареї. Подрібнені матеріали поміщають на вібросито і поділяють на дві фракції – більше і менше 3 мм. Залістисті елементи розміром понад 3 мм видаляються за допомогою стадії магнітної сепарації.

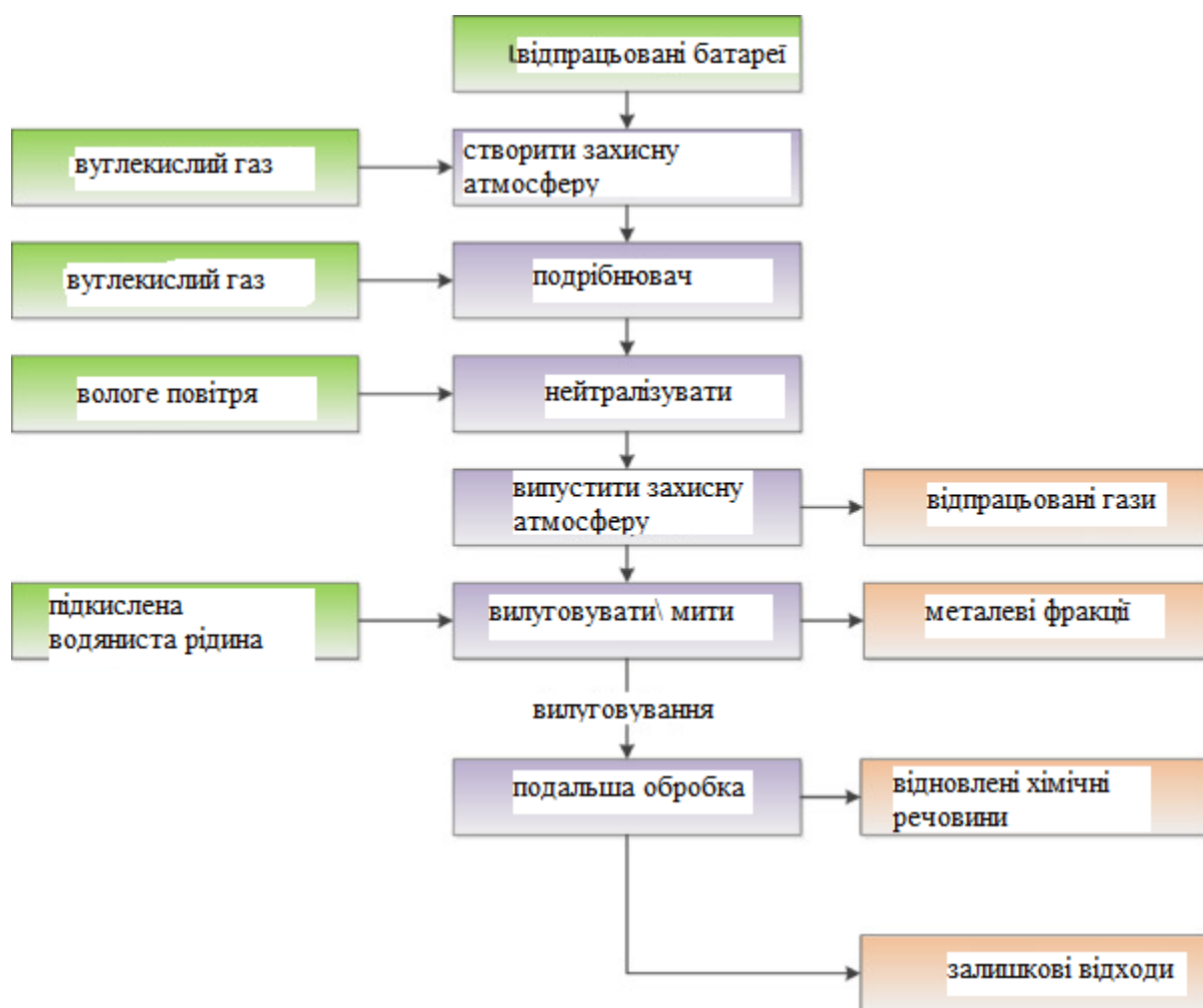
Отримані речовини надсилають на денсиметричний стіл, де розділяють дві різні фракції матеріалу низької щільності (що містить пластик і папір) і матеріалу високої щільності (включаючи алюміній і мідь). Тим часом частина менше 3 мм просівається через сито з меншими отворами (500 мкм), щоб видалити залишки частинок Cu. Видалення домішок міді є важливим, оскільки цей елемент може сильно перешкодити подальшій гідрометалургійній переробці. Після тонкого просіювання отриманий порошок розмішують у воді з додаванням гідроксиду літію. Процес водного вилуговування може виділяти водень через гідроліз, тому його потрібно проводити в атмосфері з обмеженим вмістом кисню. Під час вилуговування водою сіль літію розчиняється в розчині, тоді як графіт і оксиди металів не розчиняються, і вони відокремлюються шляхом подальшої обробки фільтрації.  $\text{LiCoO}_2$  або  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  у водній фазі можна регенерувати або шляхом розділення твердої/рідинної фази, або шляхом додавання  $\text{CO}_2$ .

Залишок, отриманий після водного вилуговування та фільтрації, розчиняють при  $80^\circ\text{C}$  за допомогою сірчаної кислоти. Після кислотного вилуговування мідь цементують сталлю, а вугілля фільтрують. Літій у фільтраті може бути відновлений у вигляді фосфату літію шляхом осадження фосфорною кислотою. Тим часом кобальт можна або відновити в металевій формі за допомогою електролізу, або у формі гідроксиду кобальту шляхом додавання гіпохлориту натрію.

Компанія *Batrec Industrie AG* використовує гідрометалургійний шлях (рис. 2.7) для переробки відпрацьованих літій-іонних батарей. Річна номінальна потужність цього об'єкта становить 200 тон.

Процес *Batrec* починається зі створення захисної атмосфери  $\text{CO}_2$ , а відпрацьовані LiV подрібнюються в цій захисній атмосфері, щоб мінімізувати можливі реакції. Потім подрібнений матеріал батарей проходить нейтралізаційну обробку у вологому повітрі з подальшим використанням скрубера для очищення  $\text{CO}_2$  перед вивільненням.





**Рисунок 2.7 - Технологія переробки акумуляторів Vatrec**

Після цього для обробки обробленого матеріалу батареї використовується підкислена водяна рідина. Під час цього процесу всі металеві фракції відновлюються та можуть бути відправлені на піроліз або механічне відділення для подальшого очищення. Фракцію розчину, отриману на стадії випуговування, можна обробити для отримання більшої кількості речовин. Однак деталі процесу переробки Vatrec недоступні в літературі.

Гідрометалургія також є поширеним методом переробки відпрацьованих LiB в Китаї. Brunp є дочірньою компанією CATL, яка є гігантським китайським виробником LiB. Brunp обробляє вилучені LiB кислотним випуговуванням ( $X_2O_2$  як відновник і  $X_2SO_4$  як випуговувач), а з отриманих гідроксидів металів можна виготовляти катодні матеріали. Інші китайські підприємства, які застосовують такий же спосіб переробки старих

батареї, це Highpower International, TES-AMM, GHTECH і GEM.

У Південній Кореї компанія під назвою SungEel HiTech використовує гідрометалургійний процес для відновлення цінних елементів (міді, літію, кобальту, марганцю та нікелю) із відпрацьованих літій-іонних батарей. Відновлені речовини можуть бути використані для виготовлення нових LiB.

Завод American Manganese, розташований у Канаді, пропонує гідрометалургійну процедуру (вилуговування в поєднанні з електрохімічною обробкою) для переробки відпрацьованих катодів. Американський марганцевий підхід може відновити приблизно 100% Al, Mn, Ni, Co та Li з різних катодних хімікатів, включаючи LMO, LCO, NMC та NCA.

Переробка відпрацьованих літій-іонних батарей є важливою та терміною з багатьох причин. Відповідно до законодавства Європейського Союзу, ефективність переробки LiB має досягти мінімум 50% до 2030 року.

Щоб краще розвинути техніку переробки LiB, слід взяти до уваги наступні аспекти. LiB потрібно сортувати та класифікувати на основі типу електрода, що може підвищити ефективність процесу переробки. Конструкція літій-іонних батарей повинна бути сприятливою для переробки. Інтеграція різних процесів може знадобитися для досягнення кращої процедури переробки, оскільки кожен процес має свої плюси та мінуси. Окрім регенерації таких цінних металів, як Co, Ni та Li електродних матеріалів, важливо зосередитися на належній утилізації або відновленні інших речовин акумулятора, таких як електроліт і графіт, щоб максимізувати відновлені компоненти та мінімізувати забруднення навколишнього середовища. Законодавство та нормативні акти повинні бути прийняті в усьому світі для стандартизації процесу переробки LiB [47].

Наразі рентабельність переробки літій-іонних акумуляторів є незначною в розвинутих економіках і економічно недоцільною в регіонах із низьким рівнем сировини для літій-іонних акумуляторів. Незважаючи на те, що літій-іонні акумулятори внесли велику кількість продажів акумуляторів за останні роки в поєднанні з їхнім довшим терміном служби, обсяг літій-іонних

аккумуляторів у потоці відходів відпрацьованих батарей все ще обмежений у деяких регіонах. Для індустрії переробки літій-іонних аккумуляторів, що розвивається, відсутність постійного постачання відпрацьованих аккумуляторів є значним економічним бар'єром. Це питання ще більше ускладнюється в багатьох юрисдикціях, де відпрацьовані батареї експортуються до країн Азії.

В останні роки основний потік відходів літій-іонних аккумуляторів – це портативна електроніка, яка зазвичай має невеликий розмір. Очікується, що з початком масового використання літій-іонних аккумуляторів для електромобілів у найближчому майбутньому переробка літій-іонних аккумуляторів значно зросте в усьому світі, оскільки буде усунуто кілька прогалин у ланцюжку поставок. SNAM (Франція), Тохсо (Канада), АЕА Technology (Велика Британія) і Umicore (Бельгія) — це лише деякі з глобальних компаній, які створили цілі виробничі лінії для відновлення та переробки цінних металів із відпрацьованих літій-іонних батарей. Вони в основному зосереджені на використанні гідрометалургійного, пірометалургійного або інтеграції обох процесів.

Традиційні металургійні процедури, які є тривалими і включають попередню обробку, вилуговування та очищення, є менш конкурентоспроможними з точки зору економічної цінності, ніж новітні, швидші методи, включаючи селективне вилучення, регенерацію та ремонтні операції. Незважаючи на те, що численні публікації досліджували процеси переробки металу для використаних літій-іонних батарей, лише деякі з них показали свою економічну доцільність у промислових масштабах.

Наразі не існує комерційно доступної техніки для переробки сміття, змішаного з різними катодно-активними матеріалами. Необхідно ретельно дослідити численні механізми фізико-хімічних змін у процесі рециклінгу. Потрібне обговорення та створення комплексної схеми переробки літій-іонних батарей [46].

### **2.3 Розробка рекомендацій щодо удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами**

На сьогоднішній день збором відпрацьованих батарей займається компанія «Батарейки, здавайтеся!». Ця компанія почала свій шлях в 2013 році, з декількох небайдужих людей, які вирішили покращити поточну ситуацію на той період.

Для цього вони почали самостійно встановлювати певні контейнери для збору батарейок в різних місцях: школи, магазини, офіси і т.д. Напрямок швидко почав набирати темп і компанія почала рости. Вони планували відправити ці батарейки на завод «Аргентум» (Львів), який ніби займався їх переробкою, однак це не було правдою, адже процес переробки звичайних батарейок збитковий.

Згодом, коли вони зібрали понад 40 тон батарейок з усіх областей, вони почали замислюватись над способом їх утилізації та дізнались про інші «псевдокомпанії», які просто захоронювали батарейки, а гроші залишали собі.

Саме тоді компанія почала активно вивчати цей напрям та вже в 2020 році почала поставляти відпрацьовані батарейки на переробки до Румунії. Компанія надає прозорі звіти та з перших днів працює за рахунок небайдужих людей.

На сьогоднішній день, згідно їх офіційному сайту, компанія налічує 1750 пунктів збору та постачає 3% (з 6%) річного імпорту України на переробку [48].

Однак для розвитку даного напрямку потрібно, аби законодавство також робило свій внесок. Прикладом може слугувати Євросоюз, де 25 років назад також збирали лише 1 % відпрацьованих батарей. Звичайно, після прийняття закону одразу все не зміниться і потрібно буде ще багато чого зробити, однак це стане чудовим початком для розвитку даної сфери.

Наступним кроком, для ефективної системи збору, потрібно ввести відповідальність виробників за виготовлені батарейки (звичайні), майбутні

відпрацьовані акумулятори повинні відправлятися на заводи переробки. При чому, це буде найбільш ефективно, якщо це на законодавчому рівні.

Звичайно, потрібно будувати заводи по переробці батарей, однак а сьогоднішній день це неможливо (за даними сайту «Батарейки, здавайтеся!») через те, що він просто не окупиться. Акумулятори та батарейки бувають 8 типів і кожен потребує певної технології переробки, а кількість збору батарей в Україні приблизно 100 тон/рік, при потужності, наприклад, заводу Redux (Німеччина) – 15 000 тон/рік [49].

Стосовно літій-іонних акумуляторів, тут трохи складніше, адже системи утилізації відпрацьованих акумуляторів не існує і, навіть не розглядається на законодавчому рівні. На сьогоднішній день, відпрацьовані автомобільні акумулятори приймають в деяких офіційних дилерських центрах, які офіційно продають електрокари в Україні. Але більшість з них завезені як «вживані», а за авто, які буди в використанні, офіційні центри відповідати не хочуть. Що відкриває ще одну проблему – майбутньої утилізації не офіційно завезених авто, яких значно більше, ніж продані через офіційні дилерські центри, через їх низьку вартість.

Підсумовуючи, для покращення ситуації потрібно зробити :

1. На законодавчому рівні встановити певні правила утилізації літій-іонних батарей; створити чітку систему сортування та збору відходів даного типу та всеціло почати займатись вирішенням проблеми.

2. Так як, поки що, неможливо побудувати певні заводи з переробки, створювати нові договори для транспортування відпрацьованих LiB на спеціалізовані заводи по всьому світу. Або ж, почати фінансувати проект «Батарейки, здавайтеся!», аби вони могли розширювати свої потужності в Україні.

3. Одним із головних проблем для іноземних інвесторів є те, що в Україні досить високий рівень корупції, що відлякує їх від співробітництва. Саме тому потрібно позбавлятися її, аби наша країна могла співпрацювати з різними країнами та розвиватись у цьому напрямку.

4. Також важливою проблемою є ввезення вживаних електрокарів з інших країн, що унеможливує утилізацію їх акумуляторів. На мою думку, люди, які цим займаються, повинні одразу про це задуматись, та надавати певні рекомендації – куди можна звернутись у разі проблеми.

5. Для того, аби батареї не накопичувались, їх потрібно переробляти. З кожного переробленого акумулятора можна вилучити приблизно 80-90% цінних матеріалів, які потім використовують для створення нових.

Також, вживані літієві акумулятори можна використовувати для інших потреб, якщо їх ємність складає менше 75% від об'єму. Прикладом можуть слугувати :

- Встановлення у іншому транспорті. Приклад: навантажувачі вилкові з батареями Audi на складах концерну (рис. 2.8);



**Рисунок 2.8 – Електронний вилковий навантажувач**

- Зарядні станції. Приклад: станції EVGo із відпрацьованих батарей (рис. 2.9);



**Рисунок 2.9 – Зарядна станція EVGo**

- Мережеві накопичувачі (сховища) електроенергії. Приклад: сховища компанії B2U (рис.2.10);



**Рисунок 2.10 – сховища електроенергії B2U**

- Павербанк для дому. Приклад: "банки" компанії Nissan із старих Leaf (рис.2.11).



**Рисунок 2.11 – Павербанк компанії Nissan**

На мою думку, найбільш вдалим методом переробки є саме гідрометалургійний метод, адже у ньому значно більше переваг порівняно з пірометалургією або біовилуговуванням. Саме тому багато компаній використовують саме такий метод. Вони всі відрізняються певними процесами, але суть у всіх однакова – вилучити метали за допомогою реагентів.

Завдяки тому, що цей метод має високий відсоток ефективності, він є

економічно вигідним для підприємців. Також він є більш сприятливим для навколишнього середовища, через низький рівень забруднення, а при вдало побудованому процесі він може одним із найефективнішим методом переробки як у економічному плані, так і екологічному.

Використовуючи формулу 1.3 можна отримати прогнозовані результати вилучених матеріалів, які записані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Прогнозована кількість вилучених металів з відпрацьованих LiB гідрометалургійним методом

Назва речовини	Прогнозована к-сть вилучених металів на 2025, т	Прогнозована к-сть вилучених металів на 2026, т	Прогнозована к-сть вилучених металів на 2027, т
Кобальт (Co)	35,984-143,936	53,584-214,336	151,812-607,812
Нікель (Ni)	35,984-71,968	53,584-107,168	151,812-303,624
Мідь (Cu)	21,5904-71,968	33,5904-107,168	91,08-303,624
Літій (Li)	35,984-50,3776	53,584-75,0176	151,812-212,536
Алюміній (Al)	71,968-35,984	10,7168-53,584	30,3624-151,812
<b>Разом:</b>	201,5104-374,2336	205,0592-557,2736	576,8784-1 579,408

За результатами розрахунків виходить, що вже з 2025 року можна вилучати від 200 тон цінних металів на рік, а через декілька років ця цифра зросте у приблизно 2,5 рази при мінімальному відсотковому вилученні. Однак за ефективним процесом ці цифри можуть значно зрости.

За даними сайту [finance.ua](http://finance.ua) [50], станом на початок 2024 року, в Україні зареєстровано 91 тис. легкових електромобілів. Цифра стрімко зростає і частина з них вже були вживані, а отже термін роботи їх буде значно менше, відповідно – потребуватимуть правильних методів утилізації.

Переробка відпрацьованих літій-іонних батарей є важливою та терміною з багатьох причин. Відповідно до законодавства Європейського Союзу, ефективність переробки LiB має досягти мінімум 50% до 2030 року. Щоб краще розвинути техніку переробки LiB, слід взяти до уваги наступні



аспекти:

- LiB потрібно сортувати та класифікувати на основі типу електрода, що може підвищити ефективність процесу переробки;
- Конструкція літій-іонних батарей повинна бути сприятливою для переробки;
- Інтеграція різних процесів може знадобитися для досягнення кращої процедури переробки, оскільки кожен процес має свої плюси та мінуси;
- Законодавство та нормативні акти повинні бути прийняті в усьому світі для стандартизації процесу переробки LiB.

## ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день, ринок електромобілів стрімко зростає та розвивається. Підприємці відкривають нові заводи по їх виробництву та пропонують нові моделі авто, незважаючи на категорії (легкові, вантажівки, автобуси). Відповідно, відбувається стрімке відмовлення споживачів від звичайних авто на більш сучасні та екологічні.

Однак через високу кількість відпрацьованих акумуляторів, ця сфера розвитку може стати проблемою в найближчі роки, адже їх потрібно буде утилізувати без шкоди для навколишнього середовища. Саме тому дана робота спрямована більш детально розглянути процеси виробництва, експлуатації та утилізації літій-іонних батарей, аби попередити можливі ризики та удосконалити існуючу систему в даній області. Тож було виявлено наступні фактори:

1. Розвиток електромобілів бере початок з 20 сторіччя та набрав популярності лише з 2000х років, коли ємність літій-іонних акумуляторів почала збільшуватись.

2. Видобуток літію для LiB є надзвичайно травмуючим для природного середовища, адже потребує знищення та розчищення екосистеми, а також надмірної кількості води. Такі метали як нікель і кобальт є згубними для людини та природи через свої хімічні властивості під час видобутку. Ці метали є досить дорогими; очікується, що попит на них зросте до 2040 р., отже потрібні альтернативні методи видобутку.

3. За деякими прогнозами, до 2040 р., у світі буде налічуватись приблизно 8 млн тон відпрацьованих акумуляторів. По Україні точних цифр поки немає, однак на 2027 рік прогнозується приблизно 6094,5 тон відпрацьованих LiB.

4. Кожний такий акумулятор має в собі ціні метали такі як: кобальт, нікель, алюміній, літій та мідь, - відсоток яких може відрізнятись. Таким чином, частка цінних металів на 2025 рік становитиме від 251,888 до 467,792

тон, на 2026 рік – від 256,234 до 696,592 тон, на 2027 рік – від 721,098 до 1 973,555 тон.

5. Наразі не існує точної індустрії чи законодавства переробки LiB, приватні підприємці займаються цим самостійно. Існує дуже мала частка заводів з переробки літій-іонних акумуляторів з невеликою потужністю на рік, порівняно з попитом та існуючими авто.

6. Найбільш вдалий метод переробки LiB – гідрометалургія, проте вона також має свої мінуси, наприклад: забруднення стічними водами, велику витрату хімічних реагентів та тривалий процес відновлення. Незважаючи на це, цей метод можна вважати найефективнішим, при вдало влаштованому процесі переробки.

7. Використовуючи гідрометалургійний метод, можна вилучити від 80% цінних металів. Вже на 2025 рік ці цифри можуть складати від 201,5104 до 374,2336 тон, на 2026 рік – від 205,0592 до 557,2736 тон, на 2027 рік – від 576,8784 до 1 579,408 тон.

8. В Україні, на жаль, не розвинена система збору та переробки будь-яких електричних акумуляторів на законодавчому рівні. Цим займається приватна компанія, за допомогою небайдужих громадян. Наразі вони відправляють на переробку лише незначну долю відпрацьованих джерел струму на завод з переробки в Німеччину. А через високу корумпованість країни, іноземні інвестори не мають бажання працювати з нами в цій сфері. Отже, проблему потрібно вирішувати, експортуючи відпрацьовані LiB в інші країни.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The History of the Electric Car. URL: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> - Загол. з екрану.
2. An electrifying Iowan: William Morrison, pioneer of battery technology and automobiles. URL: <https://iowahistoryjournal.com/an-electrifying-iowan/> - Загол. з екрану.
3. History of the electric car[2023 update] .URL: <https://blog.evbox.com/electric-cars-history#First-electric-cars>. - Загол. з екрану.
4. 38% Of American Cars Were Electric In 1900. URL: <https://cleantechnica.com/2018/02/25/38-percent-american-cars-electric-1900/>
5. «Смердюча таратайка» - 125 років тому Карл Бенц запатентував перший автомобіль. URL: <https://www.dw.com/uk> - Загол. з екрану.
6. First Texas Oil Boom. URL: <https://aoghs.org/petroleum-pioneers/texas-oil-boom-in-corsicana/> - Загол. з екрану.
7. How Tesla emerged from the brink of bankruptcy to become America's coolest car company. URL: <https://www.businessinsider.nl/most-important-moments-tesla-history-2017-2?international=true&r=US> - Загол. з екрану.
8. Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. URL: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> - Загол. з екрану.
9. The price of batteries has declined by 97% in the last three decades. URL: <https://ourworldindata.org/battery-price-decline> - Загол. з екрану.
10. Типи електромобілів і принципи роботи. URL: <https://www.omazaki.co.id/en/types-of-electric-cars-and-working-principles/> - Загол. з екрану.
11. Electric car components and functions. URL: <https://www.omazaki.co.id/en/electric-vehicle-components/> - Загол. з екрану.
12. Конструкція електродвигуна: як влаштована «зелена машина». URL:

<https://go-tou.com/ua/news/electric-car-design-how-do-electric-cars-work> - Загол. з екрану.

13. Всередині електромобілів: технологія, що стоїть за революцією. <https://www.techiexpert.com/inside-electric-cars-the-technology-behind-the-revolution/> - Загол. з екрану.

14. Матеріали для літєвих батарей. URL: <https://nanografi.com/battery-materials/lithium-battery-materials/#> - Загол. з екрану.

15. Supply Chain and Raw Materials for Growing Battery Production. URL: <https://www.influitenergy.com/post/supply-chain-and-raw-materials-for-growing-battery-production> - Загол. з екрану.

16. Як виготовляються акумулятори? URL: <https://www.products.pcc.eu/uk/blog/> - Загол. з екрану.

17. Lithium Battery Manufacturing Process. URL: <https://harveypoweress.com/lithium-battery-manufacturing-process/> - Загол. з екрану.

18. Шкідливий вплив наших літєвих батарей. URL: <https://greenly.earth/en-us/blog/ecology-news/the-harmful-effects-of-our-lithium-batteries> - Загол. з екрану.

19. На фото: літєві родовища Південної Америки розкривають темну сторону нашого електричного майбутнього/ URL: <https://www.euronews.com/green/2022/02/01/south-america-s-lithium-fields-reveal-the-dark-side-of-our-electric-future> - Загол. з екрану.

20. The Environmental Impacts of Cobalt Mining in Congo. URL: <https://earth.org/cobalt-mining-in-congo/> - Загол. з екрану.

21. Чи є літій-іонний акумулятор ідеальним? URL: <https://batteryuniversity.com/article/is-lithium-ion-the-ideal-battery> - Загол. з екрану.

22. 10 причин, чому літій-іонні акумулятори кращі за свинцево-кислотні. URL: <https://cmbatteries.com/uk/> - Загол. з екрану.

23. Вплив літій-іонних батарей на навколишнє середовище. URL:

<https://ul.org/research/electrochemical-safety/getting-started-electrochemical-safety/environmental-impacts> - Загол. з екрану.

24. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>

25. Revealed: how US transition to electric cars threatens environmental havoc. URL: <https://www.theguardian.com/us-news/2023/jan/24/us-electric-vehicles-lithium-consequences-research>. - Загол. з екрану.

26. Поводження з використаними літій-іонними батареями в Китаї. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2859/2668> - Загол. з екрану.

27. Progress and prospect on the recycling of spent lithium-ion batteries: Ending is beginning. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cnl2.31> - Загол. з екрану.

28. У січні електрокари вже зайняли 18% українського ринку нових авто. URL: <https://autoconsulting.ua/article.php?sid=53204> - Загол. з екрану.

29. Recovery of Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Using Ionic Liquid <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620319092> - Загол. з екрану.

30. Recovery of metals from spent lithium-ion batteries using organic acids. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X18309642> - Загол. з екрану.

31. Lithium ion battery recycling. URL: [https://www.cas.org-LIB\\_Recycling-White-Paper.pdf](https://www.cas.org-LIB_Recycling-White-Paper.pdf)- Загол. з екрану.

32. Recovery and Recycling of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review and Analysis. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1365>- Загол. з екрану.

33. Recovery and Recycling of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review and Analysis. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1365>- Загол. з екрану.

34. Директива 2000/53/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 18 вересня 2000 р. про транспортні засоби, що вийшли з експлуатації. **2000** , 269 , 22.

35. Європейський парламент і Рада Європейського Союзу. *Директива 2006/66/ЄС про батареї та акумулятори та використанні батареї та акумулятори* ; Європейський Парламент і Рада Європейського Союзу: Брюссель, Бельгія, 2006.

36. Європейський парламент і Рада Європейського Союзу. *Директива 2000/53/ЄС про вичерпані транспортні засоби* ; Європейський Парламент і Рада Європейського Союзу: Брюссель, Бельгія, 2000. URL: <https://trid.trb.org/View/2213676> - Загол. з екрану.

37. Переробка свинцево-кислотних батарей у двадцять першому столітті. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.171368>

38. Положення про відпрацьовані батареї та акумулятори (поправка). URL: <http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2015/1935> - Загол. з екрану.

39. Biological leaching of heavy metals from a contaminated soil by *Aspergillus niger*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408019481> - Загол. з екрану.

40. Mechanochemical Process Enhanced Cobalt and Lithium Recycling from Wasted Lithium-Ion Batteries. URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.6b02337> - Загол. з екрану.

41. Біовилуговування цінних металів Li, Co, Ni та Mn з відпрацьованих літій-іонних акумуляторів електромобілів з метою відновлення. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616000056> - Загол. з екрану.

42. Огляд тенденцій ринку акумуляторів, повторного використання та переробки акумуляторів. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4079/2/1/11> - Загол. з екрану.

43. Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A

comprehensive review. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775321001671/> -

Загол. з екрану.

44. A Comprehensive Review of Lithium-Ion Battery (LiB) Recycling Technologies and Industrial Market Trend Insights. URL:  
<https://www.mdpi.com/2313-4321/9/1/9> - Загол. з екрану.

45 Огляд переробки відпрацьованих літій-іонних батарей. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723010089?via%3Dihub#tbl6> - Загол. з екрану.

46. Міні-огляд переробки металу з відпрацьованих літій-іонних батарей. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917308226> -  
Загол. з екрану.

47. A review on recycling of spent lithium-ion batteries. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723010089?via%3Dihub#b44> - Загол. з екрану.

48. Дослідження 8 заводів з переробки батарейок у Європі. URL:  
<https://batareiky.ua/post/doslidzhennya-8-zavodiv-z-pererobki-batareyok-u-ievropi>  
- Загол. з екрану.

49. Чому переробка батарейок зараз недоцільна в Україні? URL:  
<https://batareiky.ua/post/chomu-pererobka-batareyok-zaraz-nemozhлива-v-ukrayini>  
- Загол. з екрану.

50. В Україні підраховали кількість електромобілів. URL:  
<https://news.finance.ua/ua/v-ukraini-pidrahuvaly-kil-kist-elektromobiliv> - Загол. з екрану.

51. Safe Handling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. URL:  
<https://insurance.archgroup.com/safe-handling-of-lithium-ion-batteries-for-electric-vehicles/> - Загол. з екрану.

52. Питання безпеки при поводженні з літій-іонними батареями, що вичерпалися. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9749076/> -  
Загол. з екрану.



53. OHS Guidelines and Industry Supported Safe Work Practices for EVs.

URL: <https://www.ohs.ara.bc.ca/OHS-Guidelines-EVs/OHS-Guidelines-and-Industry-Supported-Safe-Work-Practices-for-EV> - Загол. з екрану.