ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 504.062:661.8 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.407

© В.Є. Чайка[1], А.В. Павличенко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЕКОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНІ КРИТЕРІЇ ВИБОРУ СПОСОБУ ВИЛУГОВУВАННЯ ЦИНКУ ТА МАРГАНЦЮ З ВІДПРАЦЬОВАНИХ БАТАРЕЙОК

V. Chaika[1], https://orcid.org/0009-0006-5372-7109
A. Pavlychenko[1] https://orcid.org/0000-0003-4652-9180
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL CRITERIA FOR SELECTING A ZINC AND MANGANESE LEACHING METHOD FOR SPENT BATTERIES

Мета. Обґрунтувати критерії вибору способу вилуговування цинку та марганцю з відпрацьованих лужних батарейок з урахуванням вилучення металів у кінцеві продукти, споживання ресурсів і утворення вторинних відходів.

Методика. Застосовано цільовий порівняльний аналіз експериментальних публікацій, узгодження одиниць вимірювання, балансовий підхід та сценарні розрахунки. Межі технологічного аналізу охоплюють підготовлену активну масу, вилуговування, розділення металів, повернення розчинів і поводження із залишками. Ефективність окремої операції відокремлено від наскрізного вилучення у продукт. Потребу в підживленні розраховано для одного оборотного контуру на одиницю сухої сировини.

Результати. Систематизовано кислотні, кислотно-відновні, лужні, амонійні та біогідрометалургійні способи, а також перспективні системи з глибокими евтектичними розчинниками. Зіставлено їх переваги, обмеження й умови застосування; методи інтенсифікації та очищення розчинів виділено як допоміжні операції. Запропоновано функціональну матрицю. Для модельних співвідношень рідини й твердої фази 5, 10 та 20 літрів на кілограм за частки повернення 0,75 підживлення становить відповідно 1,25, 2,50 та 5,00 літра на кілограм. Ці значення є сценарними й не характеризують експериментальний водний баланс.

Наукова новизна. Встановлено закономірності еколого-технологічного відбору способів вилуговування цинку та марганцю шляхом розмежування обов'язкових вимог до якості продуктів і поводження із залишками та показників порівняння за наскрізним вилученням металів і ресурсними витратами.

Практична значимість. Результати формують основу вибору варіантів для лабораторної перевірки технології комплексної переробки побутових батарейок. Матриця критеріїв визначає необхідні вимірювання для оцінювання витрат води й реагентів, якості продуктів та стійкості залишків. Запропонована процедура не замінює експериментальної валідації й оцінювання життєвого циклу.

Ключові слова: *відпрацьовані батарейки, цинк, марганець, вилуговування, циркулярність, водооборот, вторинні відходи.*

Вступ. Перероблення відпрацьованих лужних батарейок має забезпечувати повернення цинку та марганцю в обіг і контроль вторинних відходів. Розчинення металу є лише проміжною операцією: результат повного маршруту визначають вихід придатного продукту, витрати ресурсів і поводження із залишками.

Дослідження життєвого циклу [1, 2] обґрунтовують необхідність враховувати також виробництво реагентів, енергопостачання та заміщення первинної сировини.

Об’єктом роботи є підготовлена активна маса лужних цинк-марганцевих батарейок. Дані щодо інших електрохімічних систем не використовуються як її кількісні характеристики.

Аналіз попередніх досліджень. Veloso та співавтори [3] поєднали водну підготовку, кислотне вилуговування і розділення металів. Skrzekut та співавтори [4] показали, що спільне розчинення Zn і Mn ускладнює їх подальше селективне осадження. Muñoz García та співавтори дослідили послідовне водне, кислотне й кислотно-відновне оброблення [5], а також лужне та аміачне вилуговування Zn [6]. Інший селективний маршрут ґрунтується на застосуванні хлориду амонію [7].

Роль наступних операцій розкрито в роботах з очищення розчинів [8] та отримання кінцевих продуктів із економічним оцінюванням [9]. Попереднє відокремлення анодного матеріалу [10] зменшує змішування компонентів до хімічного оброблення. Альтернативами є біовилуговування з електрохімічним вилученням [11], ультразвукова й мікрохвильова інтенсифікація [12], двостадійне фракціонування з глибокими евтектичними розчинниками (DES) та протонними іонними рідинами [13]. Полімерні матеріали з DES застосовують для сорбційного розділення іонів у вже отриманому розчині [14].

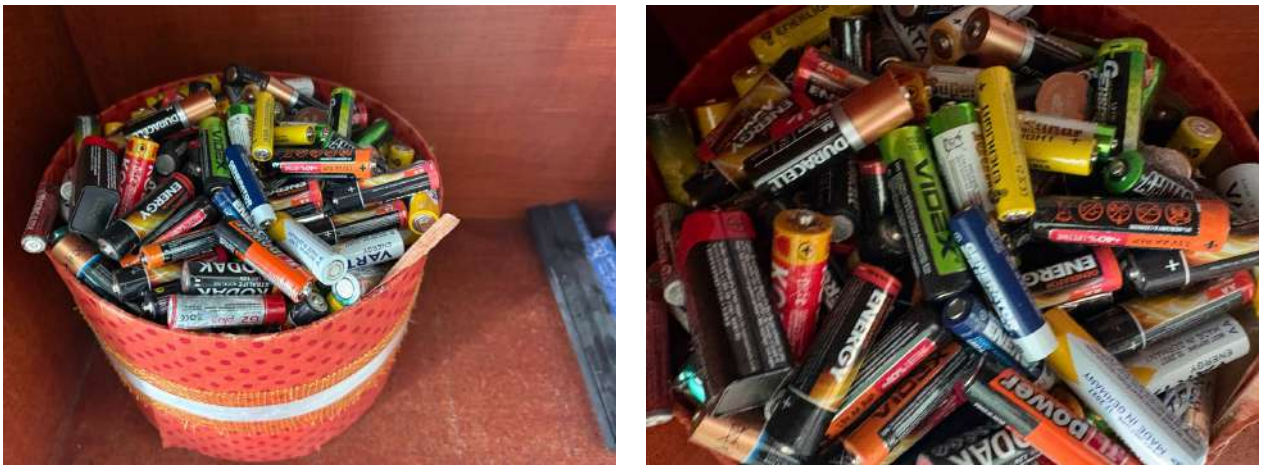
Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Відмінності сировини, режимів і меж процесу ускладнюють пряме порівняння опублікованих показників вилучення. Мета роботи – обґрунтувати критерії вибору способу вилуговування Zn і Mn з урахуванням наскрізного виходу продуктів, ресурсних витрат і поводження з металовмісними потоками.

Основна частина. Виконано цільовий порівняльний аналіз 14 публікацій 2005-2025 років, узгодження одиниць вимірювання та сценарні балансові розрахунки. Добірка охоплює основні способи вилуговування, селективне вилучення, водооборот і життєвий цикл; вона не є вичерпним систематичним оглядом. Якісні зіставлення є інженерною інтерпретацією цих робіт.

Для дослідження використали батарейки, що зібрані зусиллями співробітників НТУ «Дніпровська політехніка» (рис. 1). Розрахункова база – 1 кг сухої підготовленої активної маси без корпусів та інших відокремлених компонентів. Перерахунок на масу цілих батарейок потребує виміряного виходу активної маси й обліку втрат металів під час підготовки. Операційна межа охоплює вилуговування та розділення суспензії, технологічна – також очищення, отримання продуктів, регенерацію розчинів і відходи.

Розчинність компонентів активної маси залежить від фазового складу, ступеня розрядження та попереднього оброблення. Кислотне вилуговування без відновника, лужні й амонійні системи розглядають для переважного вилучення Zn; кислотно-відновний маршрут – для розчинення обох металів або довилучення Mn. Переваги й обмеження маршрутів наведено в табл. 1.

Селективний маршрут потребує окремого рішення щодо Mn-залишку, а спільне вилуговування – подальшого розділення металів. У послідовній схемі виграш селективності зіставляють із додатковими фільтраціями та промиванням [3–9].



а б

Рис. 1. Відпрацьовані побутові батарейки, зібрані на кафедрі екології та технологій захисту навколишнього середовища НТУ «Дніпровська політехніка»: а – загальний вигляд; б – маркування елементів

Таблиця 1

Порівняння технологічних альтернатив і умов їх застосування

Технологія та джерела	**Переваги**	**Обмеження**	**Умови застосування**
Кислотна без відновника	Переважне розчинення Zn; Mn-залишок	Домішки, кислі стоки, солі нейтралізації	Пріоритет Zn; окреме перероблення Mn-залишку
Кислотно-відновна	Спільне розчинення Zn і Mn; довилучення Mn	Відновник, змішаний розчин, осади очищення	Вилучення обох металів із подальшим розділенням
Лужна	Вибіркове розчинення Zn	Концентрований луг, невилучений Zn, солі	Отримання Zn-розчину й оброблення залишку
Амонійна	Селективне вилучення Zn	Азотовмісні потоки; втрати NH_3; хлориди для NH_4Cl	Контроль газових втрат і регенерація
Біологічна	Формування середовища біологічним шляхом	Тривалість, стійкість культури, склад середовища	Кероване культивування; узгодження з електролізом
DES та іонні рідини	Послідовне фракціонування Zn і Mn	Регенерація, втрати розчинника, чистота продуктів	Дослідне порівняння з водними маршрутами
Ультразвук / мікрохвилі	Інтенсифікація: коротші режими оброблення	Енерговитрати й масштабування	Кінетичні обмеження; перевірений енергобаланс
Полімерна сорбція з DES	Поділ іонів після вилуговування	Десорбція, ресурс сорбенту, втрати DES	Додаткове очищення або розділення розчину

Для нових середовищ перевіряють виділення продуктів, втрати розчинника та повторні цикли. Скорочення часу під дією ультразвуку чи мікрохвиль оцінюють разом із виміряними енерговитратами [12–14].

Функціональна матриця (табл. 2) показує призначення операцій: ● – цільова функція; ◐ – можливість залежить від режиму; «-» – не є самостійною функцією. Для ультразвуку й мікрохвиль результат визначає базове хімічне середовище [12]. Матриця не є рейтингом екологічної безпеки.

Таблиця 2

Функціональна матриця технологій перероблення лужних батарейок

Операція	**Переважне вилучення Zn**	**Вилучення Zn і Mn у розчин**	**Довилучення Mn із залишку**	**Поділ іонів у розчині**
Кислотна без відновника	●	◐	-	-
Кислотно-відновна	-	●	●	-
Лужна	●	-	-	-
Амонійна	●	-	-	-
Біогідрометалургійна	◐	●	◐	-
Послідовність DES / іонна рідина	●	●	●	-
Ультразвук / мікрохвилі	◐	◐	◐	-
Полімерна сорбція з DES	-	-	-	●

У табл. 3 розмежовано результати окремих стадій і послідовного оброблення. Інтервали відповідають серіям дослідів; «-» означає відсутність наведеного значення. Показники характеризують розчинення металів, а не вихід чи чистоту продуктів. Порівнювати їх слід з урахуванням сировини та режиму.

Таблиця 3

Приклади вилуговування металів із лужних батарейок за літературними даними

Джерело	**Умови результату**	**Zn, %**	**Mn, %**
Skrzekut та ін. [4], кислотний	Серія без відновника; інтервали різних дослідів	84,8–98,5	0,7–12,3
Skrzekut та ін. [4], кислотно-відновний	Серія з відновником; інтервали різних дослідів	95,6–99,7	83,7–99,3
Muñoz García та ін. [5], кислотна стадія	H_2SO_4 2 моль/л; 25 °C; P:T = 5 л/кг	90,9 ± 0,1	36,7 ± 0,4
Muñoz García та ін. [5], уся послідовність	Послідовна схема; 25 °C; частки від початкового вмісту металів	99,6 ± 0,3	86,1 ± 0,1
Muñoz García та ін. [6], NaOH	6 моль/л; 70 °C; P:T = 5 л/кг	69,9 ± 2,8	-
Muñoz García та ін. [6], аміачна вода	4 моль/л; 25 °C; P:T = 10 л/кг	30,5 ± 0,7	-
Sadeghi та ін. [12], мікрохвильова інтенсифікація	Кислотний режим; H_2SO_4 1 моль/л; один цикл 30 с	94	-
Sadeghi та ін. [12], ультразвукова інтенсифікація	Кислотний режим; H_2SO_4 1 моль/л; 2 хв; амплітуда 20 %	92	-

За даними [4], нейтралізація після спільного вилуговування не забезпечила належного розділення концентратів, тоді як осадження Zn після селективного вилуговування дало кращий результат.

Ступінь вилуговування та наскрізне вилучення металу у продукт визначають окремо:

$$\eta_i = 100 \cdot \frac{m_{i,розч}}{m_0 \cdot w_i}; \quad R_i = 100 \cdot \frac{m_{i,прод}}{m_0 \cdot w_i} \tag{1}$$

де η_i – ступінь вилуговування металу i, %; R_i – наскрізне вилучення металу i у кінцевий продукт, %; $m_{i,розч}$ – маса металу i, що перейшла в розчин у процесі вилуговування, кг; $m_{i,прод}$ – маса металу i у кінцевому продукті, який відповідає заданим вимогам до якості, кг; m_0 – початкова маса сухої підготовленої активної маси батарейок, кг; w_i – масова частка металу i у вихідній сухій сировині, частки одиниці; i – позначення відповідного металу: цинку або марганцю.

Для послідовних стадій із виходами 95, 90 і 95 % наскрізне вилучення становить 0,95 × 0,90 × 0,95 × 100 = 81,225 %. Від початкової кількості металу невилугувана частка дорівнює 5 %, втрати очищення – 9,5 %, отримання продукту – 4,275 % (рис. 2). Це модельний баланс без паралельних потоків.

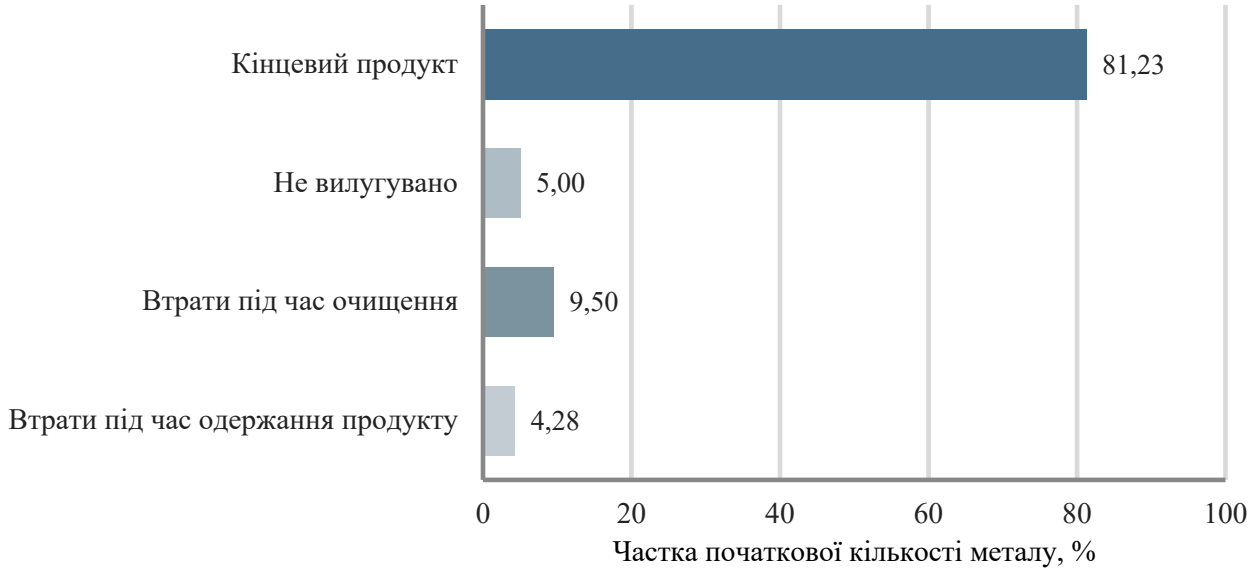


Рис. 2. Розподіл початкової кількості металу за сценарних виходів стадій 95, 90 і 95 %; частки обчислено від однієї початкової бази

Концентрація реагенту не визначає його питомої витрати без урахування об’єму. Початкове завантаження діючої речовини розраховують за формулою:

$$q_{A,зар} = \frac{C_A \cdot V \cdot M_A}{1000 \cdot m_0}, \tag{2}$$

де – $q_{A,зар}$ питоме початкове завантаження реагенту A у перерахунку на чисту діючу речовину, кг/кг сухої сировини; C_A – молярна концентрація реагенту A у вихідному розчині, моль/л; V – об’єм розчину, завантаженого для вилуговування, л; M_A – молярна

маса реагенту A, г/моль; m_0 – початкова маса сухої підготовленої активної маси батарейок, кг; 1000 – коефіцієнт переведення грамів у кілограми; A – позначення відповідного реагенту.

Початкове завантаження відрізняється від споживання в оборотному режимі, яке залежить від реакцій, втрат із продуктами й продувкою та регенерації.

За H_2SO_4 2 моль/л, Р:Т = 5 л/кг і молярної маси 98,08 г/моль початкове завантаження становить 0,981 кг/кг. За тієї самої концентрації та модельного Р:Т = 20 л/кг воно зростає до 3,923 кг/кг. Отже, однакові концентрації можуть відповідати різним питомим завантаженням.

Для розмежування оборотного об'єму та потреби в підживленні розглянуто усталений контур однієї операції. Після очищення й коригування складу частину розчину повертають у наступний цикл:

$$v_{підж} = 1 \cdot (1 - r), \tag{3}$$

де $v_{підж}$ – питомий об'єм рідини, необхідний для підживлення оборотного контуру, л/кг сухої сировини; l – об'єм робочого розчину на одиницю маси сухої сировини, л/кг; r – частка об'єму робочого розчину, що повертається до наступного циклу після очищення та коригування складу, частки одиниці; $(1 - r)$ – неповернена частка об'єму розчину.

У моделі $0 \le r < 1$. Підживлення можна прирівняти до свіжої води лише за відсутності інших джерел рідини та за врахованого або неістотного внеску води з реагентами.

Розглянуто l = 5, 10 і 20 л/кг та r = 0; 0,25; 0,50; 0,75; 0,90 (рис. 3). Втрати з осадом, випаровуванням і продувкою включено до неповерненої частки; окремі контури промивання не враховано. Це розрахункові сценарії, а не рекомендовані режими установки.

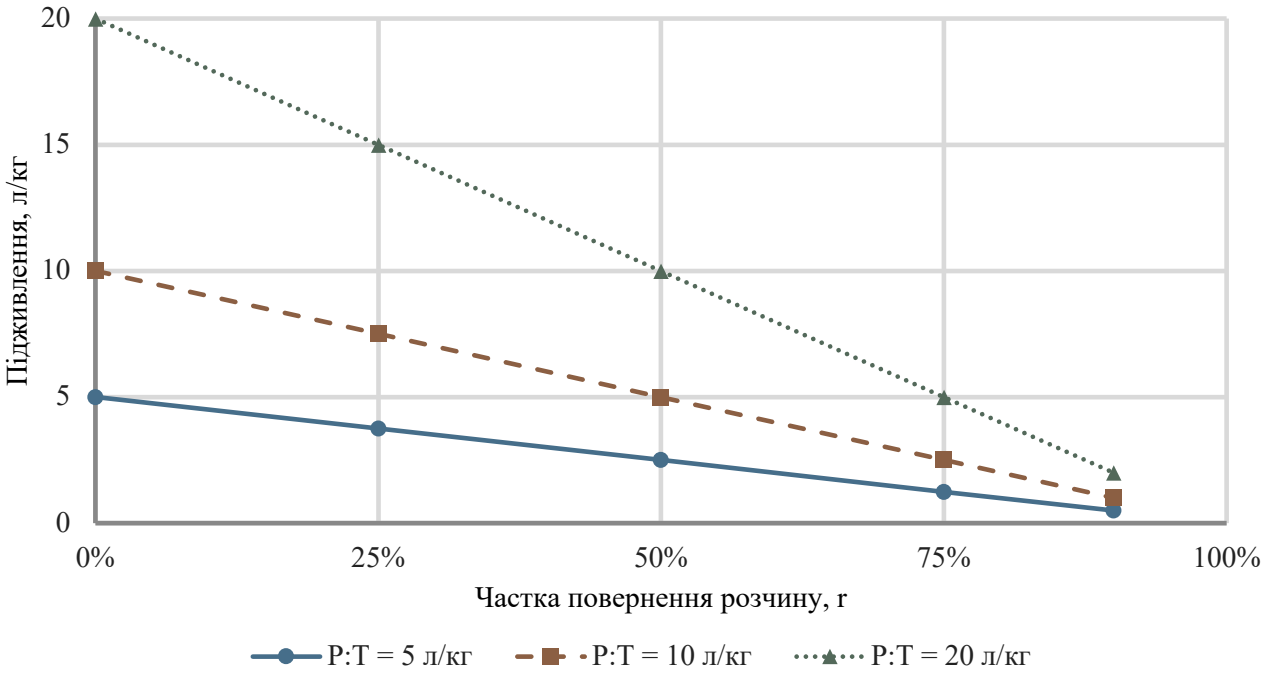


Рис. 3. Потреба в підживленні залежно від повернення розчину за Р:Т = 5, 10 і 20 л/кг

За r = 0,75 підживлення становить 1,25; 2,50 і 5,00 л/кг для l = 5; 10 і 20 л/кг відповідно. Більший робочий об'єм можна компенсувати підвищенням частки повернення, однак об'єми перекачування та очищення залишаються більшими.

Умова компенсації більшого об'єму в маршруті В порівняно з А визначається з нерівності $l_B(1 - r_B) \le l_A(1 - r_A)$. Звідси:

$$r_B \ge 1 - \frac{l_A}{l_B} \cdot (1 - r_A), \qquad (4)$$

де r_B – частка об'єму робочого розчину, що повертається в оборотний контур за технологічним маршрутом В, частки одиниці; r_A – відповідна частка повернення розчину за маршрутом А, частки одиниці; l_A і l_B – об'єми робочого розчину на одиницю маси сухої сировини за маршрутами А та В відповідно, л/кг; A і B – позначення порівнюваних технологічних маршрутів.

За l_A = 5 л/кг, r_A = 0,50 і l_B = 20 л/кг необхідно $r_B \ge 0{,}875$. На цій межі підживлення обох маршрутів становить 2,50 л/кг, повернення - 2,50 л/кг для А та 17,50 л/кг для В (рис. 4). Досяжність повернення 87,5 % перевіряють у повторних циклах з урахуванням домішок і продувки.

Критерії поділено на умови допустимості та показники порівняння (табл. 4). Обов'язковими є придатність сировини, можливість отримання продуктів заданої якості та визначений напрям поводження з усіма залишками. Ресурсні витрати порівнюють у спільних межах без довільного зведення води, енергії й токсичності до одного бала.

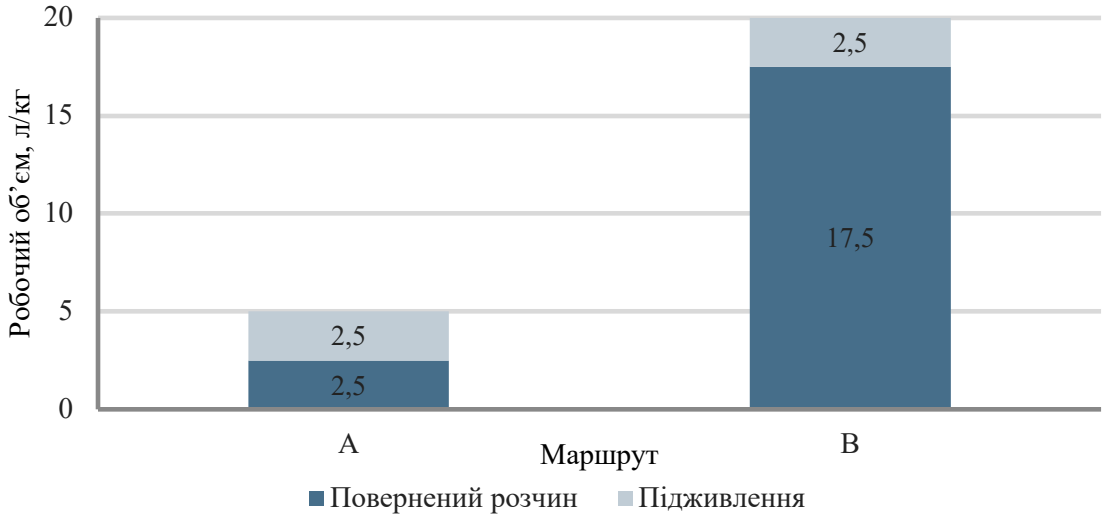


Рис. 4. Повернений розчин і підживлення маршрутів А та В за однакового підживлення 2,50 л/кг; rA = 0,50, rB = 0,875

Спочатку визначають склад сировини та вимоги до продуктів, потім формують придатні маршрути й баланси всіх потоків. За однакової якості продуктів відсіюють варіант, що потребує не менше ресурсів, утворює не менше відходів і не забезпечує вищого вилучення, якщо хоча б за одним показником він гірший. Варіанти з різними перевагами порівнюють за умовами конкретного майданчика.

Таблиця 4

Матриця попереднього еколого-технологічного відбору

Критерій	**Необхідні дані**	**Правило використання**
Придатність сировини	Походження, вологість, Zn, Mn, домішки, фазовий склад	Перевірка застосовності даних; несумісні потоки розділяють
Наскрізне вилучення	R для Zn і Mn; маса й специфікація продуктів	Порівнюють повні маршрути для однакового призначення продукту
Селективність	Маса домішок у розчині та продукті; втрати очищення	Визначають необхідний наступний переділ і його витрати
Витрати реагентів	Свіжі реагенти, кг/кг; регенерація та продувка	Розрізняють початковий заряд і усталене споживання
Водний контур	Підживлення, промивання, повернення, продувка, л/кг	Перевіряють баланс і стабільність повторних циклів
Енерговитрати	Нагрівання, перемішування, очищення, сушіння, кВт·год/кг	Однакові межі; температура не замінює енергобаланс
Вторинні відходи	Сухі залишки, вміст і рухомість металів, розчинені солі	Для кожного потоку визначають використання або оброблення
Повнота доказів	Походження даних, масштаб, повторюваність, похибка	Невідоме значення не приймають за нуль або перевагу

Послідовність попереднього відбору технологічних маршрутів наведено на рис. 5.

Циркулярність оцінюють окремо для металів і технологічних розчинів. Водооборот не компенсує втрати Zn або Mn; повторне використання залишку враховують лише після підтвердження складу, безпечності й призначення [1, 2, 8–10].

Порівняльні досліди доцільно виконувати на розділених пробах однієї усередненої партії. Обліковують метали у продуктах, залишках і відібраних пробах, промивні води та продувку. У повторних циклах контролюють кислотність або лужність, електропровідність, склад домішок і здатність поверненого розчину забезпечувати заданий процес.

Залежності (1)-(4) є балансовими співвідношеннями; авторський внесок полягає в їх узгодженому застосуванні для попереднього відбору. Різні масштаби дослідів, склад сировини та неповні дані про допоміжні потоки обмежують кількісне ранжування. Оцінювання життєвого циклу потребуватиме додаткових даних про реагенти, енергію, транспорт і заміщення первинної сировини.

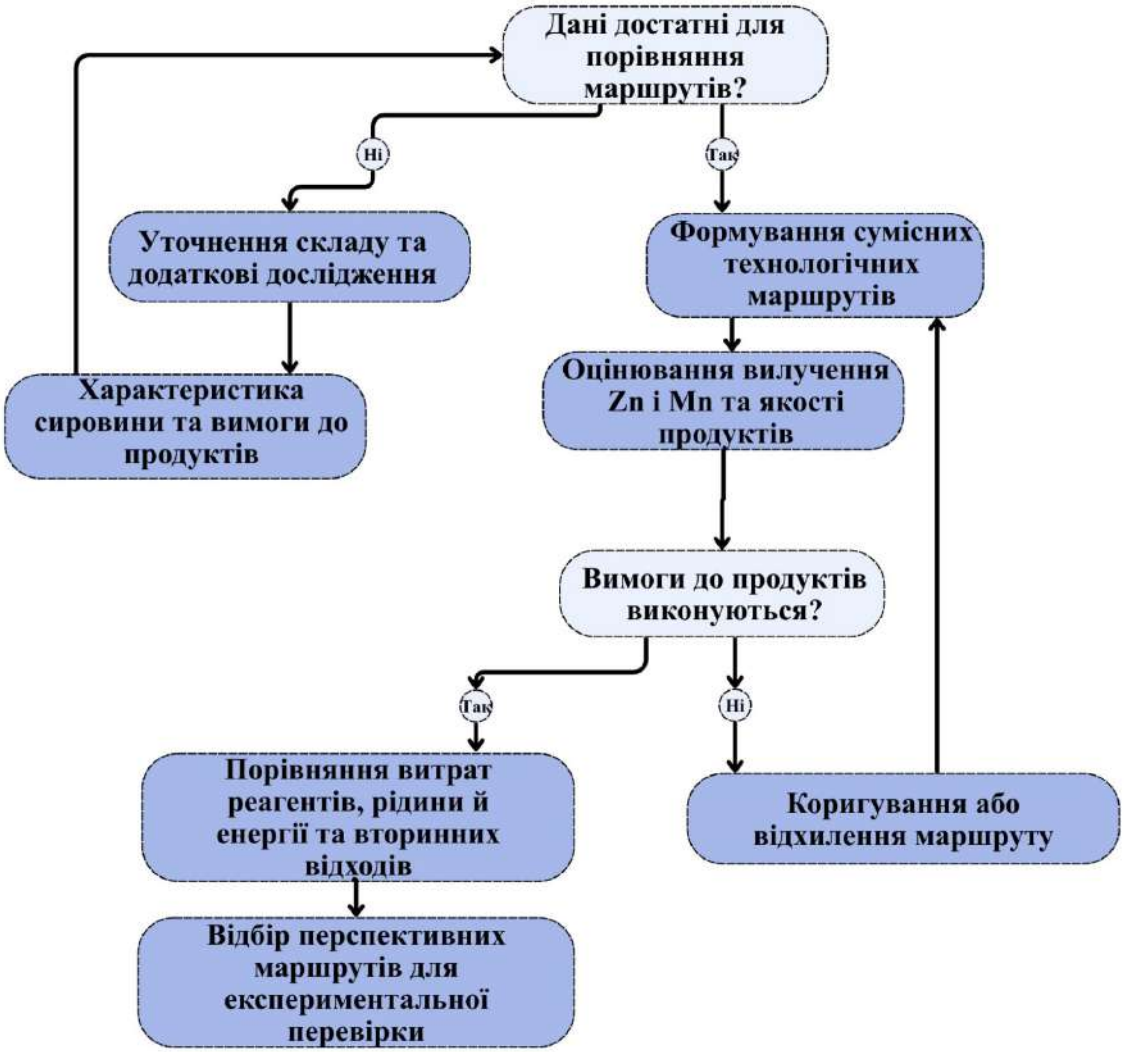


Рис. 5. Алгоритм попереднього еколого-технологічного відбору маршрутів переробки відпрацьованих лужних батарейок

Висновки. Зіставлено основні способи вилуговування Zn і Mn, біогідрометалургійний підхід та перспективні евтектичні й іонні середовища. Інтенсифікацію та очищення розмежовано з базовими маршрутами за функцією. Вибір визначають селективність, наступне виділення продуктів і можливість повернення середовища.

Запропоновано процедуру відбору за придатністю сировини, наскрізним вилученням, ресурсними витратами та поводженням із залишками. Функціональна матриця доповнює її якісними характеристиками. Циркулярність металів та розчинів оцінюють окремо.

Для модельного Р:Т = 20 л/кг підживлення не більше 2,50 л/кг потребує повернення щонайменше 87,5 % розчину. Умову слід перевіряти за фактичними водним і сольовим балансами. Практичний результат роботи - основа порівняльних дослідів на одній партії сировини з обліком усіх вихідних потоків.

Перелік посилань

1. Xará, S., Almeida, M. F., & Costa, C. (2015). Life cycle assessment of three different management options for spent alkaline batteries. *Waste Management, 43*, 460-484. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.006
2. Tran, H. P., Schaubroeck, T., Swart, P., Six, L., Coonen, P., & Dewulf, J. (2018). Recycling portable alkaline/ZnC batteries for a circular economy: An assessment of natural resource consumption from a life cycle and criticality perspective. *Resources, Conservation and Recycling, 135*, 265-278. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.018
3. Veloso, L. R. S., Rodrigues, L. E. O. C., Ferreira, D. A., Magalhães, F. S., & Mansur, M. B. (2005). Development of a hydrometallurgical route for the recovery of zinc and manganese from spent alkaline batteries. *Journal of Power Sources, 152*(1-2), 295-302. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.133
4. Skrzekut, T., Piotrowicz, A., Noga, P., Wędrychowicz, M., & Bydałek, A. W. (2022). Studies of selective recovery of zinc and manganese from alkaline batteries scrap by leaching and precipitation. *Materials, 15*(11), 3966. https://doi.org/10.3390/ma15113966
5. Muñoz García, N., Delgado Cano, B., Valverde, J. L., Heitz, M., & Avalos Ramirez, A. (2024). Extraction and separation of potassium, zinc and manganese issued from spent alkaline batteries by a three-unit hydrometallurgical process. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 99*(7), 1553-1563. https://doi.org/10.1002/jctb.7649
6. Muñoz García, N., Valverde, J. L., Delgado Cano, B., Heitz, M., & Avalos Ramirez, A. (2024). Selective recovery of zinc from alkaline batteries via a basic leaching process and the use of a machine learning-based digital twin for predictive purposes. *Energies, 17*(24), 6292. https://doi.org/10.3390/en17246292
7. Nogueira, C. A., & Margarido, F. (2015). Selective process of zinc extraction from spent Zn-MnO_2 batteries by ammonium chloride leaching. *Hydrometallurgy, 157*, 13-21. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.07.004
8. Lannoo, S., Vilas-Boas, A., Sadeghi, S. M., Jesus, J., & Soares, H. M. V. M. (2019). An environmentally friendly closed loop process to recycle raw materials from spent alkaline batteries. *Journal of Cleaner Production, 236*, 117612. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117612
9. Tran, L. H., Tanong, K., Jabir, A. D., Mercier, G., & Blais, J.-F. (2020). Hydrometallurgical process and economic evaluation for recovery of zinc and manganese from spent alkaline batteries. *Metals, 10*(9), 1175. https://doi.org/10.3390/met10091175
10. Valdrez, I. V., Almeida, M. F., & Dias, J. M. (2022). Direct recovery of Zn from wasted alkaline batteries through selective anode's separation. *Journal of Environmental Management, 321*, 115979. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115979
11. Ubaldini, S., Kadukova, J., Mrazikova, A., Fornari, P., Luptakova, A., Marcincakova, R., & Pizzichemi, P. (2014). Application of innovative processes for the valorisation of spent alkaline batteries. Chemical Engineering Transactions, 39, 1609-1614. https://doi.org/10.3303/CET1439269
12. Sadeghi, S. M., Vanpeteghem, G., Neto, I. F. F., & Soares, H. M. V. M. (2017). Selective leaching of Zn from spent alkaline batteries using environmentally friendly approaches. Waste Management, 60, 696-705. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.002
13. Koutsoukos, S., Liu, C., Kinhal, K. V., Liu, T., Roche, F. P., & Malaret, F. (2025). Metal recovery from 'black mass' of spent alkaline batteries using aqueous protic ionic liquids and deep eutectic solvents. RSC Sustainability, 3, 5118-5122. https://doi.org/10.1039/D5SU00737B
14. Bożejewicz, D., & Kaczorowska, M. A. (2025). Application of novel polymer materials containing deep eutectic solvents for the separation of metal ions from alkaline battery leachates. Materials, 18(12), 2768. https://doi.org/10.3390/ma18122768

ABSTRACT

Purpose. To substantiate criteria for selecting a zinc and manganese leaching method for spent alkaline batteries, considering metal recovery into final products, resource consumption and secondary waste generation.

Methods. Targeted comparative analysis of experimental publications, unit harmonisation, a balance approach and scenario calculations were applied. The technological analysis covers prepared black mass, leaching, metal separation, solution return and residue management. Individual operation efficiency is distinguished from overall recovery into a product. Make-up demand is calculated for a single recirculating loop per unit of dry feed.

Findings. Acid, reductive acid, alkaline, ammonium-based and biohydrometallurgical methods, together with emerging deep eutectic solvent systems, are compared in terms of advantages, limitations and applicability. Intensification and solution purification are distinguished from the core leaching routes. A functional matrix supports preliminary screening. For model liquid-to-solid ratios of 5, 10 and 20 litres per kilogram, a return fraction of 0.75 gives make-up demands of 1.25, 2.50 and 5.00 litres per kilogram, respectively. These values describe a scenario rather than an experimental water balance.

Originality. Patterns of ecological and technological selection of zinc and manganese leaching methods by distinguishing between mandatory requirements for product quality and residue management and comparison indicators based on through extraction of metals and resource costs have been established.

Practical value. The results provide a basis for selecting options for laboratory testing of a comprehensive household battery recycling process. The criteria matrix identifies measurements required to evaluate water and reagent demand, product quality and residue stability. The procedure does not replace experimental validation or life cycle assessment.

Keywords: *spent batteries, zinc, manganese, leaching, circularity, solution recirculation, secondary waste.*

дата першого надходження статті до видання	15.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. V. Chaika, A. Pavlychenko
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.