

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ПРО ВИКОНАННЯ СТ. 4 EWS ES В УКРАЇНСЬКОМУ ПРИРОДОЗАХИСНОМУ ЗАКОНОДАВСТВІ. ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ

Основні принципи, що лежать в основі сучасних нормативно-правових актів щодо класифікації промислових відходів, базуються на досвіді та міжнародних стандартах, наукових підходах та вимогах до сталого розвитку. Вони ґрунтуються, перш за все, на розумінні того, що будь-які відходи, так чи інакше, є антагоністичним продуктом людської діяльності для Природи, впоратися з яким самій Природі дуже складно. Такі класифікатори, перш за все, поділяють відходи за ступенем їх небезпеки (екологічний принцип), за походженням і приналежністю до конкретних джерел, за їх агрегатним, фізичним або хімічним станом, за принципами їх обліку, ідентифікації та мінімізації.

Наприклад, основні принципи класифікації промислових відходів, прийняті в Європейському Союзі (European Waste Catalogue - EWS), відомому як LoW (Список відходів, затверджений рішенням Європейської Комісії 200/531/EC) поділяють відходи на небезпечні та безпечні, враховують походження відходів, їх склад та небезпеку, встановлюють *ієрархію поводження з відходами* (Waste Framework Directive 2008/98/EC - Waste Framework Directive, WFD). Першим в ієрархії стоїть *запобігання утворенню відходів*, тобто недопущення появи відходу, як фізичної суттєвості, а вже потім - підготовка до повторного використання, переробки, іншого відновлення, утилізації. Норми передбачають обов'язкову відповідальність виробника. Такі принципи регулюються спеціальним регламентом ES № 1272/2008 (CLP). Закон України «Про управління відходами» (п.1 стаття 4) теж встановлює пріоритетом «запобігання утворенню відходів» поперед інших способів управління відходами.

Але ж, виходячи з досвіду, можна стверджувати, що в Україні дуже мало реальних технологій, які б відповідали вимогам статті 4 EWS ES щодо запобігання утворенню промислових відходів, особливо тих, які характеризуються потужними матеріальними потоками.

Якщо розглядати такі нормативні документи з точки зору мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, то ці методи легко узгоджуються з міжнародними нормативними документами в тій частині, яка стосується запобігання утворенню відходів (ст. 4, а - запобігання, WFD ES), як пріоритетний підхід, що знаходиться на першому місці в такій ієрархії. Це означає, що перш ніж розглядати будь-які заходи щодо поводження або утилізації відходів, необхідно прагнути до запобігання їх утворенню. Цим методам поводження з відходами присвячено чимало робіт в області реалізації принципу термодинамічної двоєдності як основи походження промислових відходів [1], а створення умов для подолання цього принципу може стати основою для реалізації статті 4,а WDF ES.

В цьому випадку класифікації підлягають не стільки самі відходи, які вже утворилися, здатні забруднювати навколишнє середовище і вимагають переробки, утилізації, скільки компоненти сировини, які є основою тієї чи іншої технології і з яких можна отримати потенційні відходи.

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.

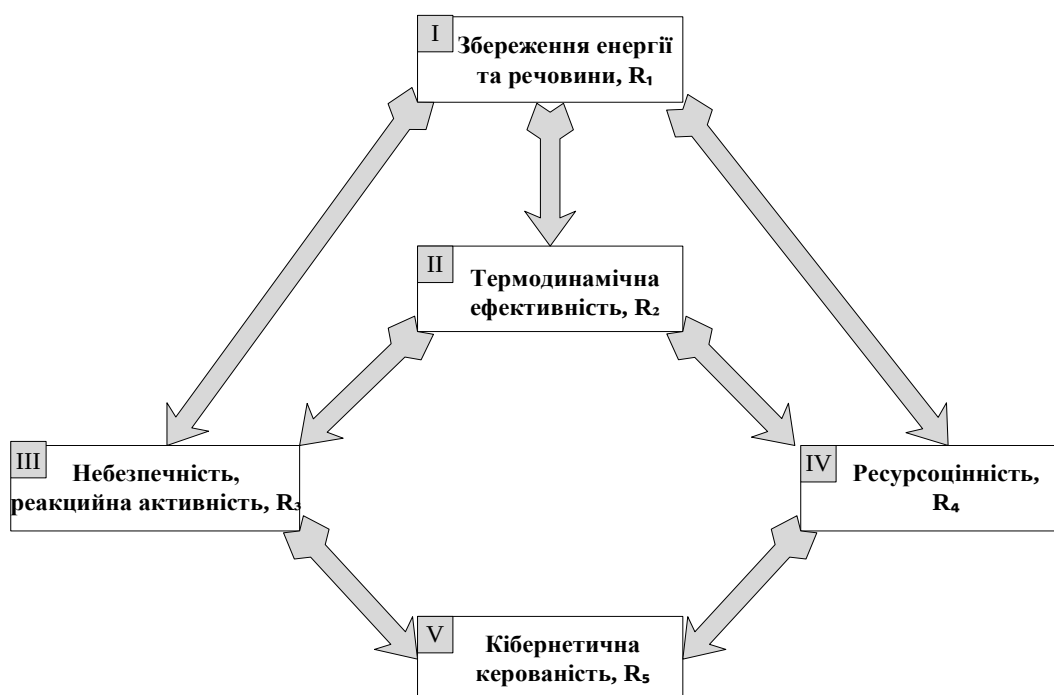


Рисунок 1 – Функціональна схема управління промисловими відходами. Тут: R_1 – фундамент, джерело всіх залежностей; R_2 – фільтруючий рівень, що з'єднує природні закони, фізику, хімію та ін.; R_3 і R_4 – відображає критерії щодо небезпечності/цінності, це змістовні блоки, що визначають техніко-економічні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

У роботі 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, у відповідності до ст. 4,а WFD ES.

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

На базовому рівні систематизація 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 або механічні методи впливу на конкретні види відходів.

Принцип R_2 . Принцип термодинамічної ефективності та незворотності (ентропійний аналіз) у процесах переробки відходів. 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 багатокomпонентних органічних розчинників.

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

Принцип R_4 . Принцип потенційної ресурсової цінності (ресурсний рівень) відходу. 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 цикли виробництва. Відповідно до принципів циклічної економіки та cradle-to-cradle підходу, відходи розглядаються як носії корисної ресурсної функції.

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, 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.

Другим напрямом реалізації анонсованого принципу R_5 є методологія мінімізації промислових відходів у джерелі їх походження – технологічному процесі [1]. Розглянемо його докладніше, оскільки він належить до предметів наших досліджень.

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 переважну інформаційну ентропійну складову як домінуючий керуючий вплив на всю систему.

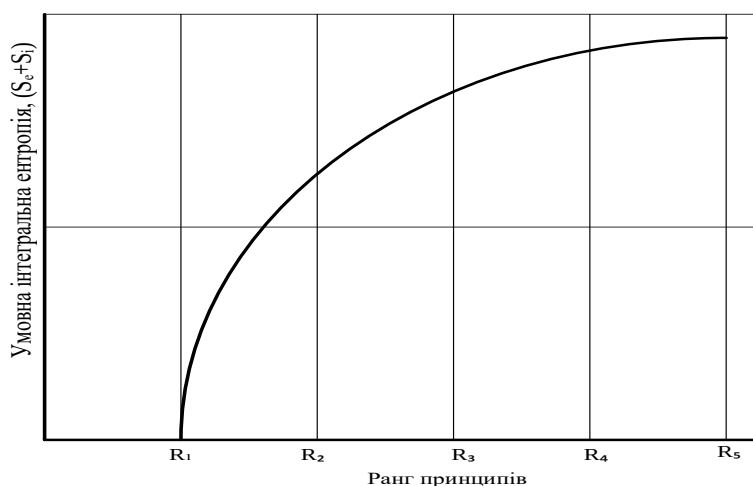


Рисунок 2 – Оцінковий графік інтегральної ентропійної прогресії з інформаційною складовою за функціональними рівнями.

Певну інформацію про ефективність аналізованої системи цінностей при управлінні відходами дає матрицю 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.

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
R ₁					
R ₂					
R ₃					
R ₄					
R ₅					

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

Ієрархічна (див. рис. 1) та матрична (див. рис. 3) інтерпретації дозволяють отримати такі характеристики аналізованих принципів, що відображають їх як суміжність і інцидентність властивостей при взаємодії. Розглянемо їх із позицій узгодженості.

1. Принцип збереження енергії та речовини (R_1), це базовий рівень ієрархії. Його роль є фундаментальною (генератор зв'язків). Індекс вихідної пов'язаності – 3 (див. рис. 3). Індекс вхідної пов'язаності – 0. Функція принципу полягає в завданні основи всієї наступної систематизації. Він визначає допустимі види перетворень, втрат та реакцій.

Принцип R_1 впливає на R_2 , задає фізичні обмеження для керованого відходу збереження енергії та маси відходів, важливі для оцінки їх термодинамічної ефективності. Вплив 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. Принцип R_1 не надає прямого впливу на R_5 , але опосередковано впливає через R_2 та R_4 .

2. Принцип термодинамічної ефективності (R_2) виконує в системі роль енергетичного фільтра/регулятора. Індекс вихідної пов'язаності для нього – 2, індекс вхідної пов'язаності – 1. Принцип R_2 ґрунтується на принципі R_1 , але впливає на R_3 , визначає можливість безпечної нейтралізації керованого відходу з мінімальними енергетичними втратами. Його функція полягає в оцінюванні втрат, ексергетичної ефективності та цінності вторинних ресурсів (вплив на R_4), реалістичності процесів. Визначальним для нього є показник зростання інтегральної ентропії (насамперед інформаційної S_i) у міру просування рівнями (див. рис. 2).

3. Принцип безпеки та реакційної активності (R_3) виступає як «фільтр» безпеки та екологічної прийнятності для керованого промислового відходу. Основна його функція - вплив на вибір методів нейтралізації промислового відходу та вимоги до моніторингу. Індекс вихідної зв'язаності - 1, індекс вхідної зв'язаності - 2. Він впливає на R_5 – чим вище безпека та реакційна активність, тим вище вимоги до автоматизації та кібернетики. Цей принцип ґрунтується на R_1 і R_2 (умови зберігання, переробки, екзотермічні реакції тощо).

4. Принцип ресурсної цінності (R_4) є основним для реалізації найсучаснішого принципу R_5 : цінні компоненти відходів вимагають точного моніторингу та автоматизованого вилучення. Його роль полягає у ретрансляції ресурсних пріоритетів під час виборів методу управління промисловим відходом. Його функція полягає в участі в прийнятті рішень про вилучення корисних компонентів з промислового відходу. Індекс вихідної зв'язаності – 1, і індекс вхідної зв'язаності – 2. Він може залежати як від R_1 , так і від R_2 (через фазовий склад, концентрації, розподіл за енергіями та ентропією).

5. Принцип кібернетичної керованості (R_5), це найвищий рівень, що дозволяє отримувати дані від усіх нижченаведених принципів. Його роль вкрай важлива, як системного інтегратора у фінальній точці поводження з відходом. Головна його функція визначена як інтеграція всієї інформації до автоматизованих систем, цифрових двійників, моніторингу. Цей принцип не впливає на інші принципи безпосередньо, але модифікує реалізацію всіх процесів через управління, зворотний зв'язок, оптимізацію. Індекс вихідної зв'язаності - 0, і індекс вхідної зв'язаності – 2 показує на вибірковість цього принципу.

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

Як приклад управління *вже створеними промисловими відходами*, на підставі запропонованої моделі «принципів», розглянемо процедури мінімізації відходів, що відбуваються 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. 1).

Таблиця 1 – Квазіалгоритм (на основі логіки п'яти принципів) та порядок керуючих дій з переробки відходів акумуляторних батарей

Алгоритм розрахунку	Порядок аналізу
markdown Копіювати Редагувати 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 "високоефективний процес" - Інакше → шукаєм рекуперативні або замкнуті схеми 3. Оцінка за принципом R_3(небезпека): - Якщо токсичність/вибухонебезпечність > критичної норми: → Методи дезактивації + пасивація - Інакше → допускається стандартна переробка 4. Оцінка за принципом R_4(ресурсоцінність): - Якщо зміст цінних елементів > x%:	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 Принцип 1 — Закон збереження речовини та енергії → Складна конструкція, різні фази → Потрібне попереднє сортування та демонтаж перед переробкою. Принцип 2 - Термодинамічна ефективність → Елементи (особливо літєві) мають високу ексергетичну цінність → Ефективні пірометалургійні (відновлення) і гідрометалургійні (вилуговування) методи. Принцип 3 - Небезпека речовини → Висока токсичність, ризик самозаймання → Потрібні: охолодження, хімічна нейтралізація електролітів, пожежозахист на складі. Принцип 4 — Ресурсоцінність → Виймаються: літій, кобальт, нікель, графіт, свинець → Можуть використовуватися повторно у виробництві батарей, сплавів та ін. Принцип 5 — Системна інтеграція → Роботизовані лінії розбирання → II для сортування за хімічним складом →

→ 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	Підтримка циклів "cradle-to-cradle" (від батареї до батареї).
--	--

Слід розуміти, що у фізично обґрунтованих «принципах» за основу приймається послідовно склад відходу, ставлення до енергії, що сприймається, безпека 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 2).

Таблиця 2 – 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;	Механічний 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 автоматизованої сортувальні лінії.	SCADA-системи на лініях збору АКБ, цифрові двійники переробних заводів

Як випливає з таблиці 2, 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 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.

Висновок

Запропонована ієрархія з п'яти принципів – 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.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 630 с.