

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ БАТАРЕЯМИ В УКРАЇНІ»

Виконав: студент групи ТЗД-216
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» червня Томчук М. М.
(прізвище та ініціали)

Керівник: завідувач кафедри ЕХТЗД, к.т.н., доцент

«10» червня Іщенко В. А.
(прізвище та ініціали)

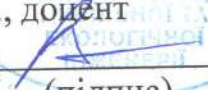
Рецензент: д.х.н., проф. Ранський А. П.

«10» червня 2025р.
(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., Іщенко В. А.
(прізвище та ініціали)
«10» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Галузь знань 18 – Виробництво та технології
Спеціальність 183 – «Технології захисту навколишнього середовища»
Освітньо-професійна програма – Інженерна екологія та ресурсозберігаючі технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доцент

В.А. Іщенко
(підпис)
« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студенту

Томчук Михайло Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З
ВІДПРАЦЬОВАНИМИ БАТАРЕЯМИ В УКРАЇНІ»

керівник роботи Іщенко Віталій Анатолійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи

Склад типової кнопкової батареї (табл. 1.1)

4. Зміст текстової частини

1. Типи батарейок
2. Основи переробки відпрацьованих літій-іонних батарей
3. Екологічні та економічні аспекти переробки літій-іонних батарей
4. Основні технології переробки лужних і сольових батарей

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Типи побутових батарей та їх склад
2. Типи побутових батарей та їх склад
3. Масовий вміст ключових металів у літій-іонній батареї

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 25 » березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітки
		початок	закінчення	
1	Пошук типів батарейок	17.03.2025	01.04.2025	Викон
2	Основи переробки відпрацьованих літій-іонних батарей	01.04.2025	25.04.2025	Викон
3	Екологічні та економічні аспекти переробки літій-іонних батарей	28.04.2025	09.05.2025	Викон
4	Основні технології переробки лужних і сольових	12.05.2025	19.05.2025	Викон
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	19.05.2025	23.05.2025	Викон
6	Підготовка презентації та доповіді на захист БДР	26.05.2025	10.06.2025	Викон

Студент Томчук М. М.
(підпис)

Томчук М. М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи Іщенко В. А.
(підпис)

Іщенко В. А.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота складається з 74 сторінок формату А4, на яких є 12 рисунків, 8 таблиць, список використаних джерел містить 38 найменувань.

Мета роботи – проаналізувати типи і склад побутових батарей, дослідити основні аспекти їх утилізації, виявити потенційні екологічні загрози та запропонувати шляхи їх мінімізації.

Бакалаврська кваліфікаційна робота зосереджена на аналізі хімічного складу батарей, екологічних ризиків їх накопичення та порушень, які вони спричиняють у разі неналежного поводження. Розглянуто основні методи переробки – механічне подрібнення, гідрометалургію та пірометалургію, а також їх комбінації. Проведено порівняльну характеристику технологій переробки, оцінено їхню ефективність, енерговитрати та екологічні наслідки. Особливу увагу приділено викликам, пов'язаним з упровадженням таких технологій в умовах України та воєнного часу.

Ключові слова: відпрацьовані батареї, переробка, утилізація, гідрометалургія, пірометалургія, екологічна безпека, вторинна сировина.

ABSTRACT

The bachelor thesis consists of 74 pages of A4 format, on which there are 12 figures, 8 tables, the list of used sources contains 38 names.

The aim of this thesis is to analyze the types and composition of household batteries, study the main aspects of their disposal, identify potential environmental threats and suggest ways to minimize them.

The bachelor's qualification work is focused on analyzing the chemical composition of batteries, the environmental risks associated with their accumulation, and the ecological disturbances caused by improper handling. The study examines key recycling methods – mechanical shredding, hydrometallurgy, and pyrometallurgy – as well as their combined applications. A comparative analysis of these technologies is provided, assessing their efficiency, energy consumption, and environmental impact. Special attention is given to the challenges of implementing such technologies in the context of Ukraine and under conditions of wartime.

Keywords: waste battery, recycling, disposal, hydrometallurgy, pyrometallurgy, environmental safety, secondary raw materials.

ВІДГУК

наукового керівника на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента денної форми навчання групи ТЗД – 216 Томчука Михайла Миколайовича “Екологічна безпека поводження з відпрацьованими батареями в Україні”

У зв'язку із повсюдним використанням джерел живлення у побуті та неналежним поводженням із відпрацьованими батареями довкілля України зазнає значного впливу. Відпрацьовані батареї переважно накопичуються на сміттєзвалищах, що викликає великі екологічні ризики, якщо вони не будуються та експлуатуються відповідно до сучасних екологічних вимог. Тому дослідження поводження з відпрацьованими батареями є надзвичайно актуальною задачею.

Робота містить ретельний аналіз основних типів батарей, які використовуються у побуті, їх складу та потенційного впливу на довкілля. Окремо проаналізовано екологічні аспекти переробки літій-іонних батарей, порівняні різні методи їх утилізації. Крім того, запропонована вдосконалена комплексна технологія переробки лужних і сольових батарей, яка передбачає повне використання всіх продуктів переробки.

Томчук М.М. вчасно і повністю виконав всі поставлені завдання, характеризується виключно з позитивного боку. В цілому бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має значну практичну цінність. Тому рекомендую оцінити роботу на оцінку «А».

Керівник роботи,

зав. каф. ЕХТЗД, к.т.н., доцент



Віталій ІЩЕНКО

РЕЦЕНЗІЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента денної форми навчання 4 курсу із спеціальності 183 "Технології захисту навколишнього середовища" Томчука Михайла Миколайовича на тему: "Екологічна безпека поводження з відпрацьованими батареями в Україні"

Актуальність роботи не викликає сумнівів, оскільки проблема накопичення та неправильного поводження з батареями є однією з найгостріших екологічних загроз сучасності. Особливо актуально це питання постає для України, де існує нестача централізованої інфраструктури збору та переробки батарей.

У роботі розглянуто широкий спектр типів батарейок (кнопкових, лужних, цинкових, літієвих), їх хімічний склад, принципи роботи та екологічну небезпеку при неналежній утилізації. Особливу увагу приділено переробці літій-іонних батарей, які набули широкого поширення у зв'язку з розвитком електротранспорту та мобільної техніки.

У розділах детально описані методи переробки – гідрометалургійні, пірометалургійні та пряме відновлення, їх екологічне навантаження та економічна доцільність. Також у роботі проаналізовано технології утилізації лужних та сольових ХДС, що надає роботі комплексного характеру.

Висновки відповідають поставленій меті, підтверджуються фактичними даними, текст структурований, використано актуальні літературні джерела.

Недоліком роботи є те, що недостатньо приділено уваги організаційним аспектам створення системи роздільного збору батарей в умовах України (наприклад, моделі "розширеної відповідальності виробника", досвід країн ЄС), що могло б поглибити практичну складову.

Бакалаврська кваліфікаційна в цілому виконана на високому рівні заслуговує оцінку «А».

Рецензент

д.х.н., проф.

Анатолій РАНСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТИПИ БАТАРЕЙОК.....	10
1.1 Кнопкові батарейки	10
1.2 Акумуляторні батарейки	12
1.3 Лужні батарейки	21
1.4 Цинкові батарейки.....	26
1.5 Вплив відпрацьованих батарейок на довкілля.....	30
1.6 Нормативно-правова база поводження з батареями в Україні та ЄС...	37
2 ОСНОВИ ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ..	39
2.1 Актуальність утилізації літій-іонних батарей	Error! Bookmark not defined.
2.2 Склад літій-іонних батарей як вторинної сировини	41
2.3 Основні методи переробки літій-іонних батарей	43
3 ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПЕРЕРОБКИ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ.....	45
3.1 Екологічні загрози при неналежному поводженні з відпрацьованими батареями	Error! Bookmark not defined.
3.2 Порівняння екологічного навантаження різних методів переробки.....	50
3.3 Економічна доцільність та рентабельність переробки	54
4 ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЛУЖНИХ І СОЛЬОВИХ ХДС	58
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68
ДОДАТОК А.....	72
ДОДАТОК Б	73
ДОДАТОК В	74
ДОДАТОК Г	75
ДОДАТОК Д.....	76

ВСТУП

У сучасному світі проблема утилізації відходів стає все більш актуальною, особливо з огляду на швидкий розвиток технологій і зростання кількості споживчих товарів. Серед різноманітних відходів особливе місце займають батарейки, які широко використовуються в побутових та промислових приладах. Вони містять у своєму складі токсичні метали, такі як кадмій, ртуть, свинець, а також інші шкідливі речовини, що становлять потенційну загрозу для довкілля та здоров'я людини. Неправильна утилізація батарейок може призводити до забруднення ґрунтів, води й повітря, порушення екологічного балансу, а також до накопичення шкідливих речовин у харчовому ланцюзі.

Актуальність теми полягає в необхідності розробки ефективних і безпечних методів збору, транспортування, переробки та утилізації батарейок з урахуванням екологічних ризиків. Впровадження таких заходів є важливим елементом забезпечення сталого розвитку, охорони довкілля та виконання міжнародних зобов'язань у сфері поводження з небезпечними відходами.

Мета даної роботи – проаналізувати типи і склад побутових батарей, дослідити основні аспекти їх утилізації, виявити потенційні екологічні загрози та запропонувати шляхи їх мінімізації. Завдання роботи включають аналіз впливу використаних батарейок на довкілля, оцінку існуючих технологій утилізації, а також розробку рекомендацій щодо підвищення ефективності екологічно безпечних заходів у цій сфері.

Виконання даного дослідження сприятиме глибшому розумінню проблеми та формуванню практичних рішень, що можуть бути впроваджені на національному та міжнародному рівнях.

1 ТИПИ БАТАРЕЙОК

1.1 Опис характеристик і типів батарейок

Батарейки є одними з найпоширеніших джерел електроенергії, що використовуються для живлення різноманітних пристроїв, таких як годинники, пульти дистанційного керування, дитячі іграшки, медичне обладнання, мобільні телефони, ноутбуки та навіть електромобілі. Їх популярність обумовлена компактністю, мобільністю та здатністю забезпечувати тривалу роботу пристроїв без потреби в підключенні до мережі електроживлення. Залежно від функціональних особливостей і складу батарейки поділяються на два основні типи: одноразові та акумуляторні. Одноразові батарейки (первинні джерела живлення) призначені для одноразового використання. Після розрядки вони не підлягають повторному заряду і повинні бути утилізовані. Основними видами одноразових батарейок є: Лужні (алкалінові): найпоширеніший тип батарейок, що містять оксид марганцю як катод і цинк як анод. Вони мають високу енергоефективність і довгий термін зберігання. Сольові: дешевші, але менш ефективні, ніж лужні батарейки. Їх зазвичай використовують у пристроях із низьким енергоспоживанням. Літій-іонні одноразові батарейки: відомі своєю тривалою роботою та високою енергоємністю. Використовуються в спеціалізованих пристроях, наприклад, камерах або сенсорах. Акумуляторні батарейки (вторинні джерела живлення) мають здатність багаторазово заряджатися, що робить їх економічно та екологічно вигіднішими. Основні типи акумуляторних батарейок:

Літій-іонні (Li-ion): використовуються в смартфонах, ноутбуках і електромобілях. Вони характеризуються високою енергоємністю, низькою вагою та тривалим терміном служби.

Нікель-кадмієві (Ni-Cd): відзначаються тривалим терміном служби, але містять токсичний кадмій, що створює значні екологічні проблеми при утилізації.

Нікель-металогідридні (Ni-MH): є вдосконаленою версією Ni-Cd, оскільки не містять кадмію, але мають менший термін служби.

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4): новіші акумулятори, які відзначаються високим рівнем безпеки й тривалим терміном служби, що робить їх перспективними для широкого використання.

Основними критеріями вибору батарейок є: Ємність і потужність: визначають, наскільки довго батарейка здатна підтримувати роботу пристрою.

Напруга: різні пристрої потребують різного рівня напруги. Наприклад, стандартні лужні батарейки забезпечують 1,5 В, а літій-іонні – 3,6 В. Розмір і форма: стандартизовані форми, такі як AA, AAA, C, D, забезпечують сумісність із великою кількістю пристроїв



Рисунок 1.1 – Розміри батарейок

Екологічність: вплив на довкілля залежить від використаних матеріалів і токсичності компонентів. Наприклад, літій-іонні батарейки є менш шкідливими порівняно з нікель-кадмієвими.

Неправильний вибір батарейок може спричинити не лише фінансові витрати, але й негативний вплив на екологію. Наприклад, одноразові батарейки часто утилізуються неналежним чином, що створює ризик забруднення довкілля токсичними речовинами. З іншого боку, використання акумуляторів із можливістю

багаторазового заряду зменшує обсяг відходів і сприяє раціональному використанню ресурсів.

Таким чином, розуміння характеристик і типів батарейок є важливим для їх раціонального використання, правильної утилізації та мінімізації негативного впливу на довкілля [1, 2].

1.2 Кнопкові батарейки

Кнопкові батарейки (первинні) – це мініатюрні джерела струму у формі диска, призначені для живлення компактних пристроїв: годинників, слухових апаратів, лазерних указок, калькуляторів тощо (рис. 1.1) Вони одноразові, тобто не підлягають перезарядженню. Основні особливості: Компактність та низька маса. Хімічні системи: лужні (цинк–марганцеві), срібно-оксидні, літій-іонні. Стабільна напруга протягом більшої частини терміну служби. Висока герметичність для зберігання електроліту. Слабка робота в умовах сильного струмового навантаження. У деяких моделях тривалий термін зберігання (до 10 років).



Рисунок 1.2 – Первинні кнопкові батарейки типу CR2032

Батарейка AG13, також відома як LR44, є широко використовуваною кнопковою батарейкою, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 11,6 мм
- Висота: 5,4 мм

- Вага: приблизно 1,75 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 130–155 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

Таблиця 1.1 – Склад батарейки AG13

Компонент	Склад	Орієнтовний вміст (масова частка)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	32-34%
Анод	Цинк (Zn), найчастіше у порошкоподібному стані	10-12%
Електроліт	Розчин гідроксиду калію (KOH), іноді з NaOH	10-14%
Розчинник/вода	Потрібна для дисоціації та транспорту іонів	8-14%
Сепаратор	Мікропориста полімерна або целюлозна мембрана	3-8%
Корпус	Зовнішній сталевий циліндр із нікелюванням	15-20%

Принцип роботи:



Рух електронів через зовнішній ланцюг забезпечує електричний струм, а іони переміщуються через електроліт.

У порівнянні з аналогічними срібно-оксидними батарейками (SR44), AG13 має нижчу стабільність напруги, але є значно дешевшою.

Використання KOH як електроліту забезпечує більшу струмовіддачу порівняно з NaOH.

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Електроліт з гідроксиду калію забезпечує іонну провідність між електродами. Існують також срібно-оксидні версії батарейок цього розміру (позначаються як SR44 або 357), які мають схожі фізичні розміри, але відрізняються хімічним складом і характеристиками.

Батарейка 389, також відома як SR1130W або SR54, є кнопковою первинною батарейкою, що належить до типу срібно-оксидних (Silver Oxide).

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 11,6 мм
- Висота: 3,1 мм
- Вага: близько 1,25 г

Основні складові:

- Катод (позитивний електрод): Оксид срібла (Ag_2O), 40–50%
- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn), 10–15%
- Електроліт: Лужний – зазвичай водний розчин гідроксиду калію (KOH) або гідроксиду натрію (NaOH), залежно від виробника, 8–12%.

Інші компоненти: пластикова ізоляція, сталева оболонка, ущільнювач із тефлону або синтетичного каучуку

При розряді цинковий анод окислюється, утворюючи іони цинку та електрони, оксид срібла відновлюється, приймаючи електрони, лужний електроліт проводить іони між електродами. Цей тип забезпечує стабільний рівень напруги протягом усього циклу роботи – особливо важливо для годинникових механізмів і точних сенсорів.

Батарейка 389 має "W" або "SW" маркування:

- W (High Drain): Для пристроїв з вищим струмом споживання
- SW (Low Drain): Для пристроїв із тривалим, але повільним енергоспоживанням

Альтернативні позначення: SR1130W, SR54, D389, V389

Батарейка LR626, також відома як AG4, є популярною лужною кнопковою батарейкою, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 6,8 мм
- Висота: 2,6 мм
- Вага: приблизно 0,36 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 15–18 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

LR626 є лужною батарейкою з такими основними хімічними компонентами (табл. 1.2):

Таблиця 1.2 – Склад батарейки AG4

Компонент	Склад	Орієнтовний вміст (масова частка)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	30-34%
Анод	Цинк (Zn), найчастіше як гель або порошок	10-12%
Електроліт	Водний розчин гідроксиду калію (KOH)	10-14%
Розчинник/вода	Сприяє дисоціації в електроліті	8-14%
Сепаратор	Мікропористий полімер або целюлоза	3-8%
Корпус	Нікельований сталевий контейнер	15-20%

Принцип роботи:



Електрони, що проходять через зовнішній ланцюг, створюють електричний струм, тоді як іони гідроксиду мігрують у зворотному напрямку. Через малий об'єм і

обмежену кількість активних речовин, має обмежену ємність. Висока стабільність напруги в умовах невеликого навантаження.

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Варіації та еквівалентні позначення: LR626 має кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: AG4, LR66, 177, 376, 377.

Батареяка LR1130, також відома як AG10, є лужною кнопковою батареєю, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 11,6 мм
- Висота: 3,1 мм
- Вага: приблизно 1,1 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 50–80 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

LR1130 є лужною батареєю з такими основними хімічними компонентами:

- Катод (позитивний електрод): Діоксид марганцю (MnO_2), ~30–35%
- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn), ~10–12%
- Електроліт: Водний розчин гідроксиду калію (KOH), ~10%
- Вода: ~8–12%
- Інші елементи корпусу (сталі, нікельовані покриття): до 30%.

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Також, LR1130 має кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: AG10, 189, LR54, V10GA, G10A.

Батареяка CR2016 є літійовою кнопковою батареєю, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 20 мм
 - Висота: 1,6 мм
 - Вага: приблизно 1,8 г
 - Номінальна напруга: 3,0 В
 - Ємність: від 75 до 100 мА·год (залежно від виробника та умов використання)
- CR2016 є літієвою батареєю з такими основними хімічними компонентами:
- Катод (позитивний електрод): Діоксид марганцю (MnO_2)
 - Анод (негативний електрод): Літій (Li)
 - Електроліт: Органічний електроліт на основі літію

Під час розряду літієвий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Також, CR2016 має кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: DL2016, ECR2016, BR2016 (версія з полікарбонатним фторидним катодом).

Батарея SR2032 є срібно-оксидною кнопковою батареєю, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 20,0 мм
- Висота: 3,2 мм
- Вага: приблизно 3,0 г
- Номінальна напруга: 1,55 В
- Ємність: близько 200–240 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

Хімічний склад та компоненти:

- Катод (позитивний електрод): Оксид срібла (Ag_2O)
- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn)
- Електроліт: Лужний розчин, зазвичай гідроксид натрію (NaOH) або гідроксид калію (KOH)

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де оксид срібла відновлюється до металевого срібла. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Також, SR2032 може мати кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: 280-208, SB-T51.

Батарейка L736, також відома як LR41 або AG3, є популярною лужною кнопковою батарейкою, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 7,9 мм
- Висота: 3,6 мм
- Вага: приблизно 0,6 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 43 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Також, L736 може мати кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: LR41, AG3, 192, G3A, V3GA, GP192, L736C.

Таблиця 1.3 – Склад батарейки AG3

Компонент	Склад	Орієнтовний вміст (масова частка)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	30-33%
Анод	Цинк (Zn)	10-12%
Електроліт	Гідроксид калію (KOH)	10-13%
Вода (H_2O)	Розчинник у складі електроліту	8-14%
Сепаратор	Мікропористий полімер (поліпропілен)	3-8%
Корпус	Нікельована сталь	15-20%

Принцип роботи:



Електрони, що генеруються внаслідок окиснення цинку, проходять зовнішнім колом, утворюючи електричний струм, а KOH забезпечує внутрішню іонну провідність.

Поширена в недорогих одноразових пристроях. Порівняно швидко розряджається при високому струмі навантаження. Може мати срібно-оксидну версію (SR41), яка забезпечує стабільнішу напругу.

Батарейка LR1616, також відома як CR1616, є лужною (алкаліною) кнопковою батарейкою, що належить до первинних (незаряджуваних) елементів живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 16 мм
- Висота: 1,6 мм
- Вага: приблизно 1,1 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 50 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

LR1616 є лужною батарейкою з такими основними хімічними компонентами:

- Катод (позитивний електрод): Діоксид марганцю (MnO_2)
- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn)
- Електроліт: Водний розчин гідроксиду калію (KOH) або гідроксиду натрію (NaOH)

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами.

Також, LR1616 може мати кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: CR1616 (Літій-іонна версія з номінальною напругою 3,0 В), DL1616 (Аналог CR1616 від деяких виробників).

Батарейка G12-A, також відома як LR43, AG12, LR1142, є широко використовуваним лужним (алкаліновим) кнопковим елементом живлення.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 11,6 мм
- Висота: 4,2 мм
- Вага: приблизно 1,5 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: близько 80–108 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

G12-A є лужною батарейкою з такими основними хімічними компонентами:

- Катод (позитивний електрод): Діоксид марганцю (MnO_2)
- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn)
- Електроліт: Водний розчин гідроксиду калію (KOH) або гідроксиду натрію (NaOH)

Під час розряду цинковий анод окислюється, віддаючи електрони, які проходять через зовнішній ланцюг до катода, де діоксид марганцю відновлюється. Лужний електроліт забезпечує іонну провідність між електродами. Також, батарейка G12-A має кілька альтернативних позначень залежно від стандартів та виробників: LR43 (Стандартне позначення за IEC), AG12 (Альтернативне позначення), LR1142 (Інше позначення тієї ж батарейки), 386A (Позначення за деякими виробниками), V12GA (Комерційне позначення).

Батарейка LR621 є лужним кнопковим первинним джерелом живлення. Вона є однією з найменших стандартних кнопкових батарей.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: 6,8 мм
- Висота: 2,1 мм
- Вага: ~0,25 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: приблизно 12–15 мА·год (може відрізнятися залежно від виробника)

LR621 – це лужна батарейка, яка має типову конструкцію з такими хімічними складовими:

- Анод (негативний електрод): цинк (Zn), зазвичай у порошкоподібній формі, ~10–12%
- Катод (позитивний електрод): діоксид марганцю (MnO_2), ~30–35%.
- Електроліт: водний розчин гідроксиду калію (KOH) або гідроксиду натрію (NaOH), ~8–12%.
- Інші компоненти (оболонка з нержавіючої сталі, ізолятори, ущільнення): ~35–45%

Коли батарея розряджається цинк окислюється на аноді, утворюючи іони цинку і вивільняючи електрони. Діоксид марганцю на катоді приймає електрони і відновлюється. Гідроксид калію або натрію забезпечує іонну провідність між електродами. Також, LR621 має сумісні, еквівалентні позначення: AG1, 164, G1A, L621, LR60, V364 (залежить від виробника), SR621 або 364 – срібно-оксидна альтернатива тієї ж форми, з кращими характеристиками стабільності.

1.2 Акумуляторні батарейки

Акумуляторні батарейки – це перезаряджувані джерела живлення, які використовуються у великому спектрі пристроїв: від побутової техніки до електротранспорту (рис. 1.3) Вони значно вигідніші з екологічної та економічної точки зору. Основні особливості: Можливість багаторазового циклу заряд–розряд (сотні або тисячі разів). Різні хімічні склади: нікель-кадмієві (Ni-Cd), нікель-металогідридні (Ni-MH), літій-іонні (Li-ion), літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) тощо. Значно вища ємність і струмова віддача, ніж у первинних. Вимагають контролю заряду (особливо літій-іонні) для безпеки. Згодом деградують, втрачаючи ємність після певної кількості циклів.



Рисунок 1.3 – Акумуляторні батарейки GP 220AAH типу AA

6F22 (форм-фактор "Крона") – це загальне позначення форм-фактора батарейки типу "Крона", яка зазвичай має прямокутну форму з двома контактами зверху. Оригінальною є первинна (неперезаряджувана) версія, але існує й акумуляторна (перезаряджувана), яка використовує хімічні системи Ni-Cd, Ni-MH або Li-ion.

Фізичні характеристики:

- Розмір: $26,5 \times 17,5 \times 48,5$ мм
- Форма: прямокутна (тип "Крона")
- Кількість комірок всередині: 6–7 (залежно від типу хімії)
- Вага: залежить від типу хімії, зазвичай від 30 до 50 г

Хімічний склад (залежно від типу):

- Нікель-кадмієва (Ni-Cd):
- Анод: кадмій (Cd)
- Катод: гідроксид нікелю (NiOOH)
- Електроліт: розчин гідроксиду калію (KOH)

Має обмежений життєвий цикл (~500 циклів), проте добре працює в умовах низьких температур. Схильна до «ефекту пам'яті».

В основі будь-якого акумулятора лежить зворотна хімічна реакція: під час заряджання електрони протікають у протилежному напрямку, відновлюючи початкові речовини на електродах. Електроліт забезпечує іонну провідність, а корпус – механічну цілісність та захист. Також, Акумуляторна батарейка 6F22 має сумісні/альтернативні назви: PP3, MN1604, E-block, 9V Battery (тип).

Ni-MH HR6 (форм-фактор AA) – це стандартне позначення для акумуляторної батарейки формату AA (аналог LR6), яка базується на хімічній системі нікель-металогідрид (Ni-MH). Вона належить до вторинних (перезаряджуваних) джерел живлення і є однією з найпоширеніших в побуті.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: приблизно 14,5 мм
- Висота: приблизно 50,5 мм
- Форма: циліндрична
- Позначення: HR6 (IEC), AA R6 (форм-фактор)

Хімічний склад та компоненти:

- Анод (негативний електрод):
- Пористий металевий сплав (часто на основі LaNi_5 або інших рідкоземельних металів), що абсорбує водень у вигляді металогідриду.
- При розряді гідрид віддає протони (іони водню), що рухаються через електроліт.
- Катод (позитивний електрод):
- Гідроксид нікелю (NiOOH)
- Під час розряду NiOOH відновлюється до Ni(OH)_2
- Електроліт: Водний розчин гідроксиду калію (KOH), іноді в суміші з гідроксидом літію (LiOH) для покращення провідності.
- Корпус: Нікельована сталь служить одночасно й електричним контактом

Принцип роботи при розряді:

На аноді: $\text{MH} \rightarrow \text{M} + \text{H}^+ + \text{e}^-$

На катоді: $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$

Електроліт проводить іони OH^- між електродами. Реакції є зворотними під час заряджання.

Ni-MH HR03 (форм-фактор AAA) – це нікель-металогідридна (Ni-MH) акумуляторна батарея формату AAA. Як і HR6, вона належить до вторинних

(перезаряджуваних) джерел енергії та використовується у пристроях з малим або середнім споживанням струму.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: $\approx 10,5$ мм
- Висота: $\approx 44,5$ мм
- Форма: циліндрична

Хімічний склад:

- Анод (негативний електрод): Металогідридний матеріал, часто на основі сплавів з рідкоземельними елементами (наприклад, LaNi_5 або AB_5 типу сплавів). Акумулює водень у вигляді гідридів під час зарядки
- Катод (позитивний електрод): Гідроксид нікелю (NiOOH), як і в більшості Ni-MH батарейок
- Електроліт: Розчин гідроксиду калію (KOH), іноді доповнений LiOH для стабільності та покращеної провідності
- Сепаратор: мікропориста поліетиленова або поліпропіленова мембрана, яка розділяє електроди та запобігає короткому замиканню
- Корпус: герметичний сталевий циліндр з нікельованим покриттям

Принцип роботи при розряді:

Анод: $\text{MH} \rightarrow \text{M} + \text{H}^+ + \text{e}^-$

Катод: $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$

Електроліт проводить іони OH^- між катодом і анодом. Реакції є повністю оборотними при зарядці.

Ni-Cd AA – це нікель-кадмієва акумуляторна батарейка формату AA. Вона належить до вторинних (перезаряджуваних) джерел струму і використовується в побутових пристроях, особливо у старіших моделях.

Фізичні характеристики:

- Діаметр: $\approx 14,2$ мм
- Висота: ≈ 50 мм
- Форма: циліндрична

Хімічний склад та компоненти:

- Анод (негативний електрод): Кадмій (Cd) у вигляді порошку або спечених пластин. Під час розряду кадмій окислюється до $\text{Cd}(\text{OH})_2$
- Катод (позитивний електрод): Гідроксид нікелю (NiOOH), як у більшості Ni-акумуляторів. При розряді відновлюється до $\text{Ni}(\text{OH})_2$
- Електроліт: Водний розчин гідроксиду калію (KOH), іноді з домішками гідроксиду літію (LiOH) для стабільності.
- Сепаратор: целюлозний або синтетичний мікропористий матеріал
- Корпус: сталевий, зазвичай нікельований, герметичний

Принцип роботи:

Анод: $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$

Катод: $2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$

Гідроксид-іони OH^- циркулюють між електродами. Реакції повністю оборотні при заряджанні. Також, Ni-Cd акумулятори мають добру стабільність напруги та здатність витримувати високі струми, але мають меншу енергоємність порівняно з Ni-MH, ефект пам'яті, токсичність кадмію створює обмеження в екологічних регламентах (наприклад, згідно директиви RoHS).

Батарея Li-ion (літій-іонна) – це перезаряджувані елементи, які забезпечують високу щільність енергії при малій вазі. Вони відзначаються низьким саморозрядом, відсутністю ефекту пам'яті, а також широким діапазоном напруги (в залежності від конструкції).

Фізичні характеристики. Розміри та характеристики сильно варіюються в залежності від форм-фактору (циліндричні, призматичні, pouch-клітини, тощо)

Циліндричний формат 18650:

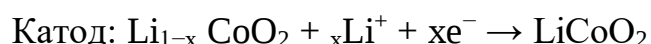
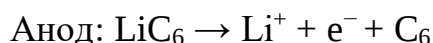
- Діаметр: $\approx 18,6$ мм
- Довжина: $\approx 65,2$ мм
- Вага: ≈ 45 г
- Номінальна напруга: 3,6–3,7 В
- Ємність: 1500–3600 мА·год (і більше)

Хімічний склад залежить від підтипу (LiCoO_2 , NMC, LFP, NCA, LiMn_2O_4 тощо). Типовий склад для LiCoO_2 (літій-кобальт-оксид) батареї, одного з найпоширеніших типів:

- Анод (негативний електрод): Графіт (C) – вуглецева структура, що приймає іони Li^+ під час зарядки.
- Катод (позитивний електрод): Оксид літію-кобальту (LiCoO_2) Або альтернативи – LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiNiMnCoO_2 (NMC), залежно від конструкції.
- Електроліт: Розчин літієвої солі (LiPF_6) у органічному розчиннику (етиленкарбонат + диметилкарбонат)
- Сепаратор: Мікропориста поліетиленова/поліпропіленова мембрана, що відокремлює анод і катод, пропускаючи тільки іони Li^+
- Корпус: Металевий або полімерний, залежно від форм-фактору (наприклад, алюмінієвий корпус для призматичних осередків)

Під час зарядки іони літію Li^+ переміщуються від катода до анода через електроліт і вбудовуються у графітову структуру. Під час розряду іони літію Li^+ виходять з графіту і рухаються назад до катода, створюючи електричний струм.

Хімічні реакції (для LiCoO_2):



1.3 Лужні батареї

Лужні батареї (Alkaline) – це найбільш поширений тип первинних (нерозряджуваних) елементів живлення (рис. 1.4). Вони мають кращу енергоємність і довший термін служби порівняно з цинк-вуглецевими аналогами, особливо при високих навантаженнях. Основними компонентами є діоксид марганцю (катод), цинк (анод) та електроліт на основі гідроксиду калію. Підходять для широкого спектра

пристроїв: від пультів ДК і годинників до іграшок та фотоапаратів. Мають хорошу стабільність при кімнатній температурі та довгий термін зберігання (до 10 років).



Рисунок 1.4 – Лужні батарейки типу АА

LR03 (AAA, лужна) – це первинний (неперезаряджуваний) джерело живлення з високою стабільністю напруги і відносно тривалим терміном зберігання. Вона широко використовується в пристроях із середнім або низьким споживанням струму – пультах дистанційного керування, настінних годинниках, дитячих іграшках, бездротових аксесуарах тощо. Лужні елементи цього типу забезпечують кращу продуктивність порівняно з цинково-вуглецевими аналогами і мають доступну вартість (табл. 1.4).

Фізичні характеристики (типові):

- Типорозмір: AAA (LR03)
- Діаметр: $\approx 10,5$ мм
- Довжина: $\approx 44,5$ мм
- Вага: $\approx 11,5$ г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: 1000 – 1250 мА·год (залежить від виробника та навантаження)

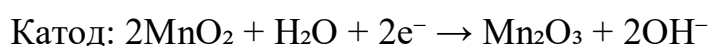
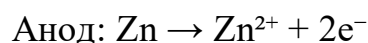
Таблиця 1.4 – Склад типової лужної батарейки LR03

Компонент	Склад	Типовий вміст (маса, %)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	40-45%
Анод	Цинк у вигляді пудри (Zn)	15-20%

Електроліт	Водний розчин гідроксиду калію (KOH)	10-12%
Сепаратор	Мікропористий матеріал (папір, ПВХ)	5-10%
Корпус	Сталевий циліндр	15-30%
Інші елементи	Латунні або сталеві струмовідводи	5-10%

При розряді батарейки анод (цинк) окислюється, віддаючи електрони, які через зовнішній ланцюг рухаються до катода. Там вони відновлюють MnO_2 , спричиняючи вироблення електричного струму. Електроліт KOH виконує роль середовища для переносу гідроксид-іонів OH^- між електродами.

Хімічні реакції (спрощено):



A27 (MN27, лужна) – це компактний первинний (неперезаряджуваний) елемент живлення, спеціально створений для пристроїв, що потребують підвищеної напруги при малій вазі та розмірі. Часто застосовується в брелоках автосигналізацій, бездротових дзвінках, лазерних указках, медичних пультах тощо. Основа батареї – це кілька послідовно з'єднаних лужних мініелементів, що забезпечують високу вихідну напругу 12 В.

Фізичні характеристики (типові):

- Типорозмір: A27 (також відома як MN27, GP27A)
- Діаметр: $\approx 8,0$ мм
- Довжина: $\approx 28,2$ мм
- Вага: $\approx 4,4$ г
- Номінальна напруга: 12 В
- Ємність: 18–22 мА·год (залежно від виробника)

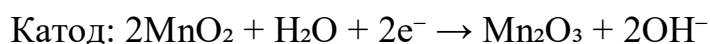
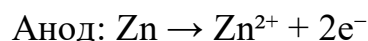
Хімічний склад та конструкція. Батарея A27 складається з 8 мініатюрних елементів LR732 ($\approx 1,5$ В кожен), з'єднаних послідовно всередині циліндричного сталевих корпусу (табл. 1.5). Це дозволяє досягти загальної напруги в 12 В. Кожен мікроелемент має базову лужну хімію з типовим складом:

Таблиця 1.5 – Склад батарейки А27

Компонент	Склад	Типовий вміст (маса, %)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	30-35%
Анод	Цинковий порошок (Zn)	15-18%
Електроліт	Гідроксид калію (KOH)	10%
Сепаратор	Мікропористий целюлозний або полімерний матеріал	3-8%
Корпус	Сталь з латунними струмознімачами	15-20%
Ізолятори	Поліпропілен, ПВХ	5-10%

Кожен мініелемент працює за звичною схемою лужної батареї: при розряді цинк окислюється на аноді, а діоксид марганцю відновлюється на катоді, утворюючи гідроксид цинку та інші вторинні сполуки. Електроліт переносить іони OH^- між електродами.

Хімічні реакції (для одного елемента):



Усі вісім мікроелементів з'єднуються послідовно, підсумовуючи напругу ($8 \times 1,5 \text{ В} = 12 \text{ В}$).

A23 (MN21/23, лужна) – це мініатюрний первинний елемент живлення, який забезпечує високу напругу (12 В) при компактних габаритах. Вона використовується переважно в пристроях із короткочасним, але інтенсивним споживанням струму: бездротових пультах (наприклад, для сигналізацій), лазерних указках, дверних дзвінках, автомобільних брелоках.

Фізичні характеристики (типіві):

- Типорозмір: A23 (також відома як MN21, 23A, V23GA)
- Діаметр: $\approx 10,3 \text{ мм}$
- Довжина: $\approx 28,5 \text{ мм}$
- Вага: $\approx 8 \text{ г}$

- Номінальна напруга: 12 В
- Ємність: 50–60 мА·год (залежно від виробника)

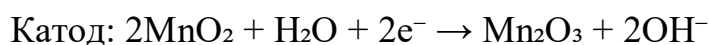
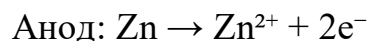
Хімічний склад та конструкція. Конструктивно батарейка складається з восьми послідовно з'єднаних мікроелементів LR932 ($1,5 \text{ В} \times 8 = 12 \text{ В}$), які запаяні всередині сталевих корпусу.

Таблиця 1.6 – Основні компоненти кожного елемента батарейки А23

Компонент	Склад	Типовий вміст (маса, %)
Катод	Діоксид марганцю (MnO_2)	30-35%
Анод	Цинк (Zn), переважно у вигляді порошку	15-20%
Електроліт	Водний розчин гідроксиду калію (KOH)	8-10%
Сепаратор	Целюлозний або полімерний	3-8%
Корпус	Сталь (із зовнішнім нікелюванням), латунь для виводів	15-20%

Принцип роботи. Як і в інших лужних елементах, основа хімічної реакції – окиснення цинку на аноді та відновлення діоксиду марганцю на катоді. Електроліт (KOH) забезпечує іонну провідність.

Хімічні реакції (в кожному мініелементі):



Після з'єднання восьми елементів у послідовну ланку вихідна напруга становить 12 В, що є критично важливим для імпульсного споживання струму.

1.4 Цинкові батарейки

Цинкові батарейки (цинково-вуглецеві) – це одні з найстаріших і найдоступніших джерел електроенергії, які належать до первинних (неперезаряджуваних) хімічних джерел струму. Їх основою є хімічна реакція між

цинком (анодом) і марганцевим діоксидом (катодом) у присутності хлоридного електроліту. Вони прості у виробництві, дешеві, легкі, проте мають порівняно низьку енергетичну щільність і погано працюють при великих струмах навантаження або в холодних умовах. Часто використовуються в побутових пристроях з малим або періодичним енергоспоживанням – пультах, годинниках, радіо тощо.

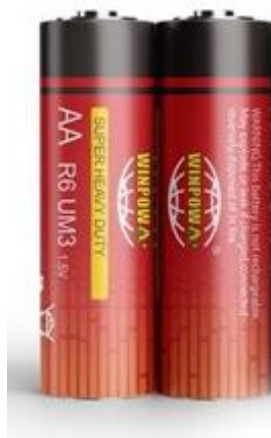


Рисунок 1.4 – Цинково-вуглецеві батарейки типу AA

Батарейка R6 (AA) також позначається як AA (цинково-вуглецева), є однією з найпоширеніших елементів живлення у світі. Вона належить до первинних джерел струму та є класичним представником цинково-вуглецевої системи. Використовується у великій кількості побутових пристроїв: ліхтариках, іграшках, радіоприймачах, пультах керування тощо.

Фізичні характеристики (типові):

- Діаметр: $\approx 14,5$ мм
- Довжина: $\approx 50,5$ мм
- Вага: $\approx 18\text{--}23$ г (залежно від виробника)
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: приблизно 400–1700 мА·год (залежно від навантаження та якості)

Хімічний склад і компоненти:

- Анод (негативний електрод): Цинк (Zn), який одночасно слугує корпусом батарейки, $\sim 22\text{--}26\%$. У процесі розряду він окислюється.

- Катод (позитивний електрод): суміш марганцевого діоксиду (MnO_2) і графіту, ~35–45%
- Електроліт: Водний розчин хлориду амонію (NH_4Cl), часто з додаванням хлориду цинку (ZnCl_2), ~25–30%.
- Інші матеріали: Сталевий або латунний контакт (кришка), ізоляційна шайба, ущільнювач з полімеру або бітуму для герметичності, ~5–15%.

Принцип роботи. Під час роботи електрони утворюються в результаті окиснення цинку на аноді та прямують через зовнішнє навантаження до катода, де вони відновлюють марганцевий діоксид. Іони амонію та гідроксидів транспортуються електролітом між електродами, підтримуючи хімічну рівновагу.

Батарейка R03 (AAA) – є мініатюрною версією стандартної R6. Вона належить до цинково-вуглецевих елементів (первинних, не перезаряджуваних) і використовується у невеликих електронних пристроях – пультах дистанційного керування, радіогодинниках, портативних медичних пристроях тощо.

Фізичні характеристики (типові):

- Діаметр: $\approx 10,5$ мм
- Довжина: $\approx 44,5$ мм
- Вага: $\approx 7-11$ г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: приблизно 350–900 мА·год (залежно від виробника, умов розряду та складу електроліту)

Хімічний склад і компоненти:

- Анод: Цинк (Zn) – у вигляді корпусу, який окислюється в процесі роботи:
- Катод: Суміш діоксиду марганцю (MnO_2) і графіту (C), що бере участь у реакціях
- Електроліт: Водна паста, що складається з хлориду амонію (NH_4Cl) і хлориду цинку (ZnCl_2). Залежно від рецептури електроліту (наприклад, у “Heavy Duty” версіях), змінюється і стійкість батарейки до високих навантажень.

- Сепаратор: Пористий матеріал (зазвичай целюлозна паперова плівка), який відділяє катод від анода, пропускаючи іони, але запобігаючи короткому замиканню.
- Інші компоненти: Сталеві контакти, герметизуючі шайби, полімерні ущільнювачі, зовнішня обгортка (плівка або фольга).

Принцип роботи. Під час розряду анод (цинк) віддає електрони, які через зовнішній ланцюг досягають катода, де відновлюють MnO_2 . Електроліт забезпечує рух іонів амонію, підтримуючи баланс зарядів усередині батарейки.

Орієнтовний вміст за масою (типовий):

- Діоксид марганцю (MnO_2): ~35-40%
- Цинк (Zn): ~20-25%
- Електроліт ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$): ~30%
- Інше (графіт, папір, корпус): ~10-15%

Батарейка R14 (C, цинково-вуглецева). Використовується у пристроях із середнім споживанням енергії – переносних ліхтарях, іграшках, радіоприймачах.

Фізичні характеристики (типові):

- Діаметр: $\approx 26,2$ мм
- Довжина: ≈ 50 мм
- Вага: $\approx 70-90$ г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: приблизно 3800–8000 мА·год (залежно від виробника та умов експлуатації)

Хімічний склад і компоненти:

- Анод: Цинк (Zn), що служить також корпусом батарейки, є активним матеріалом анода, який окислюється при розряді.
- Катод: Суміш діоксиду марганцю (MnO_2) з графітом (C), де відбувається відновлення.
- Електроліт: Водна паста хлориду амонію (NH_4Cl) та хлориду цинку (ZnCl_2), яка забезпечує іонний транспорт.

- Сепаратор: Пористий паперовий або целюлозний шар, який перешкоджає короткому замиканню між електродами.

Принцип роботи. Анод із цинку окислюється, віддаючи електрони в зовнішній ланцюг, котрі потім використовуються катодом для відновлення діоксиду марганцю. Електроліт сприяє переміщенню іонів амонію всередині батарейки, підтримуючи електричний баланс.

Орієнтовний вміст за масою (приблизно):

- Діоксид марганцю (MnO_2): ~35–40%
- Цинк (Zn): ~20-30%
- Електроліт ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$): ~25-30%
- Інше (графіт, сепаратор, корпус): ~10-15%

R20 (D) – це великий цинково-вуглецевий первинний елемент живлення, який часто використовується в пристроях із високим або тривалим енергоспоживанням, таких як ліхтарі, радіоприймачі, деякі дитячі іграшки.

Фізичні характеристики (типові):

- Діаметр: $\approx 33,0$ мм
- Довжина: $\approx 61,5$ мм
- Вага: близько 140-160 г
- Номінальна напруга: 1,5 В
- Ємність: приблизно 8000-12000 мА·год (залежно від виробника і умов використання)

Хімічний склад і компоненти:

- Анод: Цинк (Zn), що також виконує функцію корпусу батарейки.
- Катод: Діоксид марганцю (MnO_2) у суміші з графітом, що дозволяє відновлюватися під час розряду.
- Електроліт: Водна паста хлориду амонію (NH_4Cl) і хлориду цинку (ZnCl_2), що забезпечує іонний транспорт.
- Сепаратор: Пористий паперовий або целюлозний шар між електродами.
- Інші елементи: Металеві контакти, ущільнювачі, зовнішня оболонка.

Принцип роботи. Під час роботи цинковий анод окиснюється, вивільняючи електрони в зовнішній ланцюг. Катод, навпаки, приймає електрони, де діоксид марганцю відновлюється. Електроліт забезпечує рух іонів амонію між анодом і катодом, підтримуючи електрохімічний баланс.

Орієнтовний вміст за масою (приблизно):

- Діоксид марганцю (MnO_2): 35-40%
- Цинк (Zn): 25-30%
- Електроліт ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$): 25-30%
- Інше (графіт, сепаратор, корпус): 10-15%

6F22 (9V) – це прямокутна цинково-вуглецева первинна батарейка, відома як «9-вольтова». Часто застосовується в пристроях, які потребують напруги 9 В, наприклад, в димових детекторах, радіоприймачах, підсилювачах і дитячих іграшках.

Фізичні характеристики (типові):

- Форма: прямокутна (клітинка 9 В)
- Розміри: приблизно 48 мм × 26 мм × 17 мм
- Вага: близько 45-55 г
- Номінальна напруга: 9 В
- Ємність: близько 500-600 мА·год (залежно від виробника та умов використання)

Хімічний склад і компоненти:

- Анод: Цинк (Zn), який одночасно є внутрішнім корпусом батарейки.
- Катод: Діоксид марганцю (MnO_2) змішаний з графітом.
- Електроліт: Водний розчин хлориду амонію (NH_4Cl) та хлориду цинку (ZnCl_2), який діє як іонний провідник.
- Сепаратор: Пористий паперовий або целюлозний шар, що відокремлює анод і катод.
- Корпус: Металевий зовнішній корпус із пластиковими ізоляторами.

Принцип роботи. При розряді цинковий анод окиснюється (вивільняє електрони), які проходять через зовнішній електричний ланцюг до катода. Катод,

навпаки, відновлюється. Електроліт забезпечує рух іонів між електродами, підтримуючи електрохімічні реакції.

Орієнтовний склад за вагою:

- Діоксид марганцю (MnO_2): 35-40%
- Цинк (Zn): 25-30%
- Електроліт ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$): 25-30%
- Інші матеріали (графіт, сепаратор, корпус): 10-15%.

Зведені дані про типи і склад бетарей наведені у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Типи побутових бетарей та їх склад (складено на основі [1–5])

Тип бетареї	Катод	Анод	Електроліт
LR6 (AA)	MnO_2 (~40-45%)	Zn (~15-20%)	KOH (~10-12%)
LR03 (AAA)	MnO_2 (~40-45%)	Zn (~15-20%)	KOH (~10-12%)
A27 (MN27)	MnO_2 (~30-35%)	Zn (~15-18%)	KOH (~10%)
A23 (MN21/23)	MnO_2 (~30-35%)	Zn (~15-18%)	KOH (~10%)
AG13 (LR44)	MnO_2 (~32-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG4 (LR626)	MnO_2 (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG10 (LR1130)	MnO_2 (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG3 (LR41 / L736)	MnO_2 (~30-33%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-13%)
G12A (LR43)	MnO_2 (~32-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-13%)
AG1 (LR621)	MnO_2 (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
R6 (AA)	MnO_2 (~35-45%)	Zn (~22-26%)	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$ (~25-30%)
R03 (AAA)	MnO_2 (~35-40%)	Zn (~20-25%)	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$ (~25-30%)
R14 (C)	MnO_2 (~35-40%)	Zn (~25-30%)	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$ (~25-30%)
R20 (D)	MnO_2 (~35-40%)	Zn (~25-30%)	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$ (~25-30%)
6F22 (9V)	MnO_2 (~35-40%)	Zn (~25-30%)	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$ (~25-30%)
SR389	Ag_2O (~40-50%)	Zn (~10-15%)	KOH або NaOH
CR2016/2032	MnO_2 (~40-45%)	Li (~3-5%)	LiPF_6 , LiClO_4 (~15-20%)

HR6 (Ni-MH)	NiOOH (~35-40%)	MH (~25-30%)	KOH (~10%)
HR03 (Ni-MH)	NiOOH (~35-40%)	MH (~25-30%)	KOH (~10%)
Ni-Cd AA	NiOOH (~30%)	Cd (~20%)	KOH (~10%)
Li-ion	LiCoO ₂ (~35-45%)	Graphite (~10-15%)	LiPF ₆ (~20%) в орг. розчиннику

1.5 Вплив відпрацьованих батарейок на довкілля

Неправильна утилізація батарейок створює серйозну загрозу для довкілля через витікання токсичних елементів у ґрунт, воду та повітря. Важкі метали, електроліти та органічні сполуки, що входять до складу батарейок, мають властивість акумулюватися в екосистемах, завдаючи шкоди рослинам, тваринам, комахам і, зрештою, людині [5]. Викинуті батарейки починають розкладатися під дією природних чинників, таких як волога, температура та механічний вплив. У результаті цього важкі метали (ртуть, кадмій, свинець) проникають у верхні шари ґрунту. Ці елементи змінюють його хімічний склад, що негативно впливає на мікроорганізми, які відповідають за його родючість. Токсичні компоненти можуть знижувати здатність ґрунту до фільтрації води, що призводить до забруднення підземних вод. Важкі метали мають властивість накопичуватися у ґрунті, створюючи «гарячі точки» забруднення, які впливають на екосистеми навіть через десятиліття після потрапляння токсинів. Коли токсичні речовини з батарейок потрапляють у ґрунт, вони можуть проникати в підземні води або змиватися у водойми під час дощів. Це спричиняє нижченаведені наслідки.

Забруднення джерел питної води. Важкі метали, такі як свинець і кадмій, викликають серйозні проблеми зі здоров'ям у людей, які споживають забруднену воду.

Вплив на водні організми. Метали та електроліти змінюють хімічний склад води, що може бути смертельним для риб і амфібій. Наприклад, ртуть, потрапляючи у воду, трансформується у метилртуть, яка накопичується в організмах риб і через харчовий ланцюг доходить до людей. Токсичні речовини, що потрапляють у ґрунт, поглинаються кореневою системою рослин. Це спричиняє такі наслідки:

- Зниження врожайності. Важкі метали можуть блокувати поглинання необхідних для росту елементів, таких як калій і магній.
- Акумуляція токсинів у тканинах рослин. Це може зробити рослини небезпечними для споживання тваринами й людьми.
- Порушення фотосинтезу. Токсини, такі як кадмій, негативно впливають на функцію хлорофілу, знижуючи ефективність фотосинтетичних процесів.

Тварини та комахи можуть контактувати з батарейками безпосередньо, особливо якщо ті потрапляють у природні середовища, такі як ліси чи поля. Основні ризики: Отруєння через контакт: Тварини, що випадково гризуть батарейки або п'ють воду із забруднених джерел, піддаються ризику інтоксикації. Наприклад, кадмій може викликати ураження нирок, а свинець – нейротоксичні ефекти. Втрата місць проживання: Забруднення ґрунту та води знижує якість природних середовищ існування, змушуючи тварин покидати такі зони. Зниження популяцій комах: Токсичні речовини впливають на комах-опилювачів, які є важливими для підтримки біорізноманіття та врожайності сільськогосподарських культур. Потрапляння важких металів у природні екосистеми порушує харчові ланцюги. Токсини передаються від рослин до тварин, накопичуючись у тканинах організмів. Це явище, відоме як біомагніфікація, призводить до того, що концентрація шкідливих речовин зростає на кожному рівні харчового ланцюга, завдаючи шкоди великим хижим тваринам і людині. Батарейки, які потрапляють у довкілля без належної утилізації, створюють значну загрозу для ґрунтів, водних ресурсів та біосфери загалом. Забруднення токсичними речовинами руйнує природний баланс екосистем, знижує продуктивність рослин і впливає на виживання багатьох видів тварин і комах. Для зменшення цих

ризиків необхідно вдосконалювати системи збору та переробки батарейок, а також посилювати контроль за їх утилізацією [6].

Особливо небезпечними компонентами у складі батарейок є:

- Ртуть (Hg): входила до складу старих батарейок і акумуляторів. Висока токсичність ртуті призводить до забруднення водних і ґрунтових ресурсів, а також до інтоксикації організмів.
- Свинець (Pb): використовується в свинцево-кислотних акумуляторах. Потрапляння свинцю в навколишнє середовище викликає серйозні екологічні та медичні проблеми.
- Кадмій (Cd): накопичується в ґрунтах і організмах, викликаючи хронічні отруєння.

1.6 Нормативно-правова база поводження з батарейками в Україні та ЄС

У контексті забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку, правове регулювання поводження з відпрацьованими елементами живлення набуває особливої актуальності. Останніми роками Україна та Європейський Союз здійснили суттєві кроки у вдосконаленні законодавства, спрямованого на ефективне управління відходами, зокрема батарейками.

Ключовим нормативним актом у сфері управління відходами в Україні є Закон України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року № 2320-ІХ. Цей закон встановлює правові, організаційні та економічні засади діяльності, спрямованої на запобігання утворенню відходів, зменшення їх обсягів, а також на зниження негативного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини. Зокрема, закон передбачає обов'язковість створення системи роздільного збирання відходів, включаючи небезпечні відходи, до яких належать і відпрацьовані батарейки [7].

На виконання положень цього закону, Кабінет Міністрів України затвердив постанову від 5 грудня 2023 року № 1278 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з управління небезпечними відходами». Цей

нормативний акт встановлює вимоги до суб'єктів господарювання, які здійснюють діяльність у сфері збирання, зберігання, перевезення, оброблення та утилізації небезпечних відходів, включаючи батарейки. (Офіс Сталих Рішень) Крім того, стратегічним документом у сфері управління відходами є Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 року № 820-р. Ця стратегія визначає основні напрями державної політики у сфері управління відходами, включаючи розвиток інфраструктури для збирання та утилізації небезпечних відходів [8].

У Європейському Союзі правове регулювання у сфері поводження з батареями зазнало суттєвих змін із прийняттям Регламенту (ЄС) 2023/1542 Європейського Парламенту та Ради від 12 липня 2023 року «Про батареї та відходи батарей». Цей регламент замінює попередню Директиву 2006/66/ЄС та встановлює обов'язкові вимоги до всіх типів батарей, що вводяться на ринок ЄС, включаючи вимоги щодо сталості, безпеки, маркування, інформаційної прозорості, управління відходами та належної перевірки ланцюгів постачання. Зокрема, регламент передбачає впровадження «паспорта батареї» – цифрового інструменту, який забезпечує прозорість щодо складу, походження та екологічного впливу батарей. Також встановлюються вимоги щодо мінімального вмісту перероблених матеріалів у нових батареях та обов'язковість їх розбірності для полегшення утилізації.

Аналіз нормативно-правової бази України та Європейського Союзу свідчить про посилення уваги до питань екологічної безпеки у сфері поводження з відпрацьованими батареями. Прийняття нових законодавчих актів спрямоване на створення ефективної системи управління відходами, що відповідає сучасним екологічним викликам та сприяє сталому розвитку [9].

2 РЕЦИКЛІНГ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ

2.1 Актуальність утилізації літій-іонних батарей

У сучасному світі стрімке зростання виробництва літій-іонних батарей (LIB, lithium-ion batteries) стало результатом глобальної електрифікації транспорту, поширення мобільних електронних пристроїв, розвитку накопичувачів енергії та альтернативної енергетики. За останнє десятиліття попит на літій-іонні акумулятори зріс у десятки разів, а прогноз Міжнародного енергетичного агентства (IEA) свідчить, що до 2030 року обсяги утилізованих батарей сягнуть кількох мільйонів тонн щорічно. Однак, разом зі зростанням використання батарей зростає і обсяг відходів, які становлять значну екологічну та технологічну загрозу.

Відпрацьовані літій-іонні батареї є складними техногенними системами, що містять цінні метали (літій, кобальт, нікель, мідь, алюміній), а також небезпечні речовини – органічні електроліти, фторвмісні солі (LiPF_6), графітові аноди. У разі порушення цілісності оболонки або неправильного зберігання, такі батареї можуть становити небезпеку через ризик займання, вибуху або витоку токсичних речовин. Стихійне або неконтрольоване поховання таких відходів здатне спричинити забруднення ґрунтів, води та атмосфери важкими металами й токсичними органічними сполуками.[10]

З іншого боку, літій-іонні батареї є стратегічною сировиною. Переробка дозволяє не лише уникнути негативного впливу на довкілля, але й повернути в обіг дефіцитні й дорогі матеріали, зменшуючи залежність від первинного видобутку. Наприклад, кобальт і літій активно використовуються у високотехнологічних галузях, але їх геологічні запаси обмежені, а видобуток часто супроводжується соціальними й екологічними конфліктами. Так, основна частка світового виробництва кобальту припадає на Демократичну Республіку Конго, де умови праці викликають значну критику з боку правозахисних організацій.

Економічна доцільність переробки підтверджується тим, що вартість вилучення кобальту або нікелю з відпрацьованих батарей може бути в рази нижчою, ніж при

первинному видобутку. У середньому, одна тонна відпрацьованих акумуляторів може містити до 100 кг корисних металів, у тому числі 5–20 кг кобальту, що робить переробку привабливою як з точки зору економіки, так і ресурсозбереження (рис. 2.1).

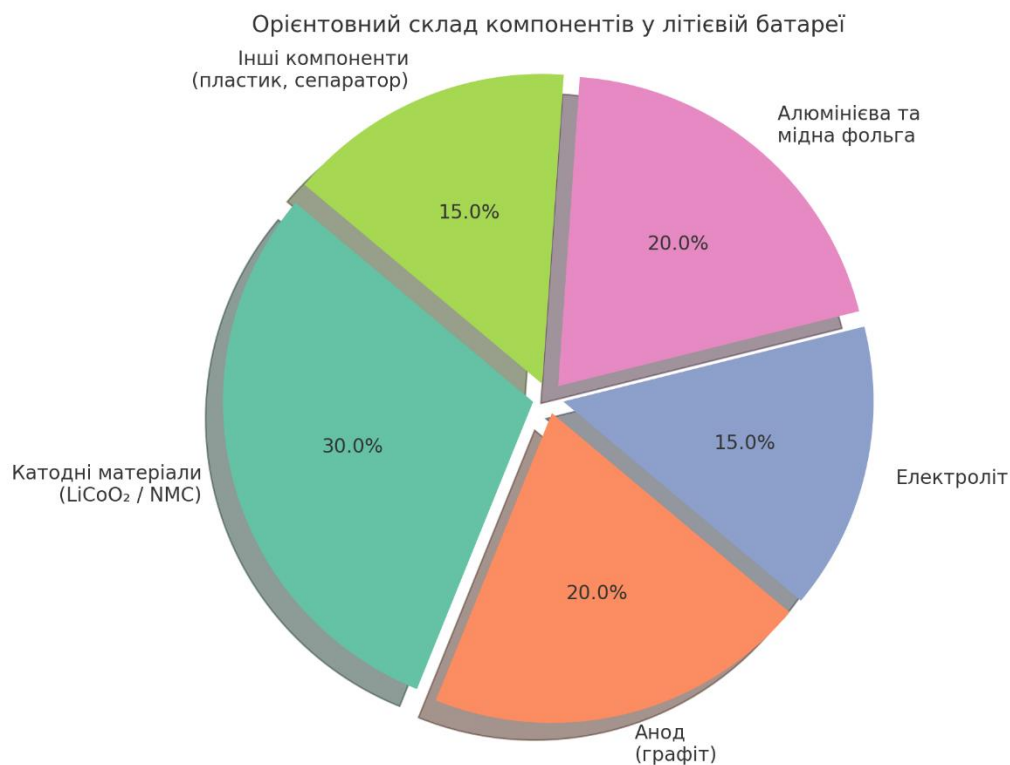


Рисунок 2.1 – Орієнтовний склад компонентів у типовій відпрацьованій літій-іонній батареї

З урахуванням темпів росту галузі електротранспорту, зокрема електромобілів, а також обмеженого терміну служби літій-іонних батарей (5–10 років), проблема накопичення відходів стає критичною вже сьогодні. За оцінками, до 2030 року на переробку щороку надходитимуть сотні мільйонів батарей, що потребує впровадження системних рішень на рівні законодавства, технологій і логістики. Розробка ефективних технологій вторинної переробки є ключовою умовою сталого розвитку акумуляторної галузі та охорони довкілля [11].

Таким чином, утилізація літій-іонних батарей є не лише екологічною необхідністю, а й джерелом цінної вторинної сировини. Її ефективна організація є

стратегічним завданням для хімічної промисловості, що поєднує природоохоронні, економічні та соціальні аспекти.

2.2 Ресурси літій-іонних батарей

Відпрацьовані літій-іонні батареї є складною багатокомпонентною сировиною, що містить цінні метали, органічні речовини та допоміжні матеріали. Їхній склад залежить від типу акумулятора (LiCoO_2 , LiFePO_4 , NMC, LMO тощо), виробника, року випуску, умов експлуатації та ступеня деградації. Втім, незалежно від типу, літій-іонні батареї мають спільні конструктивні елементи, які визначають їхню цінність для переробки.

Типова літій-іонна батарея складається з катоду, аноду, електроліту, сепаратора, металевих струмознімачів і оболонки. Катод є джерелом основної частини металовмісної маси, зокрема кобальту (LiCoO_2), нікелю та марганцю (NMC), заліза (LiFePO_4) або алюмінію. Аноди здебільшого виготовляються на основі графіту з добавками вуглецевих наноматеріалів, тоді як струмознімачами слугують фольга з міді (для анода) та алюмінію (для катода) [12].

Електроліт є рідким або гелеподібним середовищем, що забезпечує перенесення іонів літію між електродами. Найчастіше він складається з органічних розчинників (карбонати – диметилкарбонат, етилметилкарбонат тощо) і солі LiPF_6 , яка в процесі деградації може розкладатися з утворенням HF – агресивного фтороводню. Саме електроліт є найнебезпечнішим з екологічної точки зору компонентом батарей, оскільки легко випаровується, горючий і токсичний. Деякі новіші типи батарей (наприклад, твердоелектролітні) використовують неорганічні матеріали, проте більшість ЛІВ залишається органічними [13].

Згідно з аналізом типового акумулятора формату 18650, масова частка основних компонентів розподіляється наступним чином: катодна маса (LiCoO_2 або аналог) – 25-30%, анод (графіт) – 15-20%, електроліт – 10-15%, металева фольга (Cu, Al) – 15-20%, пластикова оболонка й сепаратор – 10-15%. Таким чином, понад 50% маси батареї

припадає на метали, які мають високу ринкову вартість і технологічну значущість (рис. 2.2).

Особливу цінність мають такі елементи, як:

- Кобальт (Co) – використовується в катодах, дорогий і обмежений у доступі ресурс.
- Нікель (Ni) – ключовий для катодів NMC/NCA, підвищує енергетичну щільність.
- Літій (Li) – присутній у катодах та електроліті, хоча його концентрація невисока (1–3% маси).
- Мідь (Cu) і алюміній (Al) – струмознімачі, легко витягуються при механічному поділі.

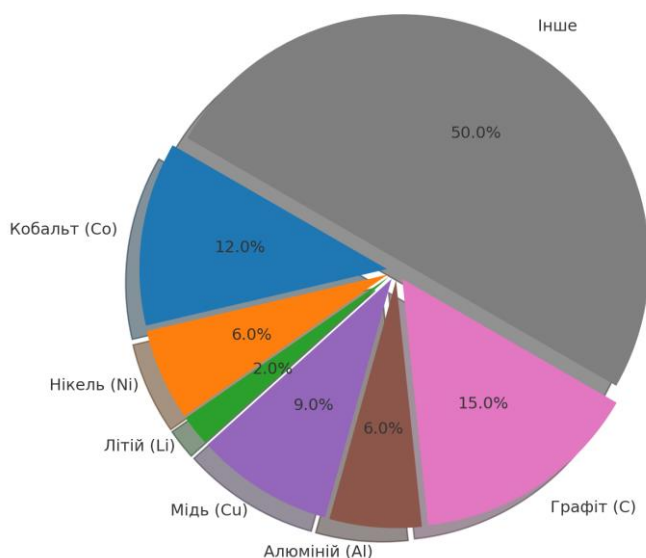


Рисунок 2.2 – Масовий вміст ключових металів у літій-іонній батареї

Крім металів, при переробці батарей утворюється значна кількість вуглецевих залишків, органічних забруднень та вторинних фторорганічних речовин. Ці компоненти вимагають спеціального підходу до утилізації або знешкодження. Деякі технології передбачають спалювання органіки з рекуперацією тепла, інші – вилучення з рідкої фази за допомогою адсорбентів або фільтрації.

Таким чином, відпрацьовані літій-іонні батареї розглядаються не лише як небезпечні відходи, але й як джерело цінної вторинної сировини. Їхній комплексний склад вимагає поєднання фізичних, хімічних та термічних методів для ефективного вилучення компонентів. Глибоке розуміння складу батарей є основою для проектування ефективних процесів переробки та мінімізації впливу на навколишнє середовище [14].

2.3 Основні методи переробки літій-іонних батарей

Переробка батарейок є важливим етапом у зменшенні їх негативного впливу на довкілля та повторному використанні цінних компонентів. Сучасні технології дозволяють ефективно виділяти метали та інші матеріали, що входять до складу батарейок, для повторного використання у виробництві. Існує кілька основних підходів до переробки, які використовуються залежно від типу батарейок, їх хімічного складу та наявності технологічних потужностей у певній країні.

На першому етапі переробки батарейки піддаються механічному подрібненню. Це дозволяє відокремити їхні основні компоненти, такі як метали, пластик і електроліти.

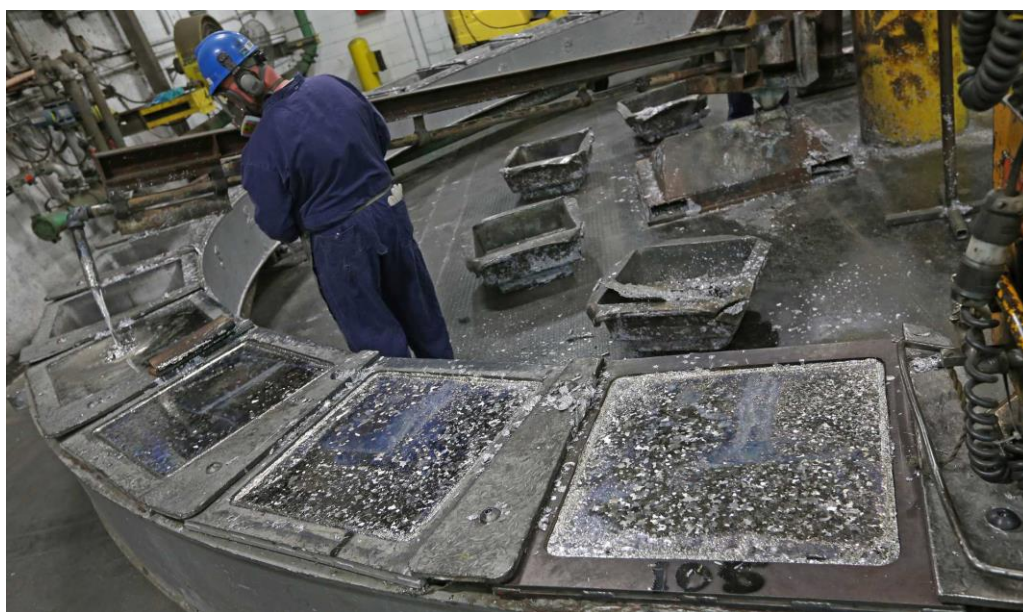


Рисунок 2.3 – Розбір батареї для подальшої переробки

Основні переваги цього методу:

- зниження обсягу відходів, які потрібно транспортувати
- полегшення подальшої обробки завдяки попередньому розділенню матеріалів.

Механічне подрібнення широко використовується в країнах ЄС, оскільки воно є відносно недорогим і швидким способом підготовки батарейок до вторинної переробки [15].

Гідрометалургійна переробка передбачає використання хімічних реакцій у рідкому середовищі для вилучення металів, таких як цинк, нікель, кобальт або літій. Основні етапи цього процесу: Подрібнені компоненти батарейок змішуються з хімічними реагентами (наприклад, кислотами або лугами). Метали вилучаються через осадження, фільтрацію або екстракцію. Отримані речовини використовуються для виготовлення нових батарейок або в інших промислових процесах.

Цей метод дозволяє максимально ефективно відновлювати метали з мінімальним викидом шкідливих речовин у довкілля.

Пірометалургія передбачає використання високих температур для плавлення компонентів батарейок та виділення металів у чистому вигляді. Цей метод є одним із найпоширеніших і включає такі етапи:

Змішування батарейок із вуглецем або іншими відновниками. Нагрівання в печах при температурах понад 1000°C. Виділення металів, таких як залізо, свинець, кадмій і кобальт, у вигляді сплавів або чистих елементів.

Пірометалургія є високоефективною, особливо для переробки великого обсягу батарейок, однак її недоліками є високі енергетичні витрати та необхідність встановлення потужного обладнання, що доступне не в усіх країнах.

Деякі підприємства застосовують комбіновані технології, які поєднують механічне подрібнення, гідрометалургію та пірометалургію. Це дозволяє оптимізувати процес переробки для різних типів батарейок. Наприклад, механічне подрібнення може бути використане для попереднього розділення компонентів, а гідрометалургія – для вилучення специфічних металів, таких як літій чи кобальт.

Не всі країни мають достатні потужності для переробки батарейок, що створює серйозні проблеми у сфері управління відходами. Основні труднощі: Висока вартість обладнання та технологій для переробки. Відсутність доступу до сучасних пірометалургійних чи гідрометалургійних установок у менш розвинених країнах. Логістичні проблеми з транспортуванням батарейок до переробних заводів, особливо в країнах із великою територією [16].

Сучасні способи переробки батарейок, такі як механічне подрібнення, гідрометалургія та пірометалургія, дозволяють ефективно вилучати цінні метали та зменшувати кількість токсичних відходів. Проте для забезпечення глобальної екологічної безпеки необхідно вдосконалювати інфраструктуру переробки, особливо в країнах, які ще не мають доступу до таких технологій.

Сучасні технології переробки літій-іонних батарей формуються під впливом трьох ключових факторів: потреби в утилізації небезпечних компонентів, повернення цінних металів у виробничий цикл і дотримання екологічних норм. Через складну структуру та багатокомпонентний склад літій-іонні батареї не можуть бути ефективно перероблені одним універсальним методом – технології розвиваються у напрямі комбінованих підходів, які включають фізико-механічну підготовку, хімічну екстракцію металів і термічну обробку.

Найбільш поширеними підходами є пірометалургія, гідрометалургія та пряме відновлення. Кожен з методів має свої особливості, переваги й обмеження, які визначають їхню придатність до конкретного типу відходів або рівня технічної оснащеності підприємства.

Пірометалургія – це один з найстаріших методів утилізації батарей, який передбачає високотемпературне плавлення компонентів у спеціальних печах при температурі понад 1000 °C. Органічні речовини (електроліт, сепаратор, оболонка) у процесі спалюються, а метали – відновлюються до рідкого сплаву або оксидів. Часто застосовується флюсування з додаванням вапна або шлакоутворюючих агентів.

Головною перевагою цього методу є простота реалізації – батареї можна переробляти без ретельної попередньої розборки, а також високий вихід кобальту, нікелю, міді. Однак значною вадою є втрата літію (він переходить у шлак), а також

високе енергоспоживання та викиди газів, що потребують очищення. Технології цього типу використовують компанії Umicore (Бельгія) та Glencore (Канада), орієнтуючись на повернення дорогих металів у металургійний цикл.

Гідрометалургія – цей метод базується на вилуговуванні металів з подрібненої катодної маси за допомогою кислот (H_2SO_4 , HCl) або хелатуючих агентів (EDTA, органічні кислоти). Основні етапи – це механічне подрібнення батарей, очищення від органіки (термічне або розчинниками), вилуговування, осадження чи електроліз металів. В результаті можна вибірково відновити літій, кобальт, нікель, марганець у вигляді солей або металів. Гідрометалургія вважається більш екологічно чистою альтернативою пірометалургії, оскільки працює при низьких температурах і дозволяє повернути літій, який пірометалургія втрачає. Проте вона вимагає ретельної механічної підготовки сировини, витрат реагентів, складних схем очищення стічних вод і є більш повільною в масштабах великого виробництва. Компанія Li-Cycle (Канада) застосовує гідрометалургію з повним вилученням літію з електроліту.

Пряме відновлення (Direct Recycling) – це новий, перспективний напрям, що полягає не у вилученні окремих металів, а у відновленні функціональності активних матеріалів (переважно катодів). Наприклад, зношений LiCoO_2 відновлюють шляхом додавання літій-іонних солей і обробки при контрольованій температурі, що дозволяє повторно використовувати катод без повного розкладання.

Перевага такого підходу – мінімальні енергетичні й матеріальні витрати, збереження структури електродів і зменшення обсягу відходів. Однак недоліком є низька універсальність – метод вимагає точного сортування батарей за хімічним складом і ступенем деградації. Direct recycling нині перебуває на етапі лабораторного або пілотного застосування, хоча його підтримує низка дослідницьких проєктів у США та Європі (табл 2.1).

Комбіновані схеми – найбільш ефективні сучасні технології – це поєднання методів. Наприклад, батарея спочатку проходить механічне подрібнення, далі сепарацію струмознімачів, видалення електроліту та подальшу гідрометалургічну екстракцію. При потребі додається термічна обробка для знешкодження органіки або попередня піролізна деструкція [17].

Комбіновані лінії дозволяють адаптувати процес під різні типи батарей (NMC, LFP, LCO), зменшити втрати компонентів, підвищити ефективність утилізації до 90–95%. Крім того, такі схеми краще інтегруються у сучасну концепцію кругового ресурсообігу – «cradle-to-cradle».

Таблиця 2.3 – Порівняння методів переробки батарейок

Метод	Переваги	Недоліки
Пірометалургія	Проста реалізація, висока швидкість	Втрата літію, високі викиди
Гідрометалургія	Повернення літію, вибірковість	Витрати реагентів, складність
Direct Recycling	Низьке споживання ресурсів	Високі вимоги до сортування
Комбіновані схеми	Висока ефективність, адаптивність	Складність керування процесом

Вибір методу переробки залежить від типу батарей, економічних умов, технічних можливостей підприємства та екологічних вимог. Майбутнє цієї галузі лежить у розробці модульних систем, які поєднують найкращі властивості кожного підходу, забезпечуючи глибоку утилізацію та мінімізацію залишкових відходів.

3 ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПЕРЕРОБКИ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ

3.1 Екологічні загрози при неналежному поводженні з відпрацьованими батареями

Відпрацьовані літій-іонні батареї становлять серйозну екологічну загрозу, особливо за умов неправильного зберігання, транспортування або неконтрольованої утилізації. Основною проблемою є складний хімічний склад батарей, що включає токсичні речовини, нестабільні сполуки та горючі елементи, які можуть викликати забруднення довкілля або аварійні ситуації. Однією з найбільш серйозних загроз є наявність у батареях літій-іонних солей та органічних електролітів, які можуть виділяти токсичні гази (наприклад, фтороводень HF) при термічному розкладі. У більшості літій-іонних батарей електроліти складаються з розчинів солей LiPF_6 або LiBF_4 у суміші органічних розчинників – диметилкарбонату, етиленкарбонату тощо. При контакті з вологою або нагріванні ці речовини розкладаються, утворюючи кислотні пари та канцерогенні сполуки. Особливо небезпечним є фосфорпентафторид (PF_5), який виділяється при гідролізі солей – ця речовина є сильно токсичною та корозійно-активною [18].

Іншою критичною небезпекою є пожежонебезпека літій-іонних батарей. Через внутрішні короткі замикання, механічні пошкодження або перегрів може виникати так званий "термічний розгін" (thermal runaway), під час якого температура осередку стрімко зростає, і батарея вибухає або займається (рис. 3.1). Пожежі літій-іонних батарей надзвичайно складно гасити звичайними засобами, а продукти горіння включають оксиди літію, кобальту, графіту, а також фторвмісні токсиканти. Небезпечність посилюється тим, що в умовах сміттєзвалищ або перевантажених контейнерів акумулятори можуть бути здавлені або пошкоджені, що провокує займання. Подібні інциденти вже неодноразово спричиняли загоряння на сміттесортувальних станціях у США, Великій Британії, Китаї. У разі потрапляння батарей до навколишнього середовища без належної утилізації відбувається

забруднення ґрунтів і підземних вод важкими металами, такими як кобальт, нікель, марганець, мідь. Ці елементи мають високу біологічну активність і можуть акумулюватися в живих організмах, викликаючи токсичний вплив, зокрема пошкодження печінки, нирок і центральної нервової системи. Дослідження показали, що при витокі електроліту у водне середовище рН може падати до рівня 3–4, що змінює структуру екосистем і знищує водну фауну. Літій у високих концентраціях також токсичний для риб та безхребетних [19].

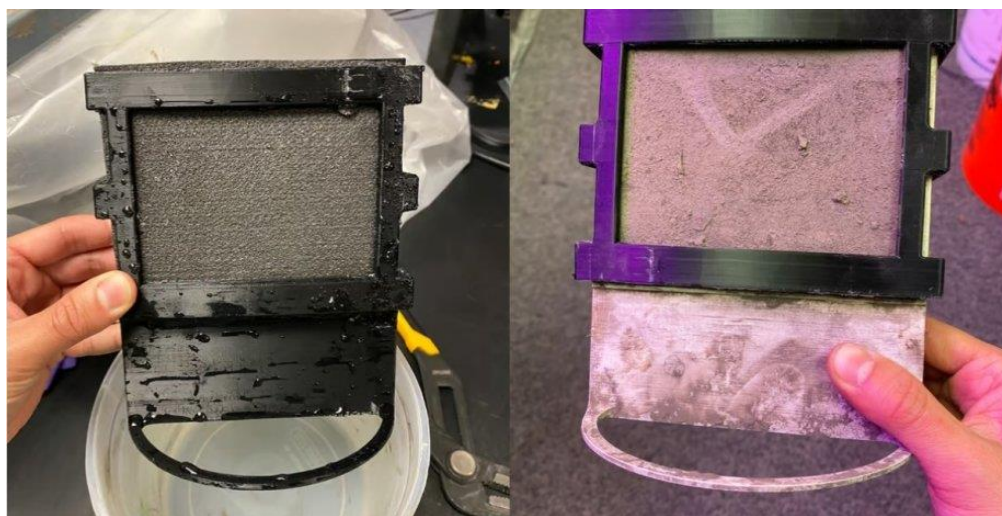


Рисунок 3.1 – Витік електроліту та його наступна кристалізація в сухих умовах

Крім цього, існує загроза накопичення відходів з низькою швидкістю природного розкладу. На відміну від органічних відходів, батареї не біорозкладаються і можуть зберігати свою хімічну активність десятиліттями, повільно розповсюджуючи токсичні компоненти. Це створює потенційне екологічне навантаження не тільки на поточне, але й на майбутні покоління.

За даними звітів Європейського агентства з охорони довкілля, щорічно в країнах ЄС утворюється понад 200 тис. тонн відпрацьованих літій-іонних батарей, і лише частина з них потрапляє на переробку. У країнах, де не існує централізованої системи збору, рівень утилізації залишається вкрай низьким. Наприклад, в Україні, за оцінками експертів, переробляється менше 3% усіх використаних батарей, решта – зберігається

на складах або потрапляє на сміттєзвалища, створюючи неконтрольоване джерело забруднення.

Зважаючи на це, формування безпечної та ефективної системи обігу відпрацьованих літій-іонних джерел струму є критично важливим завданням для державної екополітики. Необхідне поєднання регуляторних механізмів, технічної інфраструктури та інформування населення для запобігання екологічним катастрофам та створення умов для сталого використання енергетичних технологій [20].

3.2 Порівняння екологічного навантаження різних методів переробки літій-іонних батарей

Різні технології переробки літій-іонних батарей суттєво відрізняються не лише ефективністю вилучення цінних матеріалів, але й рівнем екологічного навантаження. Сучасна практика базується на трьох основних методах: пірометалургійному, гідрометалургійному та методі прямого відновлення. Кожен з них має свої сильні сторони та суттєві екологічні обмеження, які необхідно враховувати при виборі технологічного підходу.

Пірометалургійна переробка передбачає спалювання або плавлення батарей у спеціальних печах при температурах понад 1200 °C. При цьому відбувається термічне руйнування всіх органічних компонентів, включно з електролітом та сепаратором, і відновлення металів у вигляді сплавів. Такий метод дозволяє вилучити кобальт, нікель, мідь, а от літій майже повністю втрачається, переходячи в шлак або випаровуючись. Головна екологічна проблема пірометалургії – високий рівень викидів CO₂, а також токсичних газів, зокрема фтороводню та летких органічних сполук, які утворюються під час горіння електролітів. Крім того, процес потребує значного споживання енергії, що підвищує загальний вуглецевий слід. У деяких країнах, зокрема в Німеччині та США, впроваджуються системи газоочищення, але вони не забезпечують повного усунення екологічних ризиків.

Також, гідрометалургійна технологія базується на хімічному вилуговуванні металів у кислому середовищі з подальшим осадженням або електролітичним

виділенням. Найчастіше застосовують сірчану, соляну або азотну кислоту з додаванням відновників – наприклад, перекису водню. Цей метод дозволяє ефективно вилучити літій, кобальт, нікель і марганець, зменшуючи матеріальні втрати. Водночас екологічне навантаження полягає у великій кількості токсичних стічних вод, які містять залишки кислот, металів та органічних домішок. Такі стоки потребують складної системи нейтралізації та очищення, а побічні продукти часто утворюють шлами, що також вимагають захоронення. Додатково варто зазначити, що гідрометалургія зазвичай проводиться в багатоступеневому режимі, що збільшує об'єм реагентів і складність контролю [21].

Метод прямого відновлення (англ. *direct recycling*) вважається найекологічнішим з усіх трьох, адже не передбачає руйнування матеріалів до атомарного рівня. Замість вилучення окремих елементів, метод дозволяє відновлювати цілі катодні матеріали, зберігаючи їх кристалічну структуру. Зокрема, використовується перепічка, регранулювання та доповнення літію в катодних порошках. Це суттєво знижує споживання енергії та кількість шкідливих відходів, а також мінімізує втрати дорогоцінних металів. Основним обмеженням цього методу поки що залишається його обмежена застосовність – технологія потребує однорідного складу батарей, чіткої ідентифікації типів і автоматизованого демонтажу. У промисловому масштабі метод лише починає застосовуватися, але, за оцінками дослідників, має найменший екологічний слід серед доступних варіантів.

Для порівняння екологічної ефективності різних методів часто використовують показники оцінки життєвого циклу (LCA), що охоплюють викиди парникових газів, споживання енергії, обсяг відходів та токсичність. Дослідження, проведені Національною лабораторією ім. Лоуренса (США), показали, що пірометалургія має найбільші викиди CO₂ – до 6,5 кг на 1 кг перероблених батарей, тоді як для гідрометалургії ця цифра становить 1,8-2,5 кг, а для прямого відновлення – менше ніж 1 кг. Крім того, останній метод дозволяє зменшити споживання води та об'єм побічних продуктів майже вдвічі порівняно з іншими.

У зв'язку з цим багато країн та компаній, зокрема Redwood Materials (США), Northvolt (Швеція), RecycLiCo (Канада), активно розвивають саме гібридні або

комбіновані технології, які поєднують хімічне очищення з елементами прямого відновлення. Це дозволяє досягти високої ефективності переробки при мінімізації шкідливого впливу на довкілля [22].

Отже, оцінка екологічного навантаження при виборі методу переробки повинна враховувати не лише технічні характеристики процесу, але й довгострокові наслідки для навколишнього середовища, які впливають на сталий розвиток галузі та відповідність сучасним екологічним стандартам.

3.3 Економічна доцільність та рентабельність переробки літій-іонних батарей

Процес виробництва батарейок є складним і включає використання значних обсягів ресурсів, енергії та хімічних речовин. Вибір технологій і матеріалів визначає як технічні характеристики батарейок, так і їхній вплив на довкілля. В останні роки акцент у розробках зміщується на екологічність і ефективність виробництва, що сприяє зменшенню екологічних ризиків. Основні етапи виробництва. Виробництво батарейок починається з видобутку та підготовки основних матеріалів, таких як літій, нікель, кобальт, цинк і свинець. Видобуток цих ресурсів має значний екологічний слід: руйнування екосистем, утворення токсичних відходів і великі викиди вуглекислого газу. Катоди виготовляються із сполук, що містять метали, такі як літій-залізо-фосфат (LiFePO_4) або нікель-кобальт-марганцеві оксиди (NCM). Аноди здебільшого виробляються з графіту або інших форм вуглецю. Електроліти створюються на основі органічних розчинників із додаванням солей літію чи інших металів.

Складання батарейок. Процес включає нанесення активних матеріалів на металеві підкладки (наприклад, алюмінієві чи мідні фольги), збирання елементів у корпуси та заповнення їх електролітом. На цьому етапі важливо мінімізувати витрати матеріалів і відходи. Кожна батарейка проходить випробування на відповідність стандартам безпеки та ефективності. Це важливо для уникнення дефектів, які можуть призвести до короткого замикання або витікання токсичних речовин. Процес виробництва батарейок супроводжується такими екологічними проблемами:

Забруднення повітря: під час синтезу матеріалів та збирання батарейок утворюються леткі органічні сполуки та інші шкідливі речовини.

Енергозатратність: виробництво батарейок, особливо літій-іонних, вимагає великих обсягів електроенергії, що збільшує вуглецевий слід. Відходи: неефективне використання матеріалів та дефекти в процесі виробництва створюють значну кількість відходів, які важко переробляти. Щоб зменшити негативний вплив на довкілля, дослідники працюють над впровадженням екологічніших матеріалів і технологій: Літій-залізо-фосфатні батареї (LiFePO_4). Ці батареї є менш токсичними порівняно з традиційними літій-іонними, оскільки не містять кобальту. Їх виробництво вимагає менших витрат енергії, а матеріали мають кращі показники безпеки та стабільності [23]. Перехід на замкнений цикл виробництва. Багато компаній почали впроваджувати технології переробки власних відходів, повторно використовуючи металеві компоненти. Це дозволяє значно скоротити видобуток сировини та кількість виробничих відходів. Вчені досліджують можливість використання біорозкладних матеріалів для корпусів батарейок, що зменшить кількість пластикових відходів у природі. Виробництво батарейок залишається енергозатратним і ресурсомістким процесом, який має суттєвий вплив на довкілля. Проте сучасні інновації, такі як використання літій-залізо-фосфатних матеріалів, перехід на замкнений цикл виробництва та застосування екологічних технологій, створюють перспективи для зменшення цього впливу. Подальший розвиток більш безпечних і стійких методів виробництва є ключем до забезпечення екологічної безпеки в майбутньому [24].

Переробка літій-іонних батарей має не лише екологічне, а й вагоме економічне значення, оскільки дозволяє повертати в обіг цінні метали, зменшувати залежність від первинного видобутку і створювати локальні виробничі ланцюги. У світлі зростаючого попиту на електромобілі, портативну електроніку та накопичувачі енергії, економічна доцільність переробки зростає щороку. Основна економічна перевага переробки полягає у поверненні дорогих металів, таких як кобальт, нікель, мідь і літій, які складають до 50–60 % вартості нових батарей. Наприклад, ціна кобальту коливається в межах 30–40 \$/кг, а літію – до 70 \$/кг (залежно від ринку та

форми). При цьому витрати на вилучення цих металів із відпрацьованих джерел струму можуть бути на 20–40 % нижчими, ніж при добуванні з руди, особливо в умовах зростаючої вартості енергетичних ресурсів і посилення екологічних обмежень на гірничодобувну промисловість.

У середньому з однієї тонни відпрацьованих літій-іонних батарей можна отримати до 150 кг корисних матеріалів, з яких близько 60–70 кг становлять чорні метали (сталевий корпус, струмознімачі), а решта – кольорові метали й активні компоненти. За даними досліджень, прибуток від переробки однієї тонни батарей залежить від типу технології: гідрометалургія забезпечує найкращий баланс між витратами та вилученням ресурсів, тоді як пірометалургія рентабельна лише за наявності високої концентрації кобальту. Метод прямого відновлення має нижчі витрати, але вимагає високої автоматизації та стандартизації сировини, що обмежує його впровадження на масовому рівні.

Окрім прибутку від матеріалів, переробка створює робочі місця в сфері поводження з відходами, інженерно-хімічного аналізу та виробництва вторинної сировини. Це особливо важливо для країн, які мають обмежені запаси критичних металів, але володіють технологічним потенціалом. Такі держави, як Південна Корея, Японія та Швеція, активно інвестують у локальні підприємства з переробки, щоб зменшити залежність від імпорту рудної сировини з Африки або Південної Америки. У результаті формується циклічна економіка, в якій ресурси зберігаються в обігу значно довше, а відходи набувають нової вартості.

Втім, початкові інвестиції у створення переробних потужностей залишаються високими. За оцінками експертів, вартість відкриття повноцінного заводу з гідрометалургії (потужністю 10 тис. тонн/рік) становить від 30 до 50 млн доларів США. Частково ці витрати компенсуються за рахунок державних субсидій, екологічних пільг або преференцій для компаній, що утилізують небезпечні відходи. Однак для довгострокової рентабельності важливим фактором є масовість збору батарей, стабільний обсяг сировини та автоматизація процесів сортування.

Ще одним важливим економічним індикатором є енергетичні витрати на переробку. Пірометалургійні технології мають найвищі енерговитрати (до 5 МВт·год

на 1 тонну), що підвищує вартість процесу і викиди CO₂. Натомість гідрометалургія споживає вдвічі менше енергії, а метод прямого відновлення – ще менше, що робить його перспективним з економічного боку в умовах дорогих енергоносіїв [25].

Економічна доцільність переробки літій-іонних батарей залежить від поєднання цінової кон'юнктури, масштабу виробництва, обраної технології та регуляторного середовища. За умови підтримки державної політики та розбудови логістичної інфраструктури переробка здатна стати ключовим сектором нової, зеленої економіки.

4 ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЛУЖНИХ І СОЛЬОВИХ БАТАРЕЙ

Лужні та сольові манган-цинкові батареї, які широко використовуються у різноманітних пристроях, подібні за робочим хімізмом процесу, але мають і свої відмінності. Це в першу чергу зумовлено експлуатаційними характеристиками (щільність енергії, потужність, термін експлуатації) та доцільністю їх практичного використання у різноманітних приладах. Таким чином, ці два типи батарей, що є найбільш поширеними завдяки доступності вихідної сировини, простій технології виготовлення, низькій кінцевій вартості, зручності використання та задовільним електричним параметрам, не виключають, а лише взаємно доповнюють своє раціональне використання у різноманітних галузях діяльності людини.

Існуючі технології переробки відпрацьованих батарей можна представити як механічне подрібнення батарей (I етап) з наступним використанням піро-, гідрометалургійних та біотехнологічних процесів переробки (II етап) [25,26]. Серед найбільш поширених методів сучасної переробки батарей необхідно відзначити механічне розділення, гідрометалургійні, пірометалургійні процеси, а також біотехнології вилучення металів із первинних продуктів переробки.

На рис. 4.1 наведені основні стадії механічної переробки малих батарей. Однак, при цьому необхідно враховувати, що кожна із наведених стадій може включати додатково 2-3 технологічні операції, що робить цей метод енергетично та матеріально затратним. Однак, при переробці відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) цей метод дуже важливий для отримання легких шредерних фракцій (SLE) та виділення цілої низки металів, їх оксидів, зокрема і благородних [28]. Такі SLE-фракції, які через свою неоднорідність (Cu, Mg, Na, Ni, Co, Ti, Pb, Ba, Sr, Zr, Sn, Au, Ag) та фізико-хімічні властивості не мали досліджених методів переробки, було досліджено з використанням періодичного та безперервного методу піролізу в інтервалі температур 600–850 °C. В кінці процесу було виділено 50% твердої маси, що складалась із ключових металів, включаючи Cu, Zn, Pb, Au, Ag, тоді як концентрація токсичних Cl і Br знизилась, відповідно, до 45 та 73 % мас. Автори

роботи [28] рекомендували промислове використання SLE-фракції у металургійній промисловості.

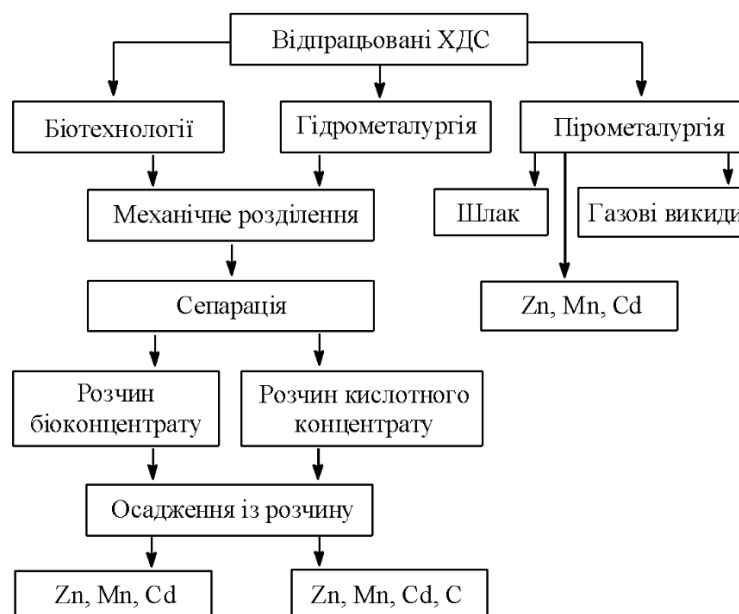


Рисунок 4.1 – Основні стадії переробки відпрацьованих батарей механічним розділення

Пірометалургійна переробка відходів батарей включає їх термічну обробку (розплавлення металів або їх переведення у газоподібний стан; спалювання та розкладання органічних сполук; термічну десорбцію електrolітів), як правило, за температури 500–800 °C [26], [29]. Витримування складових відпрацьованих батарей за температури 500–800 °C видаляє вологість (H_2O) та може окиснювати сполуки металів до відповідних оксидів, або розкласти MnO_2 з утворенням Mn_2O_3 і кисню. Пряма плавка вище 1000 °C відокремлює Zn і Mn від шламу, але при цьому включає суттєві втрати цинку [30]. Важливо, що термічна десорбція, наприклад, електrolітів може вибірково відновлювати та випаровувати високотоксичну ртуть уже за температури 300–500 °C, тобто незначного їх нагрівання [26]. В роботі [27] наведені результати комбінованого методу переробки відпрацьованих батарей: механічного розділення батарей та піролізного методу (500–800 °C), які забезпечують 87 % повторного використання вилучених металів.

Гідрометалургійні процеси – це хімічна взаємодія металів відпрацьованих батарей (кислотне та лужне вилуговування) у водних розчинах з наступним їх розділенням (осадження, екстракція) та очищенням (кристалізація, електроліз) [24]. Особливістю цієї технології є селективна хімічна взаємодія металів при їх виділенні із різних типів відпрацьованих ХДС. Такі хімічні перетворення/ процеси можуть бути складними, багатостадійними та створювати при цьому значні проблеми утворення великої кількості стічних вод [31,36]. При цьому вилуговування, як основний процес гідрометалургійної переробки, включає [32]:

- кислотне вилуговування, найчастіше використовують H_2SO_4 . Частково розчиняє оксиди Zn і Mn, що дозволяє вилучити понад 86 % Zn і 13-40 % Mn;
- лужне вилуговування, найчастіше використовують NaOH. Вилучення Zn складає 38-83 %, а $\text{Mn} < 1$ %, що вказує на високу селективність процесу;
- комплексоутворююче вилуговування, використовують аміакатні ліганди для утворення розчинних комплексів Zn, що забезпечує селективне його вилучення до 83 % в м'яких умовах;
- відновне кислотне вилуговування з використанням глюкози. Досягається вилучення 100 % Zn 98 % Mn.

Так, в роботі [35] досліджено виділення Zn, Mn із відпрацьованих батарей гідрометалургійним методом (рис. 4.2).

Перша стадія переробки включає механічне розділення (подрібнення, просіювання) з отриманням тонкої фракції (Fe, Zn, Mn) та скрапу (чорні метали, пластик, папір). Вилуговування тонкої фракції проводили 0,5М розчином H_2SO_4 , а розділення Zn і Mn екстракцією кислотного фільтрату з використанням ДЕНРА/Д2ЕГФК, ді(2-етилгексил)фосфату, як активного та селективного екстрагента металів. Виділення Zn проводили відгонкою ДЕНРА з наступним його електролізом із відповідних електрохімічних розчинів. Наведений метод дозволяє вилучити 100 % Zn та 80 % Mn. Переробка грубої фракції (скрапу) та інших сполук Fe в цій роботі детально не розглядались.

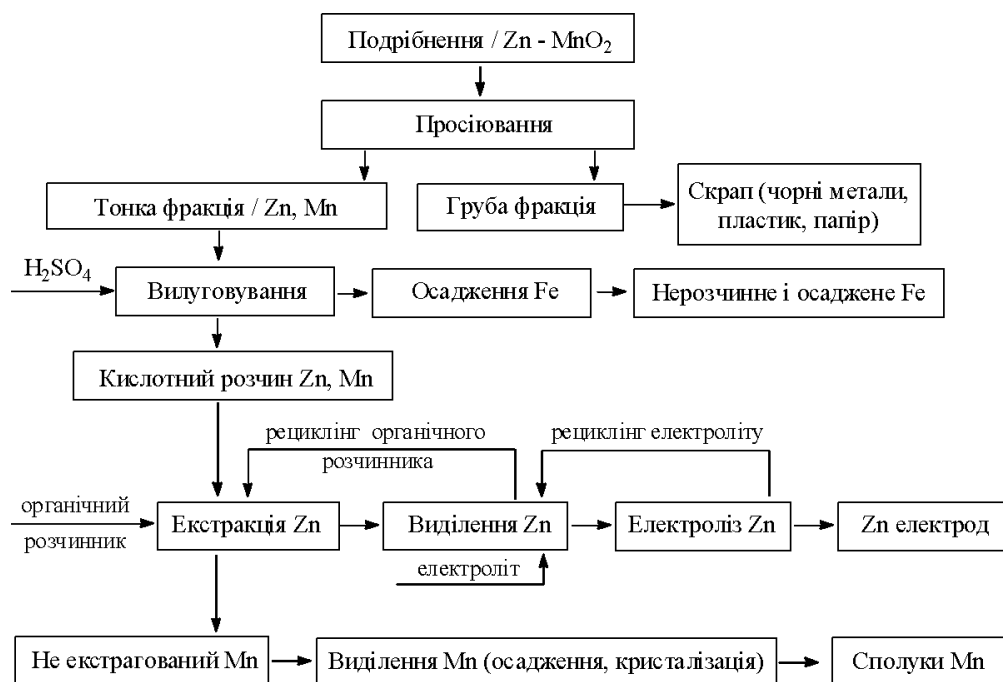


Рисунок 4.2 – Загальна схема гідрометалургійного рециклінгу відпрацьованих Zn – MnO₂ батарей

В роботі [36] було досліджено гідрометалургійне виділення K, Zn, Mn з відпрацьованих лужних батарей після їх подрібнення та вилугування чорної маси (суміш анода, катода і електроліту) з розміром частинок < 1 мм. Стадійність процесу вилугування наведена на рис. 4.3, а вміст металів в отриманих твердих фракціях (ТФ-I–ТФ-III) та розчинах – у табл. 4.1.

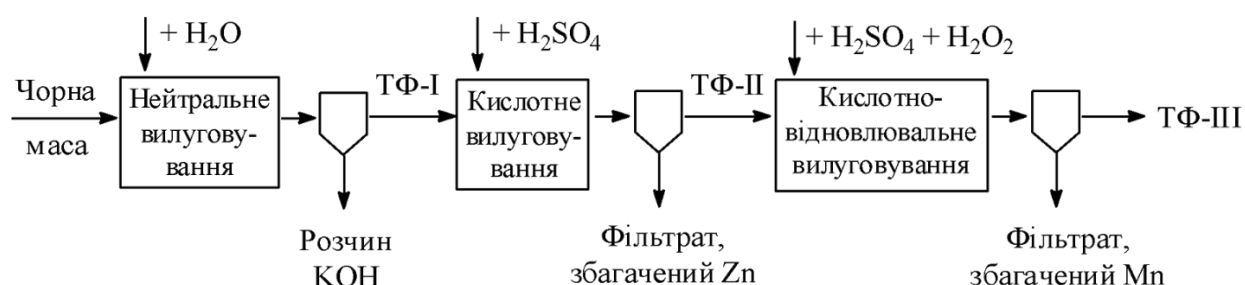


Рисунок 4.3 – Загальна схема виділення K, Zn, Mn із відпрацьованих лужних батарей гідрометалургійним методом

Вилугування проводили у три стадії. При цьому вилугуванням із нейтрального розчину (H₂O, I стадія) виділено $76,8 \pm 3,4\%$ мас калію; вилугуванням

із кислотного розчину (2М H₂SO₄, II стадія) виділено 90,9 ± 0,1 % мас. цинку і 0,4 % мас. мангану, а вилуговуванням із кислотного-відновлювального розчину (2М H₂SO₄ + 0,8М H₂O₂, III стадія) виділено 8,7 ± 0,1 % мас. цинку і до 49,4 ± 0,2 % мас. мангану.

Таблиця 4.1 – Вміст металів у твердих та рідких фазах на різних стадіях процесу [35]

Компоненти	Маса металів, г						
	чорна маса	нейтральне вилуговування		кислотне вилуговування		кисотно-відновлювальне вилуговування	
		ТФ-I	розчин KOH	ТФ- II	фільтрат, збагачений Zn	ТФ- III	фільтрат, збагачений Mn
Калій K	45,5	9,1	36,4	1,4	7,7	0,6	0,8
Цинк Zn	240,9	240,9	—	21,7	219,2	4,8	16,9
Манган Mn	327,2	327,2	—	209,4	117,8	13,1	196,3

В роботі [22] досліджено гідрометалургійне вилучення Zn, MnO₂ та електроліту NH₄Cl, ZnCl₂, [Zn(NH₃)₂]Cl₂ вилуговуванням всіх складових окрім металів (металевий корпус, контакти, цинковий анод) розчином HCl ~ 0,3М. Батарея AAR6 (Panasonic, Varta) підлягали послідовному механічному розділенню на I стадії їх переробки, що дозволило отримати не суміш всіх складових відпрацьованих батарей (суміш грубої і тонкої фракції шредерного подрібнення), а окремі фракції всіх складових. Таке розділення на I стадії визначило подальший їх рециклінг, загальна схема якого наведена на рис. 4.4. Так, вилуговування на II стадії дозволило отримати водний розчин з максимальним вмістом Zn²⁺ і NH₄⁺-іонів, які при додаванні еквівалентної кількості натрій ортофосфату утворювали нерозчинну у воді сіль:



Регенерацію марганцевого аноду MnO(OH) проводили витриманням його у кварцовому тиглі за температури 300–325 °С протягом 60 хвилин, а відокремлену пластиково-паперову фракцію переробляли низькотемпературним піролізом (300–410 °С) з отриманням піролізної рідини 67 %, пірокарбону 23 % та газової суміші 8 % за масою [21]. Металевий брухт автори [22] рекомендували використовувати в металургійній (стальний корпус, контакти) та електротехнічній (цинковий анод) галузях промисловості.



Рисунок 4.4 – Загальна схема комплексної переробки відпрацьованих MnO_2 – Zn батарей

Умовні скорочення: 1 стадія – механічне розділення; 2 стадія – відмивання електролізу $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + [\text{Zn}(\text{NH}_3)_2]\text{Cl}_2$; 3 стадія – отримання подвійної солі NH_4ZnPO_4 ; 4 стадія – регенерація $\text{Mn}(\text{O})\text{OH}$; 5 стадія – піроліз без доступу кисню повітря.

Біотехнологічні методи переробки батарей ґрунтуються на використанні мікроорганізмів/ бактерій *Aspergillus pergillus ferrooxidous* [37], або грибів *Aspergillus viger* [38] для вибіркового біовилуговування металів. На сьогодні можна лише стверджувати, що вони є найбільш екологічно чистими та найменш матеріально затратними із тих, що використовуються. Але не зважаючи на це, вони є найменш вивченими та потребують додаткових системних досліджень. [39]

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз основних типів побутових батарей: кнопочних, акумуляторних, лужних і цинково-вуглецевих. Для кожного типу проаналізовано хімічний склад, особливості конструкції та характерні екологічні ризики. Особливу увагу приділено токсичним елементам у складі елементів живлення – свинцю, ртуті, кадмію, літію – які у разі потрапляння у навколишнє середовище порушують природний баланс ґрунтів, води та біоти. Досліджено негативний вплив відпрацьованих батарейок на довкілля при неналежній утилізації. Встановлено, що неконтрольоване захоронення або зберігання джерел струму сприяє забрудненню підземних вод, зниженню родючості ґрунтів, деградації біосистем, біомагніфікації токсичних речовин у харчових ланцюгах. Підтверджено високий рівень екологічної небезпеки від електролітів, які можуть виділяти агресивні сполуки (HF, PF₅) навіть у малих кількостях.

Розглянуто сучасний стан нормативно-правового регулювання у сфері поводження з батареями в Україні та ЄС, проаналізовано ключові законодавчі акти. Правова база поступово адаптується до вимог екологічної безпеки, однак потребує подальшого удосконалення та інтеграції механізмів контролю, маркування, збору й переробки батарейок, з урахуванням європейських підходів до сталого розвитку.

У процесі написання бакалаврської кваліфікаційної роботи було всебічно проаналізовано екологічні аспекти, що супроводжують переробку літій-іонних батарей, з урахуванням сучасного стану проблеми в Україні та світі. Встановлено, що зростання масштабів електрифікації транспорту, енергетики та цифрових технологій зумовлює стрімке накопичення відпрацьованих літієвих джерел струму, які містять стратегічно важливі метали — літій, кобальт, нікель, мідь. Було доведено, що переробка таких батарей є не лише вимогою екологічної безпеки, а й джерелом вторинної сировини, що сприяє розвитку циркулярної економіки та зменшенню залежності від первинного видобутку.

Проаналізовано основні компоненти літій-іонних батарей, їхню масову частку та токсикологічні характеристики. Встановлено, що понад половина маси акумулятора

припадає на метали, які можуть бути ефективно вилучені за умови застосування сучасних технологій переробки. Окрему увагу приділено органічному електроліту — найбільш небезпечному з точки зору довкілля компоненту, що потребує спеціальних методів знешкодження.

Розглянуто технологічні підходи до переробки батарей: пірометалургію, гідрометалургію та метод прямого відновлення. Показано, що кожен з методів має свої переваги й обмеження залежно від типу батарей, рівня технологічного забезпечення та екологічних вимог. Особливої уваги заслуговують комбіновані схеми переробки, які дозволяють досягти високого рівня вилучення металів (до 90–95%) і мінімізувати шкідливі викиди. Визначено, що комбіновані технології є найперспективнішими для впровадження в українських умовах, з урахуванням обмежених ресурсів і необхідності адаптації до стандартів ЄС.

Проаналізовано екологічні та економічні аспекти поводження з відпрацьованими літій-іонними батареями. Встановлено, що неналежна утилізація таких відходів становить серйозну загрозу для довкілля, зокрема через ризик виділення токсичних газів, забруднення ґрунтів і води важкими металами, а також можливість виникнення пожеж та вибухів унаслідок термічного розгону. Доведено, що літій-іонні батареї мають складний хімічний склад і високу токсикологічну активність, що вимагає спеціалізованих технологій переробки та ретельного контролю.

У порівняльному аналізі методів переробки – пірометалургії, гідрометалургії та прямого відновлення – акцент зроблено на їхню екологічну ефективність. Визначено, що метод прямого відновлення має найменший екологічний слід, але водночас потребує високої точності сортування та автоматизації. Найбільш поширені технології — пірометалургічні — характеризуються значними викидами CO₂ та втратами цінних компонентів, зокрема літію. Гідрометалургія демонструє кращу ресурсоефективність, однак вимагає очищення токсичних стоків. Перспективним є поєднання цих методів у гібридних схемах з метою досягнення оптимального балансу між рентабельністю та безпечністю.

Також розглянуто особливості переробки відпрацьованих лужних та сольових батарейок, які є одними з найпоширеніших типів первинних джерел струму в побуті.

На прикладі аналізу хімічного складу батарейок типу LR03 (AAA) та A27 показано, що вони містять значну кількість цинку, марганцю та лужних електролітів, які можуть бути вилучені та повторно використані в промисловості. Показано доцільність застосування комбінованих схем, які включають сортування, подрібнення, магнітну сепарацію та хімічне вилуговування, що дозволяє підвищити загальний рівень утилізації до 80–90%. Також розглянуто аспекти безпечного знешкодження залишків електроліту та пластикових компонентів, що залишаються після вилучення металеві фракції.

Результати дослідження можуть бути використані для подальших техніко-економічних обґрунтувань побудови підприємств з утилізації літій-іонних батарей, розробки проєктів рекуперації цінних металів та формування нормативної бази для поводження з небезпечними відходами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Battery University – Battery Chemistries Overview. Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/articles>
2. Technical Handbook for Manganese Dioxide Batteries. Режим доступу: <https://industry.panasonic.eu/storage/custom-upload/Energy%20%26%20Building/Batteries/Primary%20Batteries/Lithium%20Batteries/Panasonic%20Lithium%20Batteries%20Handbook.pdf>
3. VARTA Battery Data Sheet – R6 (Zinc-Carbon). Режим доступу: <https://www.varta-ag.com/en/consumer/product-categories/batteries/zinc/super-heavy-duty-aa>
4. Pultz R. (2020). Analyse des Anfalls und der Entsorgung von Altbatterien in Österreich (Doctoral dissertation, Wien).
5. Manthiram, A. (2017). An outlook on lithium ion battery technology. ACS central science, 3(10), 1063-1069.
6. McManus, M. C. (2012). Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. Applied Energy, 93, 288-295.
7. Закон України «Про управління відходами» № 2320-IX від 20.06.2022. – Відомості Верховної Ради України, 2022.
8. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 on batteries and waste batteries.
9. Battery Regulation Summary. European Commission, 2023.
10. Amnesty International. This is what we die for: Human rights abuses in cobalt supply chains. – London, 2016.
11. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2023. – Paris: IEA, 2023.
12. Кірпа Я. М., Середя В. А. Електрохімічні джерела струму та їх утилізація. – Дніпро: НГУ, 2019.
13. Шепель Т. М. Фізико-хімічні основи переробки акумуляторних батарей. – Львів: ЛНУ, 2020.
14. Georgi-Maschler T. et al. "Development of a recycling process for Li-ion batteries." Journal of Power Sources, 2012.

15. Курс лекцій з екологічної хімії. Національний університет "Львівська політехніка".
16. Гребенюк Г. С., Дьяків Г. В. Хімічна технологія та утилізація відходів. – Київ: Либідь, 2021.
17. Harper G. et al. "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles." *Nature*, 575, 2021.
18. Zeng, X., Li, J., Singh, N. Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. – *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44.10 (2014): 1129-1165.
19. Georgi-Maschler, T. et al. Recycling of lithium-ion batteries: A review of the state of the art. – *Journal of Power Sources*, 207 (2012): 173-182.
20. European Environment Agency (EEA). Battery waste management in the EU: Status and outlook. – EEA Report No 7/2020.
21. Гребенюк Г. С., Дьяків Г. В. Хімічна технологія та утилізація відходів: Підручник. – Київ: Либідь, 2021. – Розділ 8: Переробка електрохімічних джерел струму.
22. Life cycle analysis of lithium-ion battery recycling: Environmental impact and economic feasibility. – *Resources, Conservation and Recycling*, 136 (2018): 58-66. (Національна лабораторія ім. Лоуренса, США)
23. Gaines, L. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. – *Sustainable Materials and Technologies*, 1-2 (2014): 2-7.
24. Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., Wang, M. Life cycle analysis of lithium-ion battery recycling. – *Resources, Conservation and Recycling*, 136 (2018): 58-66.
25. Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., Rutz, M. Development of a recycling process for Li-ion batteries. – *Journal of Power Sources*, 207 (2012): 173-182.
26. E. Sayilgan, T. Kukrer, G. Civelekoglu, F. Ferella, A. Akcil, F. Veglio, and M. Kitis, "A review of technologies for the recovery of metals from spent alkaline and zinc-carbon batteries," *Hydrometallurgy*, vol. 97, iss. 3-4, pp. 158-166, 2009.

27. P. Gasper, J. Hines, J.-P. Miralda, R. Bonhomme, J. Schaufeld, D. Apelian, and Y. Wang, "Economic feasibility of a mechanical separation process for recycling alkaline batteries," *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, vol. 16, iss.4, pp. 297-304, 2013.
28. F. Diaz, D. Latacz, and B. Friedrich, "Enabling the recycling of metals from the shredder light fraction derived from waste of electrical and electronic equipment via continuous pyrolysis process," *Waste Management*, vol. 172, pp. 335-346, 2023.
29. A. Hodžić, G. Veinović, A. Alić, D. Seki, M. Kunert, G. Nikolov, R. Sukara, J. Šupić, S. Tomanović, and D. Berry, "A metalloprotease secreted by an environmentally acquired gut bacterium hinders *Borrelia afzelii* colonization in *Ixodes Ricinus*," *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, vol. 14, pp. 1476266, 2024.
30. X. Hu, A. Robles, T. Vikström, P. Väänänen, M. Zackrisson, and G. Ye, "A novel process on the recovery of zinc and manganese from spent alkaline and zinc-carbon batteries," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 411, pp. 124928, 2021.
31. S. M. Sadeghi, J. Jesus, and H. M. V. M. Soares, "A critical updated review of the hydrometallurgical routes for recycling zinc and manganese from spent zinc-based batteries," *Waste Management*, vol. 113, pp. 342–350, 2020.
32. D. da S. Leite, P. L. G. Carvalho, L. R. de Lemos, A. B. Mageste, and G. D. Rodrigues, "Hydrometallurgical recovery of Zn(II) and Mn(II) from alkaline batteries waste employing aqueous two-phase system," *Separation and Purification Technology*, vol. 210, pp. 327-334, 2019.
33. L.-H. Tran, K. Tanong, A. D. Jabir, G. Mercier, and J.-F. Blais, "Hydrometallurgical process and economic evaluation for recovery of zinc and manganese from spent alkaline batteries," *Metals*, vol. 10, iss. 9, pp. 1175, 2020.
34. W.-Sh. Chen, Ch.-T. Liao, and K.-Y. Lin, "Recovery Zinc and Manganese from Spent Battery Powder by Hydrometallurgical Route," *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 167-174, 2017.

35. M. B. J. G. Freitas, V. C. Pegoretti, and M. K. Pietre, "Recycling manganese from spent Zn-MnO₂ primary batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 164, iss. 2, pp. 947-952, 2007.
36. N. M. García, B. D. Cano, J. L. Valverde, M. Heitz, and A. A. Ramirez, "Extraction and separation of potassium, zinc and manganese issued from spent alkaline batteries by a three-unit hydrometallurgical process," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 99, iss. 7, pp. 1553-1563, 2024.
37. F. Moosakazemi, S. Ghassa, M. Jafari, and s. C. Chelgani, "Bioleaching for recovery of metals from spent batteries – A review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 44, iss. 7, pp. 511-521, 2023.
38. B. K. Biswal, and R. Balasubramanian, "Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial for bioleaching: a review," *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, pp. 1197081, 2023.
39. Ранський А. П., Гордієнко О. А., Іщенко В. А., Томчук М. М. Лужні і сольові хімічні джерела струму: порівняльний аналіз та їх рециклінг. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 28 с.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Екологічна безпека поводження з відпрацьованими батареями в Україні

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,46 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.
(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку (підпис)

Матусяк М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник (підпис) Іщенко В.А.

Здобувач (підпис) Томчук М.М.

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ
БАТАРЕЯМИ В УКРАЇНІ**

Таблиця Б.1 – Типи побутових батарей та їх склад

Тип батареї	Катод	Анод	Електроліт
LR6 (AA)	MnO ₂ (~40-45%)	Zn (~15-20%)	KOH (~10-12%)
LR03 (AAA)	MnO ₂ (~40-45%)	Zn (~15-20%)	KOH (~10-12%)
A27 (MN27)	MnO ₂ (~30-35%)	Zn (~15-18%)	KOH (~10%)
A23 (MN21/23)	MnO ₂ (~30-35%)	Zn (~15-18%)	KOH (~10%)
AG13 (LR44)	MnO ₂ (~32-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG4 (LR626)	MnO ₂ (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG10 (LR1130)	MnO ₂ (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
AG3 (LR41 / L736)	MnO ₂ (~30-33%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-13%)
G12A (LR43)	MnO ₂ (~32-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-13%)
AG1 (LR621)	MnO ₂ (~30-34%)	Zn (~10-12%)	KOH (~10-14%)
R6 (AA)	MnO ₂ (~35-45%)	Zn (~22-26%)	NH ₄ Cl + ZnCl ₂ (~25-30%)
R03 (AAA)	MnO ₂ (~35-40%)	Zn (~20-25%)	NH ₄ Cl + ZnCl ₂ (~25-30%)
R14 (C)	MnO ₂ (~35-40%)	Zn (~25-30%)	NH ₄ Cl + ZnCl ₂ (~25-30%)
R20 (D)	MnO ₂ (~35-40%)	Zn (~25-30%)	NH ₄ Cl + ZnCl ₂ (~25-30%)
6F22 (9V)	MnO ₂ (~35-40%)	Zn (~25-30%)	NH ₄ Cl + ZnCl ₂ (~25-30%)
SR389	Ag ₂ O (~40-50%)	Zn (~10-15%)	KOH або NaOH
CR2016/2032	MnO ₂ (~40-45%)	Li (~3-5%)	LiPF ₆ , LiClO ₄ (~15-20%)
HR6 (Ni-MH)	NiOOH (~35-40%)	MH (~25-30%)	KOH (~10%)
HR03 (Ni-MH)	NiOOH (~35-40%)	MH (~25-30%)	KOH (~10%)
Ni-Cd AA	NiOOH (~30%)	Cd (~20%)	KOH (~10%)
Li-ion	LiCoO ₂ (~35-45%)	Graphite (~10-15%)	LiPF ₆ (~20%) в орг. розчиннику

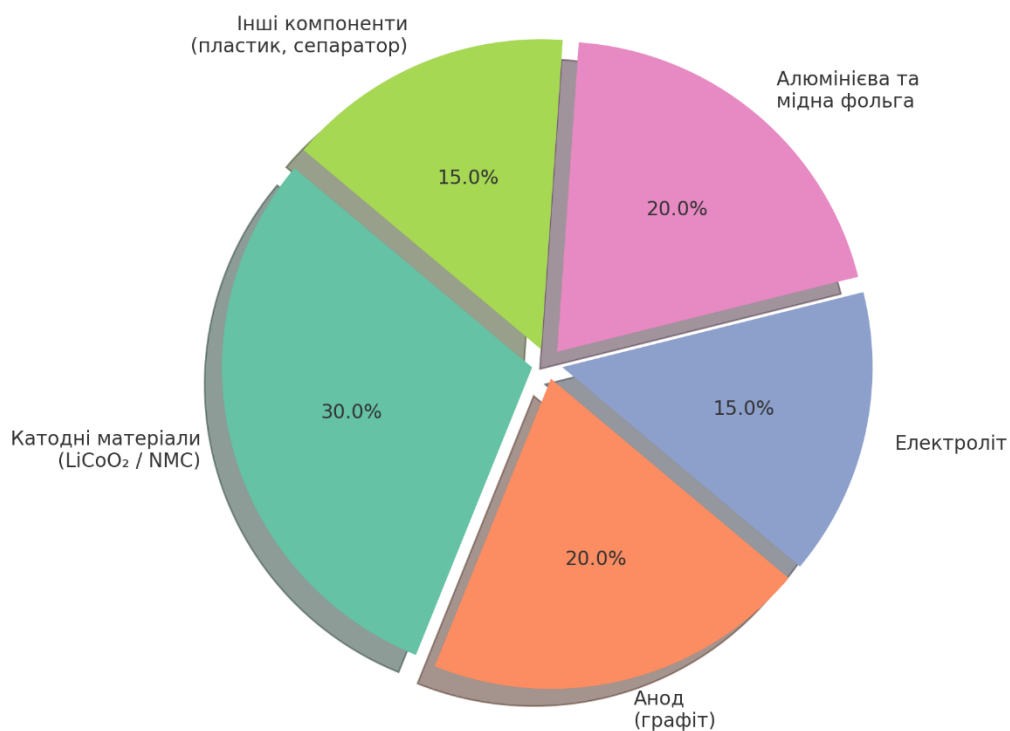


Рисунок Б.1 – Орієнтовний склад компонентів у типовій відпрацьованій літій-іонній батареї

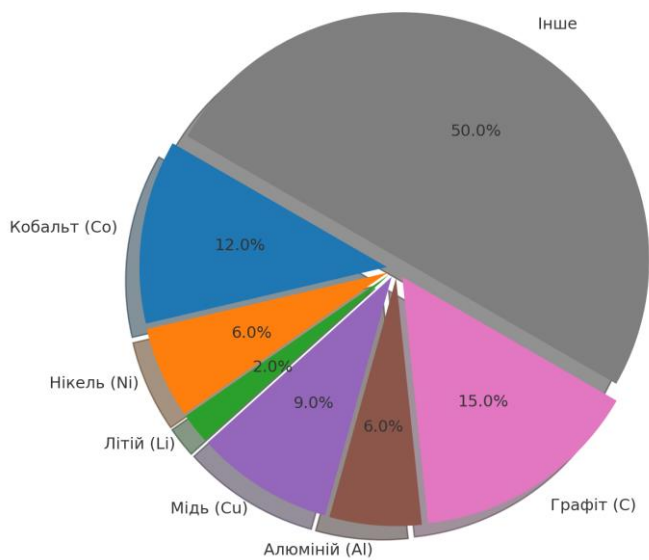


Рисунок Б.2 – Масовий вміст ключових металів у літій-іонній батареї