

## ЦИРКУЛЯРНЕ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ БІОЕНЕРГЕТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУПЕРАЦІЇ

Криштоп Є.А.

Державний біотехнологічний університет  
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків  
kafagroeco@ukr.net

У статті обґрунтовано методологічні засади циркулярного управління відходами в контексті інтеграції біоенергетичних технологій і рекуперації ресурсів. Актуальність дослідження зумовлена фрагментарністю існуючих підходів до переробки відходів, методологічною неузгодженістю між екологічними, технологічними та управлінськими вимірами, а також відсутністю цілісного кількісного інструментарію для підтримки стратегічних рішень. Узагальнено підходи до циркулярного управління відходами; запропоновано розгляд відходів як вторинних ресурсів, що генерують матеріальні, енергетичні та соціально-економічні вигоди.

Розроблено інтегральний індекс циркулярності системи управління відходами (ІЦС), що об'єднує матеріальний та енергетичний виміри рекуперації в єдиний безрозмірний показник і слугує інструментом порівняння технологічних сценаріїв. Аналітична логіка методології реалізується як послідовність: ідентифікація потоків відходів – вибір технологій – розрахунок ІЦС – інтерпретація результатів – зворотний зв'язок для коригування стратегії управління. Проведено порівняльний аналіз ключових технологій – анаеробного зброджування, піролізу, газифікації, компостування та спалювання з рекуперацією тепла – за критеріями умов застосування, екологічної доцільності та умовних значень ІЦС. Демонстраційний розрахунок для умовного муніципального потоку органічних відходів обсягом 10 000 т/рік показав, що поєднання анаеробного зброджування і компостування підвищує ІЦС з 0,00 до 0,45–0,62 залежно від вагових коефіцієнтів та забезпечує скорочення викидів парникових газів приблизно на 2 200 т CO<sub>2</sub>-екв./рік. Перехід до циркулярної моделі розглядається як формування адаптивної системи управління зі зворотними зв'язками, що узгоджує технологічні, економічні та регуляторні механізми.

Запропонований підхід узгоджується з міжнародними рекомендаціями UNECE/OECD щодо вимірювання циркулярної економіки та може застосовуватися в екологічному управлінні, стратегічному плануванні й оцінці технологічних сценаріїв на муніципальному та регіональному рівнях. *Ключові слова:* циркулярна економіка, системи управління відходами, біоенергетика, рекуперація ресурсів, індекс циркулярності (ІЦС), анаеробне зброджування, піроліз, стратегічне екологічне планування

### Circular Waste Management: Methodology for Integrating Bioenergy and Resource Recovery Technologies. Kryshchop Ye.

This study develops the methodological foundations of circular waste management in the context of integrating bioenergy technologies and resource recovery. The need for a coherent methodology arises from the fragmentation of existing approaches to waste treatment, the lack of methodological alignment between environmental, technological, and managerial dimensions, and the absence of integrated quantitative tools for strategic decision support. Existing approaches to circular waste management are synthesised and waste is conceptualised as a secondary resource capable of generating material, energy, and socio-economic benefits.

An integral circularity index for waste management systems (CIWMS) is proposed, combining material and energy recovery dimensions into a single dimensionless indicator that serves as a tool for comparing technological scenarios. The analytical logic of the methodology is structured as a sequence: waste flow identification – technology selection – CIWMS calculation – results interpretation – feedback for management strategy adjustment. A comparative analysis of key technologies – anaerobic digestion, pyrolysis, gasification, composting, and incineration with heat recovery – is conducted against criteria of application conditions, environmental feasibility, and indicative CIWMS values. A demonstration calculation for a hypothetical municipal organic waste flow of 10,000 t/year shows that the combination of anaerobic digestion and composting increases the CIWMS from 0.00 to 0.45–0.62 depending on weighting coefficients and reduces greenhouse gas emissions by approximately 2,200 t CO<sub>2</sub>-eq./year. The transition to a circular model is framed as the development of an adaptive management system with feedback mechanisms that align technological, economic, and regulatory dimensions.

The proposed approach is consistent with UNECE/OECD guidelines on measuring the circular economy and is applicable to environmental management, strategic planning, and the evaluation of technological scenarios at the municipal and regional levels. *Key words:* circular economy, waste management systems, bioenergy, resource recovery, circularity index (CIWMS), anaerobic digestion, pyrolysis, strategic environmental planning

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах загострення проблеми поводження з твердими побутовими та промисловими відходами питання переходу до циркулярної моделі управління набуває стратегічного значення. За оцінками Світового

банку, у 2020 році у світі було утворено близько 2,2 млрд т твердих побутових відходів, і до 2050 року цей показник може зрости до 3,88 млрд т, причому понад 70 % відходів і надалі спрямовується на полігони [1].



В Україні ситуація є більш проблемною: відповідно до Національного плану управління відходами до 2033 року, понад 90 % побутових відходів підлягає захороненню, тоді як рівень їх утилізації та енергетичного використання суттєво відстає від практик ЄС, де пріоритет надається переробленню та енергетичному відновленню відходів [2].

Попри активне поширення концепції циркулярної економіки, підходи до інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації у системи управління відходами залишаються неоднорідними та фрагментарними. Це обмежує можливості формування замкнених циклів ресурсокористування, ускладнює порівнюваність результатів оцінювання та знижує ефективність екологічного обліку і стратегічного планування.

Особливої складності проблема набуває для органічних і змішаних потоків відходів, де поєднання матеріального відновлення та енергетичного використання не завжди піддається одночасній оптимізації. За відсутності узгодженої методологічної основи та кількісного інструментарію існує ризик зведення циркулярності до окремих технологічних рішень, що не відображають системного характеру функціонування систем управління відходами.

**Актуальність дослідження.** Актуальність зумовлена необхідністю формування узгодженого методологічного підходу до аналізу циркулярного управління відходами в умовах інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації. Посилення екологічних ризиків, зміна клімату, виснаження ресурсів і зростання запиту на сталий розвиток обумовлюють обмеженість традиційних лінійних моделей поводження з відходами [3].

Сучасні дослідження свідчать, що ключовою перешкодою впровадження принципів циркулярної економіки є не дефіцит технологій, а методологічна неузгодженість між екологічними, технологічними та управлінськими підходами [4]. Зокрема, Matheri et al. (2024) показали, що інтеграція цифрових моделей у системи управління органічними відходами підвищує точність прогнозування виходу біометану на 15–25 %, однак без узгодженої методологічної рамки ці результати залишаються ізольованими від процесів прийняття управлінських рішень [5]. У цьому контексті розроблення цілісної методології циркулярного управління відходами є необхідною передумовою переходу від декларативного визнання їх ресурсного потенціалу до його системної реалізації.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження спрямоване на розвиток методологічного апарату еколого-економічного аналізу циркулярної економіки, зокрема формалізацію підходів до оцінювання систем управління відходами. Запропонований підхід узгоджує теоретичні моделі з практичними завданнями природоохоронного управління, інтегруючи їх у процеси прийняття рішень.

Практичне значення полягає у застосуванні результатів при розробленні стратегічних і програмних документів, формуванні екологічної політики та просторовому плануванні. Методологія забезпечує кількісну оцінку циркулярності, обґрунтування вибору технологій і підвищення ефективності екологічного обліку. Підхід узгоджується з пріоритетами Основних засад державної екологічної політики України [6] та відповідає сучасним міжнародним підходам до вимірювання циркулярної економіки, зокрема рекомендаціям UNECE/OECD (2024), що акцентують необхідність методологічної узгодженості та формалізації процедур оцінювання [7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науковій літературі спостерігається стійке зростання інтересу до циркулярної економіки та управління відходами [8, 9]. Водночас у наукових дослідженнях переважають описові або технологічно орієнтовані підходи, тоді як застосування формалізованих методів вибору технологій, зокрема на основі підходів Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), залишається обмеженим [10].

Окремі роботи спрямовані на кількісне моделювання. Зокрема, Hernández-Romero et al. (2024) запропонували модель мультицільової оптимізації систем «waste-to-energy» в умовах циркулярної економіки, однак інтеграція отриманих результатів у комплексні управлінські рішення представлена обмежено [11]. Paramichael et al. (2023) систематизували індикатори циркулярності, проте їх застосування здебільшого обмежується окремими потоками без урахування міжрівневих зв'язків [12]. Спроби інтегральної оцінки залишаються обмеженими. Edirisinghe et al. (2024) запропонували підхід до оцінки фактору циркулярності для промислових зон, який не враховує енергетичні потоки та механізми зворотного зв'язку [13]. У вітчизняних дослідженнях циркулярне управління відходами розглядається переважно на рівні окремих економічних і нормативних аспектів [14], тоді як технологічні та методологічні підходи залишаються недостатньо інтегрованими, що узгоджується з міжнародними рекомендаціями у сфері вимірювання циркулярної економіки [7].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на розвиток методологічного апарату, у більшості досліджень відсутня узгоджена логіка переходу від ідентифікації потоків відходів до вибору технологій і подальшого використання результатів у прийнятті управлінських рішень. Обмеженим залишається також врахування зворотних зв'язків між результатами оцінювання та коригуванням стратегій управління.

Недостатньо дослідженим є інтегрування біоенергетичних і матеріальних потоків рекуперації в єдину кількісну систему оцінки циркулярності. Існуючі підходи здебільшого мають фрагментарний характер або обмежуються описовими характеристиками технологій без формалізованих критеріїв

вибору та інтегральних показників ефективності, що знижує їх прикладну цінність.

Таким чином, актуальним залишається розроблення підходу, який забезпечує послідовність аналітичних етапів, кількісну оцінку циркулярності та інтеграцію результатів у систему управління відходами.

**Новизна.** Наукова новизна дослідження полягає у розробленні методологічного підходу до циркулярного управління відходами, що, на відміну від існуючих, поєднує аналітичну логіку із зворотними зв'язками, інтегральний індикатор ІЦС та порівняльну оцінку технологій.

На відміну від підходів Edirisinghe et al. [13], де фактор циркулярності оцінюється переважно за матеріальними потоками і не охоплює енергетичного виміру, запропонований ІЦС інтегрує обидва виміри в єдиний показник. На відміну від Hernández-Romero et al. [11], запропонована методологічна рамка включає зворотні зв'язки та забезпечує інтеграцію результатів оцінювання у процесі прийняття управлінських рішень. Порівняльну характеристику підходів подано у таблиці 1.

**Методологічне значення.** Методологічне значення роботи полягає у формуванні узгодженої аналітичної логіки дослідження циркулярного управління відходами, що ґрунтується на чіткому розмежуванні етапів ідентифікації потоків, вибору технологій, розрахунку ІЦС та інтерпретації результатів. Такий підхід підвищує відтворюваність і порівнюваність результатів у різних наукових і прикладних контекстах.

Запропонована рамка інтегрує технологічні, економічні та управлінські виміри аналізу, не зводячи складність систем управління відходами до ізольованих показників. Це робить її застосовною не лише для біоенергетики, а й для будь-яких систем матеріальної рекуперативності – у стратегічному плануванні, екологічному обліку та оцінці ризиків. Узагальнену аналітичну логіку подано на рис. 1.

**Викладення основного матеріалу.** Запропонована методологія ґрунтується на тракту-

ванні відходів як вторинних ресурсів, здатних генерувати матеріальні, енергетичні та соціально-економічні вигоди. Її аналітична логіка передбачає послідовний перехід від характеристик потоків до управлінсько значущих результатів. Ключовою відмінністю від описових підходів є формалізований зворотний зв'язок між блоками вибору технологій і управлінських рішень, що перетворює методологію з одноразового аналітичного інструменту на механізм адаптивного управління.

Важливою методологічною передумовою є розмежування логіки дослідження та технологічних рішень, що запобігає редукації складних взаємодій у системах управління відходами до суто технічних параметрів і забезпечує коректну інтерпретацію результатів у природоохоронному контексті. Запропонований підхід реалізується як послідовність етапів: ідентифікація потоків → вибір технологій → розрахунок ІЦС → інтерпретація результатів → зворотний зв'язок (рис. 1).

Центральним кількісним елементом запропонованої методології є інтегральний індекс циркулярності системи управління відходами (ІЦС), що визначається за формулою (1):

$$\text{ІЦС} = \alpha \cdot (R_m / W) + \beta \cdot (R_e / E_{\max}) - \gamma \cdot (D / W) \quad (1)$$

де усі компоненти індексу є нормованими безрозмірними величинами;  $R_m$  – маса матеріально рекуперованих ресурсів (digestate, компост, біобугілля), т/рік;  $W$  – загальний обсяг вхідних відходів, т/рік;  $R_e$  – обсяг виробленої відновлюваної енергії, кВт·год/рік;  $E_{\max}$  – теоретично максимальний енергетичний потенціал потоку відходів, кВт·год/рік;  $D$  – обсяг відходів, що спрямовані на захоронення, т/рік;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – вагові коефіцієнти відповідно матеріального відновлення, енергетичного відновлення та штрафу за захоронення.

Симетрична адитивна форма рівняння усуває асиметрію попередньої версії, у якій  $D$  фігурував лише в енергетичному доданку. За умовчанням

Таблиця 1

### Порівняльна характеристика запропонованого підходу та існуючих методологій

Критерій	Існуючі підходи	Запропонована рамка
Аналітична логіка	Фрагментарна: технологія → результат	Поетапна: потоки → технологія → ІЦС → рішення
Зворотні зв'язки	Відсутні або не формалізовані	Включені як елемент адаптивного управління
Кількісний індикатор	Окремі показники (вихід газу, ефективність)	Інтегральний індекс циркулярності ІЦС [0; 1]
Тип оцінки	Переважно технологічна або вартісна	Комбінована: матеріальна + енергетична + соціальна
Охоплення потоків	Матеріальний АБО енергетичний	Інтегроване (матеріальний + енергетичний + нутрієнтний)
Зв'язок з управлінням	Декларативний	Формалізований через ІЦС та ієрархію рішень

Примітка: узагальнення існуючих підходів виконано на основі аналізу літературних джерел [10–13].

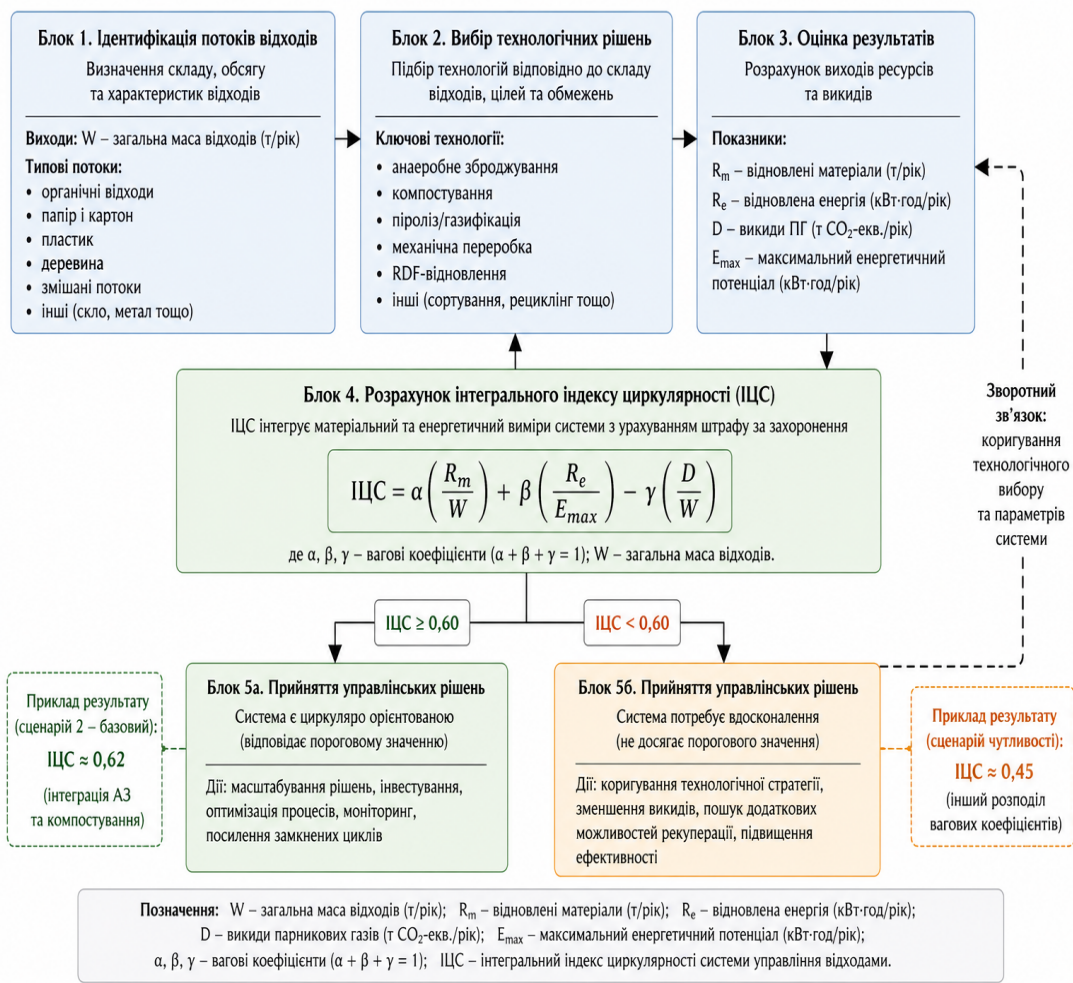


Рис. 1. Аналітична модель циркулярного управління відходами із зворотними зв'язками (розроблено автором)

$\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ , що рівномірно розподіляє внески всіх трьох компонентів. Калібрування коефіцієнтів рекомендується здійснювати через сценарний аналіз або на підставі регіональних пріоритетів управління відходами [7, 16].

Значення, як правило, знаходиться в діапазоні [0; 1], де 0 відповідає повністю лінійній системі (усі відходи на полігоні), а 1 – ідеальній циркулярній системі (нульове захоронення, повна рекуперація матеріалів і енергії). Порогове значення для кваліфікації системи як «циркулярно орієнтованої» умовно встановлюється на рівні ІЦС  $\geq 0,60$ , що корелює з цілями ЄС щодо перенаправлення не менше 60 % органічних відходів від полігонів [3]. Порогове значення є евристичним орієнтиром і може варіювати залежно від регіонального контексту, типу потоків відходів та національних стратегічних цілей [7, 16]. Якщо за результатами моніторингу ІЦС опускається нижче порогу, механізм зворотного зв'язку передбачає повернення до блоку вибору технологій і коригування стратегії (рис. 1).

Вибір технологій є ключовим аналітичним кроком, оскільки перелік доцільних рішень принципово

залежить від морфологічного складу відходів, наявності інфраструктури та управлінських пріоритетів – механічне перенесення узагальнених схем без урахування регіональної специфіки знижує аналітичну релевантність результатів [16]. Аналітичну порівняльну характеристику основних технологій за критеріями умов застосування, екологічної доцільності та умовних значень ІЦС подано у таблиці 2.

З таблиці 2 видно, що найвищі значення ІЦС забезпечує анаеробне зброджування (0,75–0,90), оскільки воно одночасно вирішує завдання матеріальної рекуперації (digestate, рекуперація P та N) та енергетичного відновлення (біогаз). Спалювання з рекуперацією тепла, незважаючи на поширеність, характеризується найнижчими значеннями ІЦС (0,25–0,40) через відсутність матеріальних потоків рекуперації та проблему золи. Це відповідає принципу EU Waste Hierarchy щодо пріоритетності матеріального відновлення перед енергетичним використанням [3].

На етапі ідентифікації потоків відходів доцільно використовувати міжнародні класифікаційні рамки як інструменти структуризації дослідження. У запропонованій методологічній логіці такі рамки застосову-

Таблиця 2

**Аналітична порівняльна характеристика технологій біоенергетики та рекуперації у системі циркулярного управління відходами**

Технологія	Вхідний матеріал	Основний продукт	Умови застосування	Екологічна доцільність	ЩС (умовн.)
Анаеробне зброджування	Органічні відходи, мул, гній	Біогаз (60–70 % CH <sub>4</sub> ), digestate	Вологість >60%, вміст ОР >30%	Висока: рекуперація С, N, Р; зниження GHG	0,75–0,90
Піроліз	Деревні, с/г відходи, осад стічних вод	Біовугілля, піролізний газ, смоли	Вологість <15%, термостійка фракція	Висока: секвестрація вуглецю, поліпшення ґрунту	0,60–0,80
Газифікація	ТПВ, тверда біомаса	Синтез-газ (H <sub>2</sub> + CO)	Низька вологість, однорідний склад	Середня: потребує очищення газу від смол	0,50–0,70
Компостування	Харчові, рослинні відходи	Компост (гумус, NPK)	Аеробні умови, C/N = 25–35	Висока: повернення нутрієнтів у ґрунт	0,65–0,80
Спалювання + рекуперація тепла	Змішані ТПВ (залишки після сортування)	Електро-/ теплоенергія	Лише після вилучення вторсировини	Низька (фінальна стадія): золова проблема	0,25–0,40

Примітка: значення ЩС наведено як орієнтовні на основі узагальнення літературних джерел щодо показників матеріальної та енергетичної ефективності та індикаторів циркулярності технологій управління відходами [11–13] і використовуються для порівняльного аналізу.

ються не як універсальні схеми, а як аналітичні орієнтири, що забезпечують термінологічну узгодженість і порівнюваність результатів. Взаємодоповнювальні функції міжнародних рамок у запропонованому підході систематизовано у таблиці 3.

Формування системи показників є ключовим етапом переходу від якісної ідентифікації до подальшого аналізу. Методологічно доцільним є розмежування технологічних показників (ефективність конверсії, вихід продукту, питомі викиди) та соціально-економічних індикаторів (вартість рекуперованих ресурсів, скорочення витрат на полігонування, соціальні вигоди від зниження GHG). Ключовим синтетичним показником виступає розрахований ЩС, що інтегрує матеріальний та енергетичний виміри в єдиний інтегральний індикатор.

Для ілюстрації прикладного використання запропонованого підходу наведемо демонстраційний розрахунок для умовного муніципального потоку орга-

нічних відходів обсягом 10 000 т/рік (таблиця 4). Розглядаються три сценарії: базовий (захоронення на полігоні), комбінований АЗ + компостування та АЗ + піроліз.

У таблиці 4 наведено результати для сценарію 2 (зважені коефіцієнти), тоді як сценарій 1 використовується для ілюстрації чутливості ЩС до вибору вагових параметрів. Розрахунок для сценарію «АЗ + компост» за двома наборами коефіцієнтів: Сценарій 1 (рівні ваги,  $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ ):  $\text{ЩС} = 0,217 + 0,250 - 0,017 \approx 0,45$ . Сценарій 2 (пріоритет матеріального відновлення,  $\alpha=0,5$ ;  $\beta=0,4$ ;  $\gamma=0,1$ ):  $\text{ЩС} = 0,325 + 0,300 - 0,005 \approx 0,62$ .

Отримані значення показують, що за рівних ваг (сценарій 1) система не досягає порогу циркулярності ( $\text{ЩС} \approx 0,45 < 0,60$ ), тоді як за пріоритизації матеріального відновлення (сценарій 2) ЩС зростає до  $\approx 0,62$  і система переходить у категорію «циркулярно орієнтованої».

Таблиця 3

**Роль міжнародних методологічних рамок у дослідженні циркулярного управління відходами**

Методологічна рамка	Основна функція	Роль у запропонованому підході
Waste Hierarchy (EU Dir. 2008/98)	Концептуальна	Визначення пріоритетності методів: запобігання → повторне використання → рециклінг → відновлення → знешкодження
European Waste Catalogue	Класифікаційна	Структурована ідентифікація потоків відходів на етапі входу
MFA (Material Flow Analysis)	Аналітична	Кількісна оцінка матеріальних і енергетичних потоків для розрахунку $R_m$ та $R_e$ у формулі (1)
LCA (Life Cycle Assessment)	Оціночна	Оцінка екологічного навантаження технологій по всьому ЖЦ; верифікація значень ЩС

Демонстраційний розрахунок ІЦС для умовного потоку органічних відходів ( $W = 10\,000$  т/рік)

Показник	Полігон (базовий)	A3 + компост	A3 + піроліз	Примітка
Обсяг органічних відходів ( $W$ ), т/рік	10 000	10 000	10 000	Вхідний потік
Маса матеріальної рекуперації ( $R_m$ ), т/рік	0	6 500	5 500	digestate + компост / біовугілля
Частка рекуперованих матеріалів ( $R_m/W$ )	0	0,65	0,55	безрозмірна величина
Вироблена енергія ( $R_e$ ), $\times 10^3$ кВт·год/рік	0	3 000	4 000	біогаз / піролізний газ
Теор. макс. потенціал ( $E_{max}$ ), $\times 10^3$ кВт·год/рік	4 000	4 000	4 000	нормалізація $R_e/E_{max}$ у формулі (1)
Відходи на захоронення ( $D$ ), т/рік	10 000	500	500	залишки після переробки
ІЦС (сценарій 2: $\alpha=0,5$ ; $\beta=0,4$ ; $\gamma=0,1$ )	0,00	0,62	0,64	формула (1)
Скорочення GHG, тCO <sub>2</sub> -екв./рік	—	~2 200	~1 800	порівняно з базовим

Різниця між сценаріями наочно ілюструє чутливість ІЦС до вибору коефіцієнтів і підкреслює, що без обґрунтованого калібрування  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  результат може суттєво варіювати. Розрахунок є демонстраційним; верифікація вхідних даних обов'язкова для реального застосування.

Інтерпретація результатів завершує аналітичний цикл і є переходом від наукового розрахунку до прийняття рішень. Отримані значення ІЦС слід розглядати не як кінцеву відповідь, а як інформаційну основу: вони набувають управлінського сенсу лише у поєднанні з контекстом – складом відходів, регуляторним середовищем та соціальними пріоритетами.

Розмежування наукової інтерпретації (аналіз із урахуванням обмежень методів) і управлінської (використання у стратегічному плануванні, екологічному обліку, оцінці ризиків) запобігає прямому перенесенню результатів у регуляторні рішення без належного контекстуального аналізу.

Інтеграція ІЦС у DPSIR-логіку (Driving forces → Pressures → State → Impact → Response) або в ESG-звітність підприємств дозволяє пов'язати технологічні показники з ширшою системою корпоративного та державного управління, що відкриває додаткові канали для практичного застосування результатів [7, 16]. Зворотний зв'язок між блоками управлінських рішень і вибору технологій забезпечує динамічне коригування стратегії та знижує управлінську невизначеність [7, 12].

**Головні висновки.** У дослідженні обґрунтовано методологічний підхід до циркулярного управління відходами в контексті інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації, що ґрунтується на поетапній аналітичній логіці із зворотними зв'язками та чіткому розмежуванні ідентифікації потоків, вибору технологій, оцінювання й інтерпретації результатів. Розроблено формулу інтегрального індексу цир-

кулярності системи управління відходами (ІЦС), що об'єднує матеріальний і енергетичний виміри рекуперації. Демонстраційний розрахунок свідчить, що перехід від базового сценарію (полігон) до сценарію «A3 + компостування» підвищує ІЦС з 0,00 до  $\approx 0,62$  та забезпечує скорочення GHG-емісій на  $\sim 2\,200$  т CO<sub>2</sub>-екв./рік для умовного потоку 10 000 т/рік. Сценарій «A3 + піроліз» характеризується ІЦС  $\approx 0,62$ – $0,64$ , що супроводжується вищим енергетичним виходом і меншими обсягами матеріальної рекуперації.

Показано, що серед розглянутих технологій анаеробне зброджування має високий потенціал циркулярності, тоді як спалювання з рекуперацією тепла характеризується найнижчими умовними значеннями ІЦС (0,25–0,40) та є виправданим лише як фінальна стадія після вичерпання інших опцій. Водночас ІЦС доцільно розглядати як аналітичний інструмент підтримки управлінських рішень, а не як самодостатню метрику.

**Обмеження методології.** Запропонований підхід має низку обмежень. По-перше, формула ІЦС не враховує якість рекуперованих матеріалів (зрілість компосту, вміст важких металів у digestate), що знижує точність оцінювання для специфічних потоків. По-друге, вагові коефіцієнти  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  потребують калібрування на основі сценарного аналізу або регіональних пріоритетів (зокрема, за жорстких цілей декарбонізації доцільне підвищення  $\gamma$  відносно  $\alpha$  і  $\beta$ ). По-третє, демонстраційний розрахунок є умовним і не підлягає прямому перенесенню без верифікації вхідних даних. Порогове значення ІЦС  $\geq 0,60$  має евристичний характер і потребує нормативного уточнення в межах конкретної системи управління. Зазначені обмеження визначають напрями подальших досліджень.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати застосовні для вдосконалення

підходів до оцінювання систем циркулярного управління відходами, розроблення інструментів стратегічного екологічного планування та регіональних програм. Перспективні напрями охоплюють емпіричну верифікацію ЩС на реальних системах

в Україні, адаптацію підходу до моніторингу в умовах зміни клімату та розвиток методики калібрування вагових коефіцієнтів. Методологія також придатна для використання у навчальному процесі в межах дисциплін екологічного й управлінського профілю.

### Література

1. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018. 295 p. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
2. Національний план управління відходами до 2033 року : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2024 р. № 1353-р. Київ, 2024. 60 с.
3. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste. Official Journal of the EU. 2008. L 312. P. 3–30. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
4. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
5. Matheri A. N., Sithole Z. B., Mohamed B. Data-Driven Circular Economy of Biowaste to Bioenergy with Conventional Prediction Modelling and Machine Learning. *Circular Economy and Sustainability*. 2024. Vol. 4. P. 929–950. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00329-3>
6. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
7. UNECE/OECD. *Guidelines for Measuring Circular Economy. Part A: Conceptual Framework, Indicators and Measurement Framework*. Geneva: UNECE, 2024. URL: <https://unece.org/statistics/publications/guidelines-measuring-circular-economy-part-conceptual-framework-indicators>
8. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
9. Chioatto E., Sospiro P. Transition from waste management to circular economy: The European Union roadmap. *Environment, Development and Sustainability*. 2023. Vol. 25. P. 249–276. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02050-3>
10. Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (Eds.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer, 2005. 1045 p.
11. Hernández-Romero I. M., Niño-Caballero J. C., González L. T. et al. Waste management optimization with NLP modeling and waste-to-energy in a circular economy. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 19946. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69321-7>
12. Papamichael I., Voukkali I., Zorpas A. A. Waste metrics in the framework of circular economy. *Waste Management & Research*. 2023. Vol. 41(12). P. 1741–1752. <https://doi.org/10.1177/0734242X231190794>
13. Edirisinghe L. G. L. M., de Alwis A. A. P., Wijayasundara M., Hemali N. A. Quantifying circularity factor of waste: Assessing the circular economy potential of industrial zones. *Cleaner Environmental Systems*. 2024. Vol. 12. 100160. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100160>
14. Салашенко Т. І., Самойленко В. С. Нормативно-правове забезпечення розбудови циркулярного підходу в Україні. *Бізнес Інформ*. 2024. №10. С. 159–174. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-10-159-174>
15. Awino F. B., Aritz S. E. Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 9–35. <https://doi.org/10.1002/ieam.4774>
16. Vagiona D. G. Assessment of Circular Economy Implementation in Municipal Waste Management Through Performance Indicators and Citizens' Opinion in a City in Western Greece. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 5. 2265. <https://doi.org/10.3390/su17052265>

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026