
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 504.06:628.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.39>

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА СИСТЕМА СУЧАСНИХ ПРИНЦИПІВ ТА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРОМИСЛОВИМИ ВІДХОДАМИ

Волошин В. С., Бурко В. А.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»

вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро

vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu

В роботі зроблено намір створити механізм управління відходами на основі ієрархічної низки принципів у системі управління промисловими відходами, який в супереч до емпіричних методів утилізації або переробки відходів надає можливість їх мінімізації за властивостями та якостями, причому, на кожному етапі виникнення (технологічний, експлуатаційний та після експлуатаційний етапи життя матеріалів) і життєвого циклу самого відходу. Запропоновано функціональну схему, що відображає основні принципи такої поведінки з промисловими відходами в їх структурній ієрархії та в залежності від основних природно-наукових законів та закономірностей, що лежать в основі походження та подальшого існування відходу. Принципи що закладені в систему відображають послідовно: збереження та перерозподіл енергії та речовини при управлінні відходами (базовий, фізико-хімічний рівень); термодинамічну ефективність та незворотність у процесах переробки відходів (ентропійний аналіз); небезпеку та реакційну активність речовин для відходів різних класів (еколого-хімічний рівень); принцип потенційної ресурсної цінності відходу (ресурсний рівень), та принцип системної інтеграції та кібернетичної керованості процесами мінімізації відходоутворення (системний рівень). В цілому така ієрархія принципів в повній мірі відповідає сучасним вимогам до систем управління промисловими відходами на міжнародному рівні. Запропонована ієрархія з п'яти принципів класифікації відходів – від фізичних законів до цифрового управління – забезпечує основу науково обґрунтованої систематизації методів управління відходами. В їх основі – системний підхід до класифікації методів поводження з промисловими відходами. Така ієрархічна побудова дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства та фундаментальні властивості речовин, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління. Запропонований підхід сприяє створенню стійкої системи поводження з промисловими відходами розробки ефективних рішень, що мінімізують вплив промисловості на довкілля. Послідовність заявлених «принципів» управління відходами дозволяє здійснювати пошук найбільш оптимальних, з погляду «небезпека/користь», способів переробки та мінімізації отриманих промислових відходів. Запропоновані для цього квазіалгоритми, у першому наближенні, дають можливість на кожному етапі управління бачити максимальну вигоду від тих чи інших відомих способів мінімізації відходу, і, як результат, пропонувати оптимальні з них. Як ілюстрація такої ієрархії, в моделі управління переробкою літій-іонних батарей, в залежності від глибини впливу, пропонуються технічні рішення від способів механічного поділу і термолізу, пасивації небезпечного відходу і селективного осадження, до електрохімічних способів іонного обміну і вторинного використання елементів. *Ключові слова:* класифікація відходів, управління відходами, принципи управління, суміжність та інцидентність, термодинамічний підхід.

Structural and functional system of modern principles and methods of industrial waste management. Voloshyn V., Burko V.

The paper intends to create a waste management mechanism based on a hierarchical set of principles in the industrial waste management system, which, contrary to empirical methods of waste disposal or processing, provide an opportunity to minimize waste in terms of their properties and qualities, at each stage of occurrence (technological, operational and post-operational stages of material life) and the life cycle of the waste itself. A functional scheme is proposed, reflecting the basic principles of such behavior with industrial waste in their structural hierarchy and depending on the basic natural science laws and patterns underlying the origin and further existence of waste. The principles laid down in the system reflect consistently: conservation and redistribution of energy and matter (basic, physicochemical level) in waste management; thermodynamic efficiency and irreversibility (entropy analysis) in waste processing processes; hazard and reaction activity of substances (ecological-chemical level) for waste of various classes; includes the principle of potential resource value (resource level) of waste and the principle of system integration and cybernetic controllability (system level) of waste minimization processes. In general, such a hierarchy of principles fully meets modern requirements for industrial waste management systems at the international level. The proposed hierarchy of five principles of waste classification – from physical laws to digital management – provides the basis for a scientifically based systematization of waste management methods. They are based on a systematic approach to the classification of methods of industrial waste management. Such a hierarchical structure allows taking into account both the fundamental laws of natural science and the fundamental properties of substances, as well as the capabilities of the modern technosphere integrated with cybernetic control systems. The proposed approach contributes to the creation of a sustainable system of industrial waste management, the development of effective solutions that minimize the impact of industry on

© Волошин В. С., Бурко В. А., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

the environment. The sequence of the declared «principles» of waste management allows you to search for the most optimal methods of processing and minimizing the resulting industrial waste from the point of view of «danger/benefit». The quasi-algorithm proposed for this, in the first approximation, makes it possible at each stage of management to see the maximum benefit from certain known ways of minimizing waste, and, as a result, to propose the best of them. The lithium-ion battery recycling management model, depending on the depth of exposure, offers technical solutions from methods of mechanical separation and thermolysis, passivation of hazardous waste and selective deposition, to electrochemical methods of ion exchange and secondary use of cells. *Key words:* Waste classification, waste management, management principles, contiguity and incident, thermodynamic approach.

Постановка проблеми. Відомі сучасні наукові доробки в галузі сутності промислових відходів, з боку не тільки їх властивостей як небезпечних і шкідливих речей, але і як джерела певних матеріальних ресурсів, надає подальшого ступеня в поводженні з відходами. Існуючі класифікації мають бути періодично переглянутими в бік їх використання, як механізму управління відходами на підставі їх ресурсної та економічної цінності.

Актуальність дослідження. Проблеми поводження з промисловими відходами, більша частина яких на сьогодні є одним з головних забруднювачів планети, набуває все більшої актуальності, стаючи в один рядок із іншими глобальними проблемами для існування людини.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Підсумки Базельської конвенції 2024 та World Circular Economy Forum-2024 в Брюсселі надають нові шляхи в напрямку переробки принципово нових сучасних промислових відходів, сприяли впровадженню циклічних моделей економіки і пошуку нових методів управління відходами, що є темою цих досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історія системних класифікацій промислових відходів, як і означення термінології було створено наприкінці минулого сторіччя, коли були прийняті найважливіші документи щодо впорядкування впливу цих відходів на природне середовище, і які отримували про-

довження в наступні роки [1, 2, 3, 4]. За цей час суспільство прийшло до парадигми управління такими техногенними забрудненнями, включаючи не тільки їх шкідливість, але й ресурсний потенціал, як сировинне джерело в промисловості. На сьогодні систематизація та класифікація промислових відходів лежить в основі науково обґрунтованих методів управління відходами [4, 5], в тому числі, в контакті з термодинамічними законами [6]. Їх ефективність залежить від того, які принципи та закономірності покладено в основу такої класифікації і такого управління.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Управління промисловими відходами має ретельніше використовувати можливості системного підходу через механізми класифікації таких відходів, для чого проблема потребує нових поглядів на особливий зміст самого поняття «промисловий відхід» та його місто в низці матеріальних ресурсів людства.

Новизна. Поставити відомі класифікації промислових відходів у відповідність до існуючих нових наукових досліджень щодо їх сутності, до сучасних уявлень про властивості та якості нових відходів, у тому числі – з позицій їх керованості.

Методологічне або загально-наукове значення. Методика впливу на промислові відходи, що базується на їх системних структурних і функціональних властивостях, надає нові підходи щодо управління такими відходами, як специфічними матеріальними ресурсами.

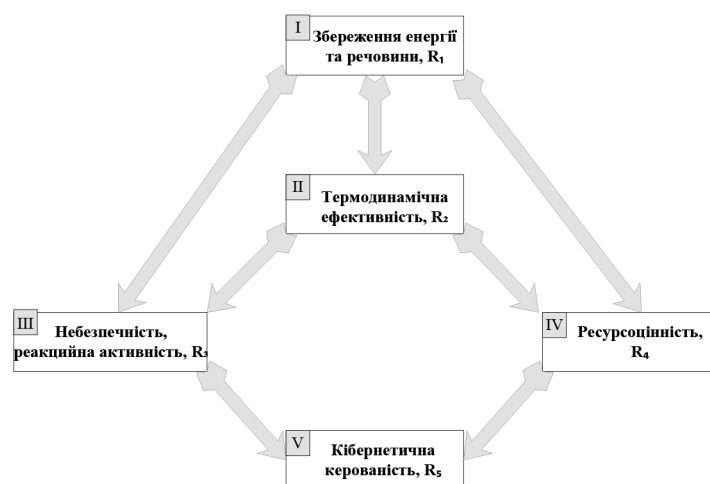


Рис. 1. Функціональна схема управління промисловими відходами. Тут: R_1 – фундамент, джерело всіх залежностей; R_2 – фільтруючий рівень, що з'єднує природничі закони, фізику, хімію та ін.; R_3 і R_4 – відображає критерії щодо небезпечності/цінності, це змістовні блоки, що визначають техніко-економічні пріоритети; R_5 – відображає рівень інтеграції, що забезпечує стійкість та оптимізацію в управлінні відходами

Виклад основного матеріалу. Сучасні вимоги до систем управління промисловими відходами включають не тільки забезпечення емпіричної утилізації або переробки відходів за їх властивостями та якість, але і їх мінімізацію на кожному етапі виникнення (технологічний, експлуатаційний та після експлуатаційний етапи життя матеріалів) і життєвого циклу самого відходу. На рис. 1 запропоновано функціональну схему, що відображає основні принципи такої поведінки з промисловими відходами в їх структурній ієрархії та в залежності від основних природно-наукових законів та закономірностей, що лежать в основі походження та подальшого існування відходу.

Переробка та утилізація промислових відходів є складним і багатофункціональним завданням, вирішення якого можливе лише за наявності системного та науково обґрунтованого підходу. У роботі систематизовано та розглянуто п'ять, на наш погляд, основоположних та ієрархічно пов'язаних принципів, які можуть бути основою сучасної систематизації та класифікації підходів до управління відходами залежно від їх властивостей та якостей.

Принцип R_1 . Принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини при управлінні відходами (базовий, фізико-хімічний рівень).

На базовому рівні систематизація відходів починається із закону збереження енергії та речовини. Будь-які методи переробки відходів передбачають трансформацію їх складу чи форми. Залежно від агрегатного стану (тверді, рідкі, газоподібні), щільності, ентальпії та інших характеристик вибираються термічні, фізико-хімічні, механічні або інші методи впливу на конкретні види відходів. Прикладом може служити технологія піролізу пластичних мас, особливо поліетилену і поліпропілену, яка застосовується для отримання рідких палив і газів. Процес переробки вимагає точного енергетичного розрахунку та є ілюстрацією перерозподілу енергії та маси [7]. Іншим прикладом є обробка відпрацьованих кислот з відновленням сірчаної кислоти через фазові переходи, або електрична сепарація дрібнодисперсних металевих відходів (на основі мас-перенесення заряджених частинок) [8].

Принцип R_2 . Принцип термодинамічної ефективності та незворотності у процесах переробки відходів (ентропійний підхід).

Наступним рівнем класифікації є оцінка термодинамічної ефективності та ступеня незворотності процесів. Цей принцип дозволяє виділяти процеси з високим ступенем втрат (низький ексергетичний ККД) і визначати умови, за яких переробка відходів призводить до найбільшої потенційної користі. Це особливо важливо при переробці високоентропійних сумішей, наприклад флотошламів або багатокомпонентних органічних розчинів. Як приклади, пошлемося на технологію спалювання відходів в циркуляційних киплячих шарах (fluidized bed incineration),

коли висока температура досягається за умови мінімальної ентропійної дисипації і високої ексергетичної ефективності [9]. Аналогічним ілюстративним методом може служити технологія газифікації і RDF (Refuse Derived Fuel) відходів, які згоряють, з рекуперацією тепла, або замкнуті цикли переробки розчинників з використанням рекуперативних конденсаторів, описані в роботі [10].

Принцип R_3 . Принцип безпеки та реакційної активності речовин для відходів різних класів безпеки (еколого-хімічний рівень).

Наступним рівнем класифікації має бути ступінь безпеки відходів, заснований на їхній реакційній здатності, токсичності, біоаккумулятивності та стійкості. Класифікація відходів на основі таких класів безпеки (за GHS, REACH та іншими міжнародними системами) визначає необхідність у специфічних технологіях: нейтралізації, інкапсуляції, стабілізації або спалюванні при високій температурі. Наприклад, ціанідовмісні шлами вимагають окислювальної детоксикації. Це про ціанідні відходи золотовидобування, які проходять етап окислювальної детоксикації з використанням хлорного натрію або перекису водню. У технологіях нейтралізації кислотних шлаків застосовують вапняні та магнієві суспензії [10]. Ще одним прикладом можна вважати переробку ПХБ (поліхлорбіфенілів) методом гідрогенлізу або про неущодження фтористих відходів в алюмінієвій промисловості з використанням вапна [12].

Принцип R_4 . Принцип потенційної ресурсної цінності відходу (ресурсний рівень).

Цей принцип дозволяє виділяти таку якість відходів, як потенційні вторинні ресурси, ще раз підтверджуючи принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини. Тут оцінюється зміст цінних компонентів (металів, вуглеців, рідкісноземельних елементів), можливості їх регенерації, повторного використання та включення в наступні цикли виробництва. Відповідно до принципів циклічної економіки та cradle-to-cradle підходу, відходи розглядаються як носії корисної ресурсної функції. Наприклад, різні шлами алюмінієвого виробництва переробляються з вилученням скандію, титану та рідкісноземельних елементів з використанням гідрометалургії та кислотного вилугування [13]. Іншими прикладами можуть бути технології вилучення паладію та платини з каталізаторів нафтопереробки, або й вилучення міді та срібла з електронних плат шляхом кислотного вилугування [14].

Принцип R_5 . Принцип системної інтеграції та кібернетичної керованості (системний рівень) процесами мінімізації відходоутворення.

Найвищим рівнем систематизації в управлінні промисловими відходами є інтеграція методів у рамках кібернетичних та цифрових систем керування відходами. Тут використовуються принципи системного аналізу, еколого-інформаційного моделювання та концепції «індустріального симбіозу». Сюди ж

входять методи та автоматизовані системи прийняття рішень на основі ЛПР, ІІІ та технологій моніторингу потоків речовини та енергії в реальному часі. Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію відомих методів переробки відходів щодо змін їх складу у існуючих умовах виробництва. Найвищим рівнем систематизації є включення процесів у цифрові та кібернетичні моделі управління, включаючи цифрові двійники, автоматичне управління та зворотний зв'язок за даними моніторингу.

Прикладом може бути інтеграція SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition) та ІІІ в управлінні термічними установками для переробки небезпечних відходів, яка дозволяє оптимізувати навантаження, знизити викиди, підвищити енергетичну віддачу [12]. Або технологія застосування цифрового двійника сміттєспалювального заводу для оптимізації режимів горіння, або і використання IoT-датчиків для оптимізації компостування органічних відходів [10].

Актуальним вважається напрям реалізації анонсованого принципу R_5 – це методологія мінімізації промислових відходів у джерелі їх походження, технологічному процесі [15, 16]. Розглянемо його докладніше, оскільки він належить до предметів наших досліджень (таблиця 1). Замість витратних процесів утилізації та переробки відходів після їх виникнення, сучасна інженерна екологія все частіше наголошує на запобіганні їх появи за рахунок оптимізації та реінжинірингу в межах самого виробничого процесу, використовуючи для цього запропонований механізм термодинамічної двоєдності, як такий, що лежить в основі створення промислових відходів [16]. Можна сформулювати ті основні умови, які підтримуватимуть ідею про мінімізацію промислових відходів у джерелі їх появи – технологічному процесі у межах зазначених нами п'яти принципів. Основний висновок, що виходить з такої аргументації, полягає в наступному. Мінімізація від-

Таблиця 1

Належність принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення промислових відходів до запропонованих принципів їх класифікації

Мітка принципу	Опис у відповідності до принципу	Приклади
R_1	Згідно закону збереження енергії та речовини $\Delta m + \Delta E = 0$, будь яка поява відходів означає незворотне розсіювання речовини та енергії, що тягне за собою додаткові енергетичні витрати на їх повторне залучення до системи споживання. Мінімізація відходів у джерелі їх виникнення дозволяє зберегти ексергію (максимально корисну роботу) $E_{usable}^{after} < E_{usable}^{before}$	Одним із напрямків мінімізації шлаку в доменом виробництві є зміна складу шихти та температурного режиму, що знижує масу побічних фаз на тону чавуну. Тут попередження утворення побічного продукту економить первинну енергію та ресурси
R_2	Зростання ентропії при утилізації відходів означає підвищення дисипації $\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{environ} > 0$. Якщо відходи не утворюються, то ΔS_{system} мінімальна. для $\eta = 1 - \frac{T_0 \Delta S}{Q_{in}} \Rightarrow \max$ ефективність пов'язана з умовою $\Delta S \rightarrow 0$	У виробництві акумуляторів впроваджено технологію прецизійного дозування електроліту, що запобігає утворенню кислотних залишків, які вимагають їх нейтралізації в самому технологічному процесі
R_3	Чим менше утворюється відходів, тим нижче хімічне та екологічне навантаження. Для опису цього стану застосуємо критерій Гіббса у вигляді $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Утилізація небезпечних сполук потребує додаткових хімічних реакцій із позитивним ΔG . Запобігання утворенню небезпечних речовин на ранньому етапі технологічного процесу безпечніше, ніж наступна нейтралізація шкідливого відходу, що вже відбувся	Наприклад, зменшення вмісту хлорвмісних сполук в ПВХ-сировині забезпечує зниження утворення діоксинів при переробці.
R	Маса відходів, придатних до вторинного використання, знижується зі збільшенням числа переробок через деградацію матеріалу. Модель такої системи $R_n = R_0 \cdot e^{-kn}$ відображає зменшення ресурсної цінності при повторних стадіях переробки отриманого промислового відходу	Багаторазова переробка акумуляторних батарей знижує чистоту літію, що видобувається. Краще зменшувати такі втрати в ході самого виробництва
R_5	Оптимізація технологічного процесу з метою мінімізації отриманих обсягів відходоутворюючих матеріалів, вимагає меншої кількості ланок автоматичного контролю. Число керуючих вузлів описується рівнянням $N = \log_2(\Omega)$ де Ω – кількість наслідків. Чим більше відходів – тим вища складність управління. Мінімізація відходів у рамках технологічного процесу спрощує модель та зменшує інформаційне навантаження	Виробництво сталі із замкнутим водообігом вимагає менше сенсорів контролю рН та іонного складу, якщо забруднення мінімальне

ходів у джерелі – це стратегічно вигідніший шлях, який відповідає п'яти універсальним науковим принципам: зниження енергетичних та ресурсних витрат, зменшення ентропійних втрат, зниження хімічних та інших ризиків, збільшення економічної ефективності та спрощення управління виробничими процесами. Така стратегія дозволяє будувати промисловість за принципами сталого розвитку та синьої екології.

Повернемося до структури викладених вище «принципів». Функціональні та ієрархічні структурні взаємозв'язки між аналізованими принципами управління промисловими відходами (див. рис. 1) відображають послідовність від принципу R_1 , вихідного для всіх зв'язків, до принципу R_5 , як мінімум, точки збору всієї керуючої інформації і, як максимум, автоматизованого управління всією системою поводження з промисловими відходами. Послідовність і наступність кожного з аналізованих принципів відображено в змінах ентропії для системи перетворення відходів. Графік зростання ентропії за рівнями принципів (рис. 2) підкреслює перехід від низькоентропійних фізичних закономірностей (R_1) до високоентропійних складних систем (R_5), що містять саме інформаційну ентропійну складову як домінуючий керуючий вплив на всю систему.

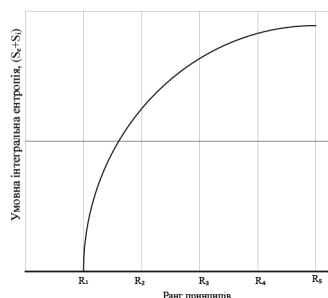


Рис. 2. Оцінковий графік інтегральної ентропійної прогресії з переважною інформаційною складовою за функціональними рівнями

Певну інформацію про ефективність аналізованої системи цінностей при управлінні відходами дає матриця суміжності для логічних залежностей між принципами систематизації в управлінні відходами (рис. 3). Матриця дозволяє дати оцінку того, як кожен принцип (рядок) впливає на інші принципи (стовпці). Вплив у матриці виражається логічними значеннями: сірий колір відповідає суттєвій залежності між елементом рядка та елементом стовпця. Білим кольором позначені суміжності з відсутністю такої залежності. Така матриця може лежати в основі формалізації впливу одного принципу на інший і, таким чином, допомагає будувати автоматизовані логічні рішення в галузі управління відходами.

Ієрархічна (див. рис. 1) та матрична (див. рис. 3) інтерпретації дозволяють отримати такі характеристики аналізованих принципів, що відображають їх

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
R_1	1	R_1+R_2	R_1+R_3	R_1+R_4	$R_1\setminus R_5$
R_2	$R_2\setminus R_1$	1	R_2+R_3	R_2+R_4	$R_2\setminus R_5$
R_3	$R_3\setminus R_1$	$R_3\setminus R_2$	1	$R_3\setminus R_4$	R_3+R_5
R_4	$R_4\setminus R_1$	$R_4\setminus R_2$	$R_4\setminus R_3$	1	R_4+R_5
R_5	$R_5\setminus R_1$	$R_5\setminus R_2$	$R_5\setminus R_3$	$R_5\setminus R_4$	1

Рис. 3. Матриця суміжності логічних залежностей між функціональними рівнями у послідовності «принципів R_i »

як кореляційність властивостей і інцидентність при взаємодії. Розглянемо їх із позицій узгодженості. Відповідні характеристики запропонованих принципів у взаємодії та інцидентції наведені в таблиці 2. Суттєвою особливістю їх є взаємний ієрархічний зв'язок, з чого випливає велика низка методів управління такими відходами, використовуючи для цього саме їх внутрішні класифікаційні співвідношення між принципами.

Принцип збереження енергії та речовини (R_1), це базовий рівень ієрархії. Його роль є фундаментальною (генератор зв'язків). Принцип R_1 не надає прямого впливу на R_5 , але опосередковано впливає через R_2 та R_4 . Принцип термодинамічної ефективності (R_2) виконує в системі роль енергетичного регулятора. Визначальним для нього є показник зростання інтегральної ентропії (термодинамічної S_e та насамперед інформаційної S_i) в міру просування рівнями (див. рис. 2). Принцип безпеки та реакційної активності (R_3) виступає як «фільтр» безпеки та екологічної прийнятності для керованого промислового відходу. Цей принцип ґрунтується на R_1 і R_2 (умови зберігання, переробки, екзотермічні реакції тощо). Принцип ресурсної цінності (R_4) є основним для реалізації найсучаснішого принципу R_5 : цінні компоненти відходів вимагають точного моніторингу та автоматизованого вилучення. І наостанок, принцип кібернетичної керованості (R_5), це найвищий рівень, що дозволяє отримувати дані від усіх нижченаведених принципів, як системний інтегратор у фінальний точці поводження з відходом. Цей принцип не впливає на інші принципи безпосередньо, але модифікує реалізацію всіх процесів через управління, зворотний зв'язок, оптимізацію.

Така класифікація основних принципів може бути готовим інструментом для управління промисловими відходами, наприклад, у вигляді алгоритму послідовності функцій та керуючих процесів.

Як приклад управління промисловими відходами, на підставі запропонованої моделі «принципів», роз-

Таблиця 2

Характеристики принципів класифікації промислових відходів у взаємодії та за їх інцидентністю

Мітка принципу	Основна мета Принципу	Рівень взаємного Впливу	Індекс суміжності	
			Вхід	вихід
R_1	Завдання основи всієї наступної систематизації, визначає допустимі види перетворень, втрат та реакцій	Вплив на R_2 , задає фізичні обмеження для керованого відходу з боку збереження енергії та маси відходів, важливі для оцінки їх термодинамічної ефективності. Вплив на R_3 визначає форму і фазу небезпечних сполук, впливає на вибір нейтралізуючих технологій переробки відходів. Вплив на R_4 визначає енергетичну та матеріальну цінність відходів	0	3
R_2	Оцінювання втрат, ексергетичної ефективності та цінності вторинних ресурсів (вплив на R_4), реалістичності процесів	Грунтується на принципі R_1 , але впливає на R_3 і визначає можливість безпечної нейтралізації керованого відходу з мінімальними енергетичними втратами	2	1
R_3	Вибір та регулювання методів нейтралізації промислового відходу та вимоги до моніторингу	Залежність як від R_1 , так і від R_2 (через фазовий склад, концентрації, розподіл за енергіями та ентропією). Вплив на R_5 – чим вище небезпека та реакційна активність, тим вище вимоги до автоматизації	2	1
R_4	Участь в прийнятті рішень про вилучення корисних компонентів з промислового відходу та ретрансляції ресурсних пріоритетів під час виборів методу управління промисловим відходом	залежність як від R_1 , так і від R_2 (через фазовий склад, концентрації, розподіл за енергіями та ентропією)	2	1
R_5	Інтеграція всієї інформації до автоматизованих систем, цифрових двійників, моніторингу	–	2	0

глянемо процедури мінімізації відходів, що розглядаються у вигляді відпрацьованих акумуляторних (літій-іонних) батарей. З метою визначення оптимального способу переробки/утилізації цих відходів на основі властивостей за п'ятьма розглянутими принципами, складемо автоматизовану логічну модель (у вигляді квазіалгоритму класифікації відходів). Оцінка цього типу відходів за всіма п'ятьма ієрархічними принципами з обґрунтуваннями, наведена нижче (табл. 3).

Слід розуміти, що у фізично обґрунтованих «принципах» за основу приймається послідовно склад, ставлення до енергії, що сприймається, небезпека для біологічних систем, раціональність і, нарешті, керованість. У такій же послідовності розташовуються методи переробки літій-іонних батарей – від механічного низькотемпературного поділу до високотемпературних та хімічних впливів та двійникових ефектів, залежно від стану та готовності сировини, що переробляється (таблиця 4).

Як впливає з таблиці 4, в технологіях переробки літій-іонних батарей енергоефективність може досягатися за рахунок реакцій нейтралізації з мінімальними витратами. Хімічна реактивність визначає вибір реагентів. Екологічна безпека виключає скидання продуктів у довкілля. Економічна доцільність залежить від вартості реагентів та обладнання.

Послідовний аналіз можливостей кожного з аналізованих принципів дозволяє формувати ті чи інші ефективніші та раціональніші схеми переробки даного відходу, залежно від глибини цього аналізу та існуючих технічних можливостей. Можливості такої системи управління не обмежуються отриманими результатами і можуть бути глибшими, залежно від граничних умов реалізації.

Головні висновки. Запропонована ієрархія з п'яти принципів класифікації відходів – від фізичних законів до цифрового управління – забезпечує основу науково обґрунтованої систематизації методів управління відходами. В їх основі – системний підхід до класифікації методів поводження з промисловими відходами. Така ієрархічна побудова дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства та фундаментальні властивості речовин, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління. Запропонований підхід сприяє створенню стійкої системи поводження з промисловими відходами розробки ефективних рішень, що мінімізують вплив промисловості на довкілля.

Послідовність заявлених «принципів» управління відходами дозволяє здійснювати пошук найбільш оптимальних з погляду функції «небезпека/

Таблиця 3

Квазіалгоритм (на основі логіки п'яти принципів) та порядок керуючих дій з переробки відходів літій-іонних акумуляторних батарей

Алгоритм розрахунку	Порядок аналізу
Markdown КопіюватиРедагувати Вхід: Інформація про відхід → {Хімісклад, агрегатний стан, теплота, токсичність, економічна цінність, керованість} 1. Оцінка за принципом R_1 (фізико-хімічні властивості): – якщо агрегатний стан → тверде і щільність енергії > поріг : → застосувати метод «механічний поділ» або «піроліз» – Якщо рідке/газоподібне: → перейти до оцінки розчинності і летючості 2. Оцінка за Принципом R_2 (ентропія та ефективність): – розрахувати ΔS (ентропійний приріст) та ΔE_x (ексергетичний вихід) – Якщо ефективність переробки > 40 %, відзначити як «високоєфективний процес» – Інакше → шукаєм рекуперативні або замкнуті схеми 3. Оцінка за принципом R_3 (небезпека): – Якщо окисність/вибухонебезпечність > критичної норми: → Методи дезактивації + пасивація – Інакше → допускається стандартна переробка 4. Оцінка за принципом R_4 (ресурсоцінність): – Якщо зміст цінних елементів > x %: → рекомендується вилучення (гідрометалургія і ін.) – Інакше → допускається пряма утилізація 5. Оцінка за Принципом R_5 (керованість та інтеграція): – Якщо об'єкт входить до автоматизованого ланцюга або може бути відстежений: → інтеграція в цифрову модель – Інакше → необхідно ручне управління і дооцінка Кінець	Етап 1: Збір вихідної інформації • Тип відходу: акумуляторні батареї (літій-іонні, свинцево-кислотні та ін.) • Стан: комплексний (твердий, рідкий – електроліт) • Потенційна ресурсоцінність: висока (метали: Li, Co, Pb, Ni) • Токсичність: висока Етап 2: Логічна послідовність застосування п'яти принципів 1. Принцип 1 – Закон збереження речовини та енергії → Складна конструкція, різні фази → Потрібне попереднє сортування та демонтаж перед переробкою. 2. Принцип 2 – Термодинамічна ефективність → Елементи (особливо літєві) мають високу ексергетичну цінність → Ефективні пірометаллургічні (відновлення) і гідрометалургічні (вилуговування) методи. 3. Принцип 3 – Небезпека речовини → Висока токсичність, ризик самозаймання → Потрібні: • охолодження, • хімічна нейтралізація електролітів, • пожежозахист на складі. 4. Принцип 4 – Ресурсоцінність → Виймаються: літій, кобальт, нікель, графіт, свинець → Можуть використовуватися повторно у виробництві батарей, сплавів та ін. 5. Принцип 5 – Системна інтеграція → Роботизовані лінії розбирання → II для сортування за хімічним складом → Підтримка циклів «cradle-to-cradle» (від батареї до батареї).

Таблиця 4

Оцінка результатів послідовного керування відходами акумуляторних (літій-іонних) батарей відповідно до запропонованої систематизації

Принцип	Критерій оцінки	Характеристика Li -іонних АКБ	Послідовність прикладів технологій
R_1	Хімічний склад, агрегатний стан, щільність енергії	Висока щільність енергії ; містить літій, кобальт, графіт, органічні електроліти;	Механічне поділ, термоліз, пірометалургія
R_2	Енергоємність процесів, ексергетичний вихід	Термічне відновлення вимагає високої енергії; оптимізується за рахунок рекуперації	Високотемпературна переробка в печах, рекуперація тепла
R_3	Токсичність, горючість, реактивність компонентів	Летючі електроліти, вибухонебезпечні у зруйнованому вигляді; можливий термічний розгін	Деактивація з попереднім розрядом, пасивація електроліту
R_4	Можливість вторинного вилучення елементів	Висока цінність літію, кобальту, нікелю; вилучення з високим економічним ефектом	Гідрометалургія, селективне осадження, іонообмін
R_5	Можливість цифрового керування та моніторингу	Весь цикл може бути включений в автоматизовані сортувальні лінії	SCADA-системи на лініях збору АКБ, цифрові двійники переробних заводів

користь», способів переробки та мінімізації отриманих промислових відходів. Запропонований для цього квазіалгоритм, у першому наближенні, дає можливість на кожному етапі управління бачити максимальну вигоду від тих чи інших відомих способів мінімізації відходу, і, як результат, пропонувати оптимальні з них.

Як ілюстрація такої ієрархії, в моделі управління переробкою літій-іонних батарей, в залежності від глибини впливу, пропонуються технічні рішення від способів механічного поділу і термолізу, пасивації небезпечного відходу і селективного осадження, до електрохімічних способів іонного обміну і вторинного використання елементів.

Література

1. Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням : прийнята 22 берез. 1989 р. Базель : UNEP, 1989. URL: <https://www.basel.int> (дата звернення: 16.10.2025).
2. United States Environmental Protection Agency (EPA). Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed Radiological Wastes : EPA Publication EPA/530-F-02-013. Washington, DC : U.S. EPA, 2024. 15 p.
3. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Legal Instruments – Definitions and Clarifications on Wastes. OECD Legal Database. Paris : OECD, 2024. URL: <https://legalinstruments.oecd.org> (дата звернення: 16.10.2025).
4. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. Strategies for Manufacturing. Scientific American. 1989. Vol. 261, No. 3. P. 144–152.
5. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy. Volumes 1–3. Isle of Wight ; London, 2012–2014.
6. Baumgärtner S. Necessity and Inefficiency in the Generation of Waste: A Thermodynamic Analysis. International Journal. 2003. P. 113–123.
7. Cheremisinoff N. P. Industrial Waste Treatment Handbook. Butterworth-Heinemann, 2003. P. 145–163.
8. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill, 2002.
9. Müller W. Thermodynamics and Industrial Waste Treatment. Elsevier, 2014. P. 212–229.
10. Allen D. T., Shonnard D. R. Green Engineering. Upper Saddle River : Prentice Hall. Pearson Education, 2001. 576 p.
11. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. 2nd ed. New York : McGraw Hill Handbooks, 2002. 273 p.
12. Friedrich B., Petersen J. Waste Management and Resource Efficiency. Springer, 2005. P. 391–412.
13. Cheremisinoff N. P. Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimisation Technology. New York : Elsevier Science, 2003. 477 p.
14. Волошин В. С., Бурко В. А. Мінімізація промислових відходів у технологічних процесах, термодинамічний підхід. Екологічні науки. 2024. № 6 (57). С. 25–30.
15. Волошин В. С., Бурко В. А. Відповідність принципу термодинамічної двоєдності, як причини відходоутворення. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 49, т. 2. С. 86–93.

Дата першого надходження рукопису до видання: 05.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025