

УДК 502/504+502.3/.7

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО КЛАСИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ: ПРИНЦИПИ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДОУТВОРЕННЯ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МАТЕРІАЛІВ

В.С. Волошин, В.А. Бурко

ДВНЗ «Приазовський Державний Технічний Університет»
87555, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7
Адреса місця фактичного розташування:
49044, Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9922-5618>
<https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>

У роботі запропоновано механізм управління промисловими відходами, що ґрунтується на ієрархічній системі науково обґрунтованих принципів. На відміну від емпіричних підходів до оброблення та переробки, запропонований механізм забезпечує можливість мінімізації відходів за їх властивостями та якісними характеристиками на кожному етапі виникнення-технологічному, експлуатаційному, а також упродовж усього життєвого циклу відходу.

Розроблено функціональну схему, що відображає структурну ієрархію принципів управління промисловими відходами у взаємозв'язку з фундаментальними природничо-науковими законами та закономірностями. Система включає п'ять ієрархічно упорядкованих принципів: збереження та перерозподілу енергії й речовини, термодинамічної ефективності та незворотності процесів переробки, безпеки та реакційної активності речовин відходів різних класів, потенційної ресурсної цінності відходу, системної інтеграції та кібернетичної керуваності процесами мінімізації відходоутворення.

Запропонована ієрархія відповідає сучасним міжнародним вимогам до систем управління промисловими відходами та забезпечує науково обґрунтовану основу для систематизації методів управління ними. Підхід дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління.

Практичне застосування запропонованої моделі продемонстровано на прикладі управління переробкою літій-іонних батарей, де залежно від глибини впливу розглядаються рішення від механічного поділу та термолізу до електрохімічного іонного обміну та вторинного використання компонентів.

Ключові слова: класифікація відходів, управління промисловими відходами, принципи мінімізації відходоутворення, термодинамічний підхід, кібернетичне управління, життєвий цикл матеріалів.

1. ВСТУП

Сучасні наукові доробки в галузі промислових відходів розглядають їх не лише як небезпечні і шкідливі речовини, але й як джерело певних матеріальних ресурсів, що відкриває нові можливості в управлінні відходами. Існуючі класифікації мають бути переглянуті з урахуванням їх ресурсної та економічної цінності як механізму управління відходами.

Проблеми управління промисловими відходами, більша частина яких є одним з головних забруднювачів довкілля, набуває дедалі більшої актуальності, посідаючи провідне місце серед глобальних проблем людства.

Підсумки Базельської конвенції 2024 та Всесвітній форум циклічної економіки у

Брюсселі відкрили нові напрями в переробці принципово нових сучасних промислових відходів, сприяли впровадженню циклічних моделей економіки і пошуку нових методів управління відходами, що є темою цих досліджень.

Історія системних класифікацій промислових відходів, та відповідна термінологія були сформовані наприкінці минулого сторіччя, коли були прийняті найважливіші документи щодо впорядкування впливу цих відходів на природне середовище, і які отримували продовження у 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], у тому числі у контексті термодинамічних законів [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 місце серед матеріальних ресурсів людства.

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.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої ієрархічної системи принципів класифікації промислових відходів, яка забезпечує системний підхід до управління ними на всіх етапах життєвого циклу матеріалів, від фізико-хімічних характеристик до кібернетичної керованості процесами мінімізації відходоутворення.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретичну основу дослідження становлять фундаментальні закони природознавства, закон збереження енергії та речовини, принципи термодинаміки та ентропійного аналізу, критерії хімічної небезпеки речовин, а також концепції циклічної економіки. У роботі використано методи системного аналізу та структурно-функціонального моделювання для побудови ієрархічної системи принципів класифікації промислових відходів. Інформаційну базу дослідження склали міжнародні нормативні документи (Базельська конвенція, директиви ЄС щодо управління відходами), матеріали Всесвітнього форуму циклічної економіки - 2024 у Брюсселі, а також наукові публікації у галузі термодинаміки переробки відходів, гідрометалургії та кібернетичного управління промисловими процесами.

Для верифікації запропонованої ієрархічної моделі застосовано метод квазіалгоритмічного аналізу, що передбачає послідовну оцінку відходу за кожним із п'яти рівнів системи-від фізико-хімічних характеристик до можливостей

цифрового керування. Як об'єкт практичної апробації обрано відходи літій-іонних акумуляторних батарей як приклад складного багатокomпонентного промислового відходу з високою ресурсною цінністю та значним екологічним ризиком. Оцінювання проводилось за критеріями енергоємності процесів переробки, ексергетичного виходу, токсичності та реакційної активності компонентів, ресурсної цінності вилучених елементів.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сучасні вимоги до систем управління промисловими відходами включають не тільки забезпечення емпіричної оброблення або переробки відходів за їх властивостями та якостями, 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.

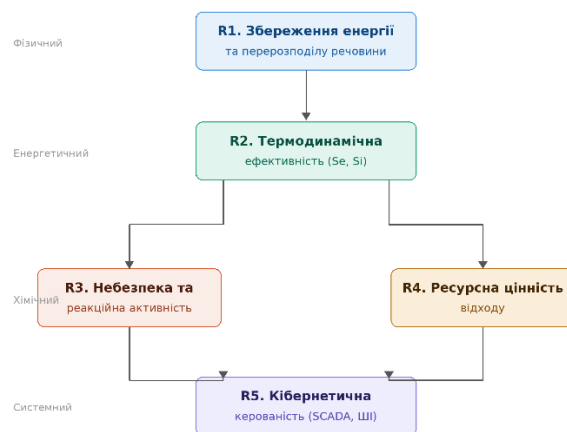


Рис. 1 – Функціональна схема управління промисловими відходами (ієрархія принципів R1–R5)
Fig. 1 – Functional diagram of industrial waste management (hierarchy of principles R1–R5)

Оброблення та переробка 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 R1. 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 R2. Принцип термодинамічної ефективності та незворотності у процесах переробки відходів (ентропійний підхід).

Наступним рівнем класифікації є оцінка термодинамічної ефективності та ступеня незворотності процесів. У контексті цієї роботи під ентропією розуміється міра неупорядкованості системи: термодинамічна ентропія S_e відображає розсіювання енергії у фізико-хімічних процесах переробки відходів, тоді як інформаційна ентропія S_i характеризує складність і невизначеність у системах кібернетичного управління. 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 флотаційних шламів або багатокомпонентних органічних розчинів. Як приклади, слід відзначити технологію спалювання відходів в апаратах з киплячим шаром, коли висока температура досягається за умови мінімальної ентропійної дисипації і високої ексергетичної ефективності [9]. Аналогічним прикладом є технологія газифікації

відходів та виробництво RDF (Refuse Derived Fuel -паливо з відходів) з рекуперацією тепла, або замкнуті цикли переробки розчинників із використанням рекуперативних конденсаторів [10].

Принцип R3. 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 шламів застосовують вапняні та магнієві суспензії. [10]. Ще одним прикладом можна вважати переробку ПХБ (поліхлорбіфенілів) методом гідрогенлізу або про неущкодження фтористих відходів в алюмінієвій промисловості з використанням вапна [12].

Принцип R4. 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 вміст 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 вилуговування [13]. Іншими прикладами можуть бути технології вилучення паладію та платини з каталізаторів нафтопереробки, або й вилучення міді та срібла з електронних плат шляхом кислотного вилуговування [14].

Принцип R5. 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, ШІ 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 ШІ в управлінні термічними установками для переробки небезпечних відходів, яка дозволяє оптимізувати завантаження, 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 напрямом реалізації принципу R5 є методологія мінімізації промислових відходів безпосередньо у джерелі їх утворення — технологічному процесі [14, 15]. Замість витратних процесів оброблення та переробки відходів після їх виникнення, сучасна інженерна екологія наголошує на запобіганні їх появи шляхом оптимізації та реінжинірингу виробничого процесу, використовуючи для цього запропонований механізм термодинамічної двоєдності як першопричини утворення промислових відходів [15]. Мінімізація відходів у джерелі є стратегічно вигіднішим шляхом, який узгоджується з п'ятьма універсальними науковими принципами: зниження енергетичних та ресурсних витрат, зменшення ентропійних втрат, зниження хімічних та інших ризиків, збільшення економічної ефективності та спрощення управління виробничими процесами. Така стратегія дозволяє розбудовувати промисловість за принципами сталого розвитку та «синьої економіки» (Blue Economy) - концепції замкнених виробничих циклів, де відходи одного процесу стають ресурсом для іншого [16].

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 R1. вихідного для всіх зв'язків, до принципу R5., як мінімум, точки збору всієї керуючої інформації і, як максимум, автоматизованого управління всією системою управління 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 (R1) до високоентропійних складних систем (R5), що містять саме інформаційну ентропійну складову як домінуючий керуючий вплив на всю систему.

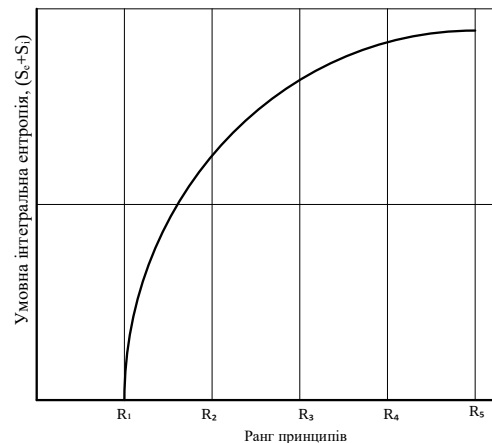


Рис. 2 – Оціночний графік інтегральної ентропійної прогресії за функціональними рівнями: S_e -термодинамічна (фізична) ентропія, S_i -інформаційна ентропія як міра складності системи управління; сумарна ентропія S_e+S_i зростає від базового рівня R1 до системного рівня R5.

Fig. 2 – Evaluation graph of integral entropy progression by functional levels: S_e -thermodynamic (physical) entropy, S_i - information entropy as a measure of control system complexity; total entropy S_e+S_i increases from base level R1 to system level R5.

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 оцінити, як кожен принцип (рядок) впливає на інші принципи (стовпці). Вплив виражається логічними значеннями: сірий колір відповідає суттєвій залежності між елементом рядка та елементом стовпця, білий-відсутності такої

залежності. Слід зазначити, що матриця є несиметричною, оскільки характеристики кореляційності (ступінь взаємопов'язаності принципів) відображено над головною діагоналлю, а показники інцидентності (факт безпосереднього зв'язку)-під нею. 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 (рис. 1) та матрична (рис. 3) інтерпретації виявляють дві ключові характеристики запропонованих принципів: ступінь їх взаємозв'язку та факт безпосередньої взаємодії між ними. Розглянемо їх із позицій узгодженості. Відповідні характеристики запропонованих принципів у взаємодії та інцидентії 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.

	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 \R ₅
R ₂	R ₂ \R ₁	1	R ₂ +R ₃	R ₂ +R ₄	R ₂ \R ₅
R ₃	R ₃ \R ₁	R ₃ \R ₂	1	R ₃ \R ₄	R ₃ +R ₅
R ₄	R ₄ \R ₁	R ₄ \R ₂	R ₄ \R ₃	1	R ₄ +R ₅
R ₅	R ₅ \R ₁	R ₅ \R ₂	R ₅ \R ₃	R ₅ \R ₄	1

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

Fig. 3 – Adjacency matrix of logical dependencies between functional levels in the sequence of "R-principles"

Принцип збереження енергії та речовини (R₁)-це базовий рівень ієрархії. Його роль є фундаментальною (генератор зв'язків). Принцип R₁ не надає прямого впливу на R₅, але опосередковано впливає через R₂ та R₄. Принцип термодинамічної ефективності R₂ 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 R₃) виступає як «фільтр» безпеки та екологічної прийнятності для керованого промислового відходу. Цей принцип ґрунтується на R₁ і R₂ (умови зберігання, переробки, екзотермічні реакції тощо). Принцип ресурсної цінності (R₄) є основним для реалізації найсучаснішого принципу R₅: цінні компоненти відходів вимагають точного моніторингу та автоматизованого вилучення. І наостанок, принцип кібернетичної керованості (R₅)-це найвищий рівень, що дозволяє отримувати дані від усіх нижченаведених принципів, як системний інтегратор у фінальній точці управління 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», розглянемо 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).

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 (табл. 1).

Застосування запропонованої ієрархії до відходів літій-іонних акумуляторних батарей демонструє практичну ефективність моделі. За принципом R₁ батареї характеризуються високою щільністю енергії та складним хімічним складом (літій, кобальт, графіт, органічні електроліти), що визначає механічний поділ, термоліз і пірометалургію як базові методи переробки. Принцип R₂ вказує на значну енергоємність термічних процесів, яка оптимізується за рахунок рекуперації тепла у

Таблиця 1 – Оцінка результатів послідовного керування відходами акумуляторних (літій-іонних) батарей відповідно до запропонованої систематизації.
Table 1 – Evaluation of sequential waste management results for battery (lithium-ion) cells according to the proposed systematization of principles R1–R5 (each row presents: assessment criterion per principle, battery characteristics, and recommended processing technology)

Принцип	Характеристика батарей	Технологія переробки
R1	Висока щільність енергії; літій, кобальт, графіт, органічні електроліти	Механічний поділ, термоліз, пірометалургія
R2	Термічне відновлення вимагає значних енерговитрат; оптимізується рекуперацією	Переробка у високотемпературних печах з рекуперацією тепла
R3	Летючі електроліти вибухонебезпечні; можливий термічний розгін	Попередній розряд, пасивація електроліту
R4	Висока цінність літію, кобальту, нікелю	Гідрометалургія, селективне осадження, іонообмін
R5	Весь цикл інтегрується в автоматизовані лінії	SCADA-системи, цифрові двійники заводів

високотемпературних печах. Принцип R3 фіксує підвищену небезпеку: летючі електроліти є вибухонебезпечними у зруйнованому стані і здатні до термічного розгону, що вимагає попереднього розряду та пасивації. Принцип R4 виявляє високу ресурсну цінність-літій, кобальт і нікель вилучаються методами гідрометалургії, селективного осадження та іонного обміну з суттєвим економічним ефектом. Нарешті, принцип R5 забезпечує інтеграцію всього циклу переробки в автоматизовані сортувальні лінії з використанням SCADA-систем і цифрових двійників переробних заводів.

В технологіях переробки літій-іонних батарей (таблиця 1) 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 відходів, 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.

4. 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 управління 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 управління 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/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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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.
 16. Pauli G.A. The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Taos, New Mexico: Paradigm Publications, 2010. 336 p. ISBN 978-0-912111-90-2.
 17. Radiological Wastes : EPA Publication EPA/530-F-02-013. Washington, DC : U.S. EPA, 2024. 15 p.
 18. 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> (Accessed: 16.10.2025).
 19. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. Strategies for Manufacturing. Scientific American. 1989. Vol. 261, No. 3. P. 144–152.
 20. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy. Volumes 1–3. Isle of Wight ; London, 2012–2014.
 21. Baumgärtner S. Necessity and Inefficiency in the Generation of Waste: A Thermodynamic Analysis. International Journal. 2003. P. 113–123.
 22. Cheremisinoff N. P. Industrial Waste Treatment Handbook. Butterworth-Heinemann, 2003. P. 145–163.
 23. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill, 2002.
 24. Müller W. Thermodynamics and Industrial Waste Treatment. Elsevier, 2014. P. 212–229.
 25. Allen D. T., Shonnard D. R. Green Engineering. Upper Saddle River : Prentice Hall. Pearson Education, 2001. 576 p.
 26. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. 2nd ed. New York : McGraw Hill Handbooks, 2002. 273 p.
 27. Friedrich B., Petersen J. Waste Management and Resource Efficiency. Springer, 2005. P. 391–412.
 28. Cheremisinoff N. P. Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimisation Technology. New York : Elsevier Science, 2003. 477 p.
 29. Voloshyn V. S., Burko V. A. Minimization of industrial waste in technological processes: a thermodynamic approach. Ekologichni nauky [Ecological Sciences]. 2024. No. 6 (57). P. 25–30.
 30. Voloshyn V. S., Burko V. A. Compliance with the principle of thermodynamic duality as a cause of waste generation. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences. 2024. Issue 49, Vol. 2. P. 86–93.
 31. Pauli G.A. (2010). *The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs*. Taos, New Mexico: Paradigm Publications. 336 p. ISBN 978-0-912111-90-2.
- ## REFERENCES
1. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal : adopted 22 March 1989. Basel : UNEP, 1989. URL: <https://www.basel.int> (Accessed: 16.10.2025).
 2. United States Environmental Protection Agency (EPA). Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed

SYSTEMIC APPROACH TO THE CLASSIFICATION OF INDUSTRIAL WASTE: PRINCIPLES OF WASTE MINIMIZATION AT THE STAGES OF THE MATERIAL LIFE CYCLE

V. S. Voloshyn, V. A. Burko
Priazovskyi State Technical University

7 Universytetska St, Mariupol, 87555, Ukraine
Actual business address: 29 Hoholia St, Dnipro, 49044, Ukraine
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9922-5618>
<https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>

The paper proposes an industrial waste management mechanism based on a hierarchical system of scientifically grounded principles. Unlike empirical approaches to waste treatment and processing, the proposed mechanism ensures waste minimization according to the properties and

qualitative characteristics of waste at each stage of its generation - technological and operational - as well as throughout the entire life cycle of the waste itself.

A functional scheme has been developed reflecting the structural hierarchy of industrial waste management principles in relation to fundamental natural science laws and patterns. The system comprises five hierarchically ordered principles: conservation and redistribution of energy and matter; thermodynamic efficiency and irreversibility of processing; hazard and reaction activity of substances in waste of various hazard classes; potential resource value of waste; and system integration and cybernetic controllability of waste minimization processes.

The proposed hierarchy complies with current international requirements for industrial waste management systems and provides a scientifically grounded basis for the systematization of waste management methods. The approach enables consideration of both the fundamental laws of natural science and the capabilities of the modern technosphere integrated with cybernetic control systems.

The practical application of the proposed model is demonstrated using lithium-ion battery waste management as a case study, where solutions ranging from mechanical separation and thermolysis to electrochemical ion exchange and secondary use of components are considered depending on the depth of intervention.

Keywords: waste classification, industrial waste management, waste minimization principles, thermodynamic approach, cybernetic control, material life cycle.

Подання до редакції : 21. 01. 2026

Надходження остаточної версії : 25. 03. 2026

Публікація статті : 25. 05. 2026