УДК 504.06 : 628.4 **DOI: 10.33042/3083-6727-2025-6-194-82-95**

А.Р. Перебинос

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПІДХОДІВ МЕХАНІКО-БІОЛОГІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗМІШАНИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В УКРАЇНІ

Стаття присвячена порівняльному аналізу ресурсно- та енергетично-орієнтованих підходів до механіко-біологічного оброблення змішаних побутових відходів в Україні. Результати підтверджують доцільність впровадження ресурсно-орієнтованої моделі як більш узгодженої з цілями Європейського Союзу, принципами кругової економіки та стратегією «зеленої» відбудови.

Ключові слова: *управління відходами, матеріальне відновлення, біостабілізація, RDF/SRF, кругова економіка, зелена відбудова.*

Постановка проблеми

Статистичні дані щодо утворення побутових відходів (ПВ) в Україні демонструють суттєві розбіжності між джерелами. Зокрема, у Національному плані управління відходами з посиланням на дані Мінінфраструктури України зазначається, що у 2021 році в країні було утворено понад 10 млн тонн побутових відходів [1]. Аналітичні довідки того ж Міністерства говорять про утворення понад 7 млн тонн у 2022 році, понад 9 млн тонн у 2023 році та понад 8 млн тонн у 2024 році [2-4]. Водночас, за офіційними даними Державної служби статистика України, обсяги утворення ПВ у 2021-2023 роках становили 6,5 млн тонн, 5,2 млн тонн, 4,9 млн тонн відповідно [5]. Незважаючи на протиріччя у даних та певну тенденцію на зменшення обсягів утворення ПВ, незмінним залишається те, що більшість утворених відходів піддаються операціям видалення, тобто захороненню на полігонах чи сміттєзвалищах, без будь-якого попереднього оброблення.

Імплементація євроінтеграційного курсу України зумовила гармонізацію національного законодавства у сфері управління відходами. У червні 2022 року було прийнято рамковий Закон України «Про управління відходами» [6], положення якого узгоджуються з Директивою 2008/98/ЄС [7]. Ієрархія управління відходами, закріплена у вищезазначених нормативно-правових актах, визначає захоронення ПВ як найнижчий пріоритет, що зумовлює необхідність суттєвих трансформацій у національній системі управління відходами. У грудні 2024 року Кабінет Міністрів України затвердив Національний план управління відходами до 2033 року [1], який ініціював річний термін розробки Регіональних планів управління відходами. У межах цих документів планується кластеризація областей та визначення потреб у розвитку інфраструктурних об'єктів, зокрема полігонів, комплексів механіко-біологічного оброблення (МБО), станцій компостування та сортування, а також перевантажувальних пунктів. Ці об’єкти повинні забезпечити ефективне функціонування систем управління ПВ на рівні територіальних громад та регіонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нещодавні європейські дослідження МБО побутових відходів зосереджені на підвищенні ефективності відновлення матеріалів [8], узгодженні політик управління відходами [9], економічній доцільності [10] та мінімізації викидів [11, 12]. Порівняльний аналіз повномасштабних заводів МБО в Європі показує, що стабілізована органічна фракція рідко відповідає стандартам добрива та здебільшого використовується як покриття полігонів, тоді як інтеграція енергетичного відновлення забезпечує вищі показники перенаправлення відходів від захоронення [13]. Розробки у сфері технологічної оптимізації охоплюють вдосконалення просіювання, аерації, вологості та біореакторів для підвищення рівня стабілізації та вилучення матеріалів [14]. Порівняння конфігурації семи заводів МБО в Німеччині, Італії та Великобританії за допомогою оцінки життєвого циклу та аналізу потоку матеріалів виявило високий рівень відновлення металів та змінну продуктивність в інших відновлених фракціях [15]. Інша група авторів дійшла висновку, що технічні та екологічні аспекти демонструють сильнішу синергію, ніж економічні фактори, у просуванні цілей кругової економіки у 27 європейських країнах [16].

В Україні дослідження зосереджені на проблемах впровадження та стратегіях оптимізації МБО. Основна увага приділяється вдосконаленню технологій сортування через вивчення морфологічного складу змішаних ПВ та біологічної

 © А.Р. Перебинос

стабілізації, а також підготовці відходів до енергетичного відновлення через виробництво альтернативного палива RDF/SRF [17, 18]. Дослідження розглядають потенціал складу ПВ в Україні для виготовлення RDF та його інтеграцію в промисловість і теплоенергетику, зокрема через співспалювання з іншими видами палива [19,20]. Окремі роботи визначають МБО як перспективну технологію для регіонів із наявними потужностями промислового споживання, водночас акцентуючи на бар'єрах, пов'язаних із низькими податками на захоронення та відсутністю належного моніторингу викидів [21]. Дослідження також охоплюють оцінку кліматичних ефектів термічної деструкції відходів [22, 23], розвиток рециклінгу [24], імплементацію норм ЄС та нормативно-правове забезпечення управління відходами в кризових умовах [25, 26]. Комплексні підходи, що поєднують відновлення вторинних ресурсів та енергетичну утилізацію, розглядаються як потенційна основа регіональних систем управління [27].

Незважаючи на широкий спектр досліджень, комплексні дослідження, що поєднують екологічні, соціальні та економічні аспекти впровадження МБО у контексті розвитку, залишаються недостатньо представленими.

Мета статті

Метою дослідження є здійснення SWOT-аналізу двох альтернативних схем МБО, які відрізняються концептуальними підходами до отримання кінцевих продуктів оброблення:

- *Ресурсно-орієнтований підхід* передбачає максимальне вилучення придатних до рециклінгу вторинних матеріалів під час механічного сортування, після чого залишкова органічна фракція проходить біологічну стабілізацію з утворенням технічного компосту.
- *Енергетично-орієнтований підхід* зосереджується на підготовці відходів до виробництва твердого відновлювального палива RDF/SRF, яке використовується у технологіях генерації теплової та електричної енергії з відходів (waste-to-energy, WtE).

Запропоноване порівняння спрямоване на виявлення переваг, обмежень, можливостей та ризиків кожної зі схем в умовах існуючих систем управління ПВ в українських громадах, а також з огляду на потребу їх гармонізації з принципами та цілями, закріпленими у законодавстві ЄС.

Виклад основного матеріалу

Теоретичні відомості. Механіко-біологічне оброблення змішаних ПВ передбачає послідовне застосування механічних операцій фракційного розділення та сортування для вилучення ресурсоцінних компонентів (вторсировини) та біологічної стабілізації залишкової фракції з метою зменшення її обсягу, маси та біохімічної активності перед остаточним видаленням. До окремо зібраних відходів слід застосовувати окремі механічні операції – механічне та/або ручне сортування та стиснення вторсировини для транспортування на підприємств рециклінгу, а також операції біологічного відновлення для роздільно зібраних біовідходів, зокрема компостування чи анаеробне зброджування. Відповідно до положень Національного плану управління відходами до 2033 року [1], в Україні передбачається будівництво 126 об'єктів МБО. Водночас документ не конкретизує потоки відходів, для яких заплановано застосування цієї технології, і не визначає оптимальні технічні підходи до її реалізації.

Ресурсно-орієнтований підхід МБО передбачає максимальне відокремлення ресурсоцінних матеріалів для подальшого рециклінгу та біологічну стабілізацію органічної складової з отриманням технічного компосту або компостоподібного продукту (compost-like output). Компостоподібний продукт являє собою стабілізовану речовину, багату на органічні сполуки, що утворюється внаслідок аеробного розкладання залишкових побутових відходів. Зазвичай такий матеріал просіюють, щоб виділити частинки менше ніж 10 мм, та додатково очищають від скла й пластику [10, 28]. Технологічна схема ресурсно-орієнтованого підходу МБО (рис. 1) передбачає послідовне механічне сортування, що включає фракційне розділення за допомогою грохотів і сит, вилучення металів магнітними та індукційними сепараторами, а також застосування оптичного обладнання та повітряних сепараторів для відокремлення полімерів і паперу. Подальше біооброблення органічної частини реалізується у вигляді аеробного компостування в тунельних біореакторах або на вітрових грядах з примусовою аерацією [8].

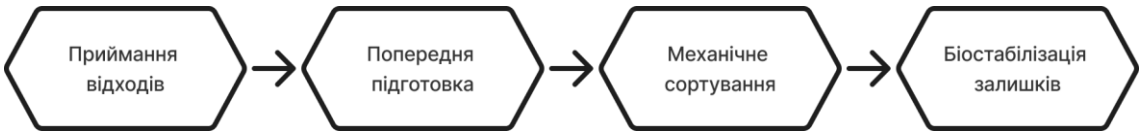

Рисунок 1. Схема ресурсно-орієнтованого підходу МБО

Таблиця 1

Класи SRF згідно з EN ISO 21640:2021 [29]

Класифікаційні характеристики	**Статистичний показник**	**Одиниця виміру**	**Класи**				
			1	**2**	**3**	**4**	**5**
Нижча теплота згоряння (net calorific value – NCV)	Середнє значення	МДж/кг	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Вміст хлору (Cl)	Середнє значення	% маси (с.р.)	≤0.2	≤0.6	≤1.0	≤1.5	≤3
Вміст ртуті (Hg)	Медіана	мг/МДж	≤0.02	≤0.03	≤0.05	≤0.10	≤0.15
	P80	мг/МДж	≤0.04	≤0.06	≤0.10	≤0.20	≤0.30

Примітка: с.р. – сухої речовини.

На відміну від ресурсно-орієнтованої схеми, ключовим завданням енергетично-орієнтованого підходу МБО є виробництво енергетичного продукту – RDF/SRF-палива. RDF (refuse-derived fuel) формується з висококалорійних горючих фракцій побутових відходів (пластик, папір, картон, текстиль, деревина), які відокремлюються під час механічної обробки та є непридатними для рециклінгу. RDF зазвичай підлягає додатковій обробці для приведення до технічних вимог (табл. 1), визначених у стандарті EN ISO 21640:2021 (в Україні гармонізовано як ДСТУ EN ISO 21640:2022), що дозволяє класифікувати його як тверде відновлене паливо – SRF (solid recovered fuel).

Отже, у схемі виробництва RDF головна увага приділяється вилученню висококалорійних компонентів відходів, які при роздільному збиранні чи якісному сортуванні на об'єкті МБО можуть бути направлені на рециклінг. Після первинного сортування відходи піддаються механічному подрібненню, відокремленню інертних матеріалів та органічної фракції, яка спрямовується на біостабілізацію (рис. 2). Технологічний процес виробництва RDF включає двоступеневе подрібнення відходів, інтенсивне сушіння матеріалу за допомогою барабанної чи стрічкової сушарки для досягнення оптимальної вологості, а також брикетування або гранулювання палива. Контроль якості зосереджується на визначенні теплотворної здатності, вмісту хлору та ртуті (табл. 1), що має вирішальне значення для безпечного та ефективного використання палива у промислових технологіях.

Енергетично-орієнтована схема сучасного об'єкта МБО потребує значно більших капітальних та операційних витрат, що зумовлено складнішою технологічною структурою виробництва RDF.

- Багатоступенева система подрібнення: для дроблення еластичних матеріалів (текстиль, гума) використовують низькошвидкісні шредери зсувного типу з частотою обертання 15-30 об/хв; для подрібнення скла та кераміки ефективними є ударні молоткові дробарки з марганцевої сталі, які забезпечують розбиття матеріалу на безпечні фрагменти; заключний етап гомогенізації передбачає використання високошвидкісних тонкоподрібнювачів, що дають змогу досягати необхідного розміру частинок у діапазоні 10-50 мм.
- Обов'язкове сушіння, оскільки навіть якщо вологу органічну фракцію відокремити на початку лінії оброблення, то решта фракцій все одно містить значну кількість вологи. Процес є енергозатратним та дорогим, адже потребує використання теплогенераторів, які зазвичай працюють на природному газі, мазуті або інших викопних видах палива.
- Контроль якості RDF включає регулярний відбір проб відповідно до затвердженого плану, застосування належних методів підвибірки (комбіновані вибіркові та складені зразки), проведення лабораторних випробувань та систематичну фіксацію результатів із подальшою статистичною оцінкою отриманих показників (EN ISO 21645:2021).

Згідно з наказом Міндовкілля України №263 від 10.02.2025 р., що набуває чинності не раніше дня припинення або скасування дії правового режиму воєнного стану в Україні [30], захоронення відходів без попереднього оброблення заборонено. Об’єкти МБО змішаних ПВ мають забезпечити відповідність цим вимогам, оскільки біостабілізація органічної фракції, що є основним джерелом утворення метану (газу з парниковим потенціалом у 28-34 рази вищим за CO_2), дозволяє суттєво скоротити обсяг викидів парникових газів від сміттєзвалищ та полігонів.

Рисунок 2. Схема енергетично-орієнтованого підходу МБО

Спалювання RDF може призводити до умовного зменшення загальних викидів парникових газів лише у порівнянні з прямим захороненням необроблених відходів або спалюванням викопного палива. В абсолютному ж вимірі RDF залишається джерелом викопного CO_2, адже його висококалорійна частка представлена переважно пластиком, виробленим із викопних ресурсів. Згідно з методологіями EU-ETS [31] та IPCC [32], біогенна складова RDF (папір, деревина, харчові залишки) вважається «вуглецево нейтральною», проте вона має нижчу теплотворну здатність і спричиняє підвищене утворення золи, що знижує клас RDF. Хоча спалювання однієї тонни RDF може замінити 0,5-0,7 т вугілля, а сумарні викиди CO_2 вважаються нижчими, така технологія не може розглядатися як «зелена», оскільки підтримує попит на виробництво одноразових пластикових матеріалів та створює ризики токсичних викидів (NO_x, діоксини тощо). У цьому контексті ЄС чітко окреслює пріоритети – запобігання утворенню відходів, повторне використання та рециклінг, а RDF розглядається лише як «перехідне рішення» для оброблення залишкових фракцій відходів у регіонах, де відсутні альтернативні варіанти відновлення.

Методика дослідження. SWOT-аналіз широко застосовується у процесі стратегічного планування для визначення сильних та слабких сторін будь-якої системи під впливом власних характеристик, а також можливостей та загроз, які можуть спричинити зовнішні чинники. Спираючись на минулий досвід досліджень [33-35], цей інструмент був обраний як основний метод даного дослідження. SWOT-аналіз двох підходів МБО здійснено з урахуванням наступних критеріїв: техніко-економічних (вартість реалізації, інвестиційна привабливість, операційні витрати, економічна ефективність тощо) та еколого-соціальних (вплив на довкілля, безпечність для здоров'я людей, соціальна прийнятність, узгодженість з круговою економікою та Євроінтеграцією тощо).

Для порівняння результатів SWOT-аналізу була запропонована бальна система для уникнення суб'єктивного впливу. Порівняльна модель базується на бальній оцінці з урахуванням вагових коефіцієнтів для кожного критерію. Таблиця 2 містить характеристику шкали оцінювання, а таблиця 3 – вагові коефіцієнти обраних критеріїв для оцінки. Формула для розрахунку зваженої оцінки наступна:

$$Score = \sum_{i=1}^{n} (Бал_i \cdot Вага_i) \quad (1).$$

Під час SWOT-аналізу було враховано наступні зовнішні чинники, які найбільше характеризують контекст України на поточний 2025 рік:

- повномасштабне вторгнення росії та активні бойові дії;
- нестабільна економіка, соціальний сектор якої фінансується за рахунок донорських та/чи кредитних коштів, та обмеження муніципальних бюджетів;
- євроінтеграційний курс: зобов'язання гармонізації українського законодавства з директивами ЄС та його подальшого імплементування;
- концепції «зеленої» відбудови громад та «build Ukraine back better».

Таблиця 2

Характеристика шкали оцінювання

Бал	Опис
0	Критерій не виконується зовсім чи має негативний вплив
1	Дуже слабке виконання значні обмеження або ризики
2	Низький рівень, ефективність/відповідність часткова
3	Середній рівень, частково задовільно
4	Високий рівень, більшість вимог/очікувань виконано
5	Максимально позитивний ефект, повна відповідність, відсутність бар'єрів

Таблиця 3

Характеристика критеріїв

Критерій	Вага, %
Техніко-економічні	
Вартість реалізації та операційні витрати	20
Залучення коштів (інвестиційних чи донорських)	10
Економічна ефективність (в т. ч. дохідність)	10
Гнучкість системи	5
Еколого-соціальні	
Ресурсна ефективність	20
Вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини	10
Прийнятність для громад / соціальна підтримка	10
Сприяння круговій економіці та «зеленій» відбудові	10
Відповідність курсу ЄС	5

Результати та обговорення. У таблиці 4 представлено результати SWOT-аналізу двох підходів до механіко-біологічного оброблення змішаного потоку ПВ – ресурсно-орієнтованого та енергетично-орієнтованого, які у підсумку отримали 45 та 53 релевантних характеристик відповідно. Розподіл за компонентами SWOT-аналізу здійснився наступним чином: сильні сторони – 15 та 14 пунктів, слабкі сторони – 9 та 14, можливості – 12 та 11,

загрози 9 та 14 відповідно до послідовності розгляду схем.

Застосування методології SWOT-аналізу дало змогу здійснити комплексну оцінку кожної з досліджувальних схем, враховуючи як внутрішні особливості функціонування, так і зовнішні впливи. Водночас формування остаточних висновків щодо очевидної переваги одного з підходів залишається викликом через наявність суб'єктивного чинника під час інтерпретації результатів, а також через можливу варіативність у формулюванні кількості характеристик.

З метою підвищення об'єктивності аналізу було розроблено систему бального ранжування з пояснювальними примітками (табл. 2). Такий підхід дозволяє здійснити кількісну оцінки альтернатив під час порівняння, а також забезпечити основу для прийняття аргументованих рішень щодо доцільності впровадження оптимальної схеми МБО в практику управління ПВ громад України.

Таблиця 4

SWOT-аналіз схем МБО змішаних побутових відходів

SWOT - елемент	**Ресурсно-орієнтований підхід МБО**	**Енергетично-орієнтований підхід МБО**
1	**2**	**3**
Сильні сторони	*Техніко-економічні критерії* 1. Високий рівень вилучення ресурсоцінних матеріалів. 2. Гнучка технологія, що адаптується до різних потоків відходів – змішаних чи роздільно зібраних. 3. Може бути реалізовано на базі існуючих сортувальних станцій. 4. Забезпечує більшу інвестиційну привабливість, враховуючи цілі кругової економіки ЄС. 5. Можливість міжнародного фінансування в умовах Євроінтеграції (гранти, програми «зеленої» відбудови). 6. Вартість вторсировини на ринку не залежить від цін на енергоносії, на відміну від RDF. 7. Підтримує локальну економіку та малі й середні підприємства, які працюють із вторсировиною. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Екологічна сталість: мінімізація захоронення, відновлення ресурсів, зменшення викидів парникових газів. 2. Відповідає вимозі обов'язкового оброблення відходів перед захороненням. 3. Біостабілізована органіка може використовуватися для технічних цілей, наприклад рекультивації полігонів та сміттєзвалищ. 4. Відповідність ієрархії управління відходами. 5. Відповідність концепції «зеленого» відновлення громад.	*Техніко-економічні критерії* 1. Ринок збуту складається з приватного сектору промисловості (цементні заводи) та енергетичних компаній (ТЕЦ та ТЕС). 2. Приватний ринок збуту більш стійкий до воєнних ризиків: споживач RDF часто має власну енергосистему. 3. Стабільні доходи та збут продукції забезпечуються через довгострокові контракти з промисловістю. 4. Стабільна дохідність за рахунок можливої енергетичної нестабільності в країні. 5. Інвестиційна привабливість приватного сектору та банків забезпечується зрозумілою моделлю та коротким періодом окупності. 6. Відносно швидше повернення інвестицій, якщо існує партнерство з виробником енергії. 7. Потенціал для державно-приватного партнерства через залучення потужних енергетичних гравців. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Значне та швидке зменшення обсягів відходів для захоронення та зменшення викидів парникових газів. 2. Відповідає вимозі щодо попереднього оброблення відходів перед захороненням. 3. Біостабілізована органіка може використовуватися для технічних цілей, наприклад рекультивації полігонів та сміттєзвалищ. 4. Паливо з ПВ можна вважати альтернативним джерелом палива згідно ЗУ «Про альтернативні види палива». 5. Сприяє енергетичній незалежності

Продовження табл. 4

1	2	3
	6. Підтримує довгострокову ціль кругової економіки [36], задекларовану в Угоді про асоціацію з ЄС, та концепцію «не завдай шкоди» (DNSH) [37]. 7. Дає змогу запровадити екологічну звітність та облік матеріальних потоків, як вимагає ЄС. 8. Безпечніше для довкілля, ніж термічне відновлення, – немає діоксинів, золи, ризику спалювання небезпечних фракцій.	економіки та країни – RDF може частково замінити імпортоване викопне паливо. 6. Менші соціальні ризики на етапі збирання/сортування відходів, бо фокус не на формуванні екологічно свідомого населення. 7.Умовне зменшення викидів парникових газів при заміні викопного палива у промисловості.
Слабкі сторони	*Техніко-економічні критерії* 1. Потенційна контамінація ресурсоцінних матеріалів, що може обмежити їх комерційне використання. 2. Низька дохідність через невисоку ціну вторсировини, особливо без джерельного сортування, а також неможливість. реалізувати стабілізований органічний залишок як добриво. 3. Дохідність сильно залежить від ринку вторсировини, який коливається в умовах війни та логістичних обмежень. 4. Інфраструктура потребує значних інвестицій (автоматизоване та ручне сортування) – на фоні війни обмежені ресурси. 5. Повільне повернення інвестицій – особливо в умовах війни та нестабільності валют. 6. Економічна нестабільність через воєнний стан впливає на обсяги продажу вторсировини. 7. Система вразлива до воєнних ризиків (потребує стабільного енергоживлення, водопостачання тощо), особливо в прифронтових областях. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Менш сприяє повноцінній розбудові систем роздільного збирання у громадах. 2. Брак кадрів та технічної експертизи на рівні ОМС, особливо у прифронтових громадах.	*Техніко-економічні критерії* 1. Відсутній реальний ринок збуту в Україні та ускладнена доступність до зовнішнього ринку збуту. 2. Залежність від обмеженої кількості споживачів RDF, що робить систему менш гнучкою. 3. Відсутні національні технічні вимоги до RDF, виробленого з побутових відходів, прийняття яких може суттєво спотворити бізнес-модель розроблених проєктів. 4. Висока вартість логістики та потреба в адаптації котлів/печей споживачів RDF. 5. Потребує стабільних логістичних шляхів до споживачів RDF, що може бути порушено під час війни. 6. Інфраструктура потребує значних інвестицій (потужні дробарки та сушарки) – на фоні війни обмежені ресурси. 7. Технічно складно забезпечити, що в RDF паливо не потраплять небезпечні відходи, особливо якщо в громаді не налагоджена система управління відходами. 8. Вплив сезонного коливання складу ПВ на склад RDF. 9. Система вразлива до воєнних ризиків (потребує стабільного енергоживлення, водопостачання тощо), особливо в прифронтових областях. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Не сприяє повноцінній розбудові систем роздільного збирання у громадах. 2. Зниження обсягів вилучення ресурсоцінних матеріалів – більшість пластику буде йти на виробництво палива. 3. Суперечить принципам кругової економіки та частково відповідає ієрархії управління відходами. 4. Споживачі RDF потребують пройти процедуру ОВД [38] при модернізації

Продовження табл. 4

1	2	3
		обладнання та/або отримання інтегрованого довкіллєвого дозволу [39]. 5. Брак кадрів та технічної експертизи на рівні ОМС, особливо у прифронтових громадах.
Можливості	*Техніко-економічні критерії* 1. Інтеграція системи з роздільним збиранням ПВ, що покращить якість вторинної сировини та економіку процесу в цілому. 2. Підтримка програмами ЄС, що дозволить залучити необхідні інвестиції чи гранти для реалізації проєкту. 3. Розвиток вторинного ринку сировини та рециклінгу в Україні. 4. Розбудова національного реєстру переробників та платформи для торгівлі вторсировиною. 5. Пілотні проєкти в рамках «зеленої» відбудови можуть зробити цей підхід еталоном для нових об'єктів МБО в України. 6. Підтримка приватного сектору зростає зі зростанням ринку вторинної сировини. 7. Можливість експорту ресурсоцінних матеріалів на зовнішні ринки за умови очистки та відповідності вимогам. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Можливість швидко зменшити навантаження на полігони. 2. Сприяє створенню робочих місць у сфері сортування, логістики, моніторингу, інформування населення. 3. Залучення чи створення соціальних бізнесів, громадських організацій, муніципальних кооперативів. 4. Інтеграція з міською інфраструктурою (еко-квартали, ресурсні хаби). 5. Освітні кампанії можуть змінити поведінку громад і поліпшити сортування.	*Техніко-економічні критерії* 1. Інтеграція в енергетичну систему України та часткове заміщення викопного палива, в т.ч. імпортованого, в умовах енергетичних криз. 2. Фінансування через програми енергетичного відновлення. 3. Експорт RDF у перспективі за наявності сертифікації. 4. Менша залежність від ринку вторсировини, можливість контрактів з фіксованою ціною. 5. Потенціал створення кластерів «відходи-енергія» у промислових регіонах та розширення партнерства з енергетичними підприємствами. 6. Швидше запускати в громадах, які мають поблизу промислові об'єкти та слабку систему роздільного збирання ПВ, чи відбудовуються за індустріальним сценарієм (Дніпро, Кривий Ріг тощо). 7. Партнерство з великим бізнесом дозволяє швидко запускати проєкти. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Можливість швидко зменшити навантаження на полігони. 2. Створення нових робочих місць. 3. Може бути перехідним рішенням у громадах, де немає можливості будувати складні сортувальні системи, на період дії воєнного стану. 4. RDF, що містить біогенний вуглець, може зменшити вартість викидів CO_2 у контексті впровадження Системи торгівлі викидами ЄС (EU-ETS) [31].
Загрози	*Техніко-економічні критерії* 1. Висока конкуренція з RDF-моделлю: приватний сектор та ОМС можуть надавати перевагу швидким «паливним» рішенням. 2. Коливання цін на ресурсоцінні матеріали може робити систему фінансово нестабільною та дотаційною.	*Техніко-економічні критерії* 1. Залежність від наявності та стабільності ринку RDF, що робить систему вразливою до економічних коливань. 2. Ринок збуту, що включає ТЕЦ/ТЕС менш стійкий до воєнних ризиків. 3. Недостатнє законодавче регулювання.

Продовження табл. 4

1	2	3
	3. Нестабільний ринок вторинної сировини (коливання попиту, логістика, конкуренція з первинною сировиною) та слабкий сектор рециклінгу. 4. Відсутність сертифікаційної бази та класифікаційних вимог для прозорої реалізації вторсировини. 5. Інфляційний тиск, в т. ч. через воєнний стан, що призводить до зростання вартості обладнання та його експлуатації. 6. Військові дії та руйнування інфраструктури – ризик для безперебійної роботи. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Відсутність вимоги до оброблення відходів перед захороненням. 2. Недовіра з боку населення до ефективності сортування змішаних відходів. 3. Брак навченого персоналу та обмежені технічні ресурси в регіонах.	4. Посилення регулювання щодо складу та якості RDF з відходів, що потягне за собою додаткові фінансові витрати при виробництві. 5. Можливе посилення екологічних вимог щодо викидів при спалюванні RDF вплине на можливість реалізації продукції. 6. Інфляційний тиск, в т. ч. через воєнний стан, що призводить до зростання вартості обладнання та його експлуатації. 7. Військові дії та руйнування інфраструктури – ризик для безперебійної роботи. *Екологічно-соціальні критерії* 1. Спротив населення громад та громадянського суспільства до термічного видалення відходів. 2. Недостатній контроль за викидами – ризик погіршення якості повітря у містах. 3. Невідповідність стратегічному курсу ЄС на рециклінг, кліматичними цілями та обмеженням викидів CO_2. 4. Можливі обмеження з боку ЄС при розбудові інфраструктури, що не стимулює рециклінг. 5. Іміджеві втрати на міжнародній арені. 6. Ризик інституційної критики через пріоритет енергетичного видалення замість рециклінгу. 7. Брак навченого персоналу та обмежені технічні ресурси в регіонах.

Техніко-економічні критерії

Вартість реалізації та операційні витрати. МБО з акцентом на вилучення вторинної сировини передбачає розгалужену інфраструктуру – механічні сортувальні лінії, біологічні реактори для стабілізації органіки та системи очищення викидів. Це зумовлює високі початкові інвестиції й значні операційні витрати, пов'язані з експлуатацією та технічним обслуговуванням обладнання. Водночас реалізація ресурсно-орієнтованого підходу можлива на базі наявних сортувальних станцій із поступовим нарощуванням потужностей, що зменшує потребу у значних первинних витратах. Особливо критичним є фактор воєнного часу, коли інфляція й перебої з постачанням обладнання ускладнюють реалізацію проєктів загалом. Бал для ресурсно-орієнтованого підходу МБО – **3/5**. Реалізація енергетично-орієнтованого МБО вимагає вищого рівня капіталовкладень у потужні дробарки, сушильні установки та систему контролю якості (табл. 5). Технологія є енергоємною й залежить від стабільного ринку збуту RDF, що знижує її економічну привабливість у короткостроковій перспективі. Спрощена схема виробництва RDF, яка передбачає лише первинне подрібнення, вилучення домішок, сушіння та формування палива, може скоротити термін введення в експлуатацію та початкові витрати, проте призводить до зниження якості готового палива. Бал для енергетично- орієнтованого підходу МБО – **2/5**.

Залучення коштів. Проєкти з пріоритетом вилучення вторсировини добре вписуються у програми ЄС та міжнародних донорів, які орієнтуються на кругову економіку, зменшення обсягів відходів та підтримку інтеграції України до європейських стандартів. Це підвищує інвестиційну стійкість проєктів у довгостроковій перспективі та залучення коштів легше аргументувати у грантових

заявках, що обґрунтовує бал **4/5**. RDF-проєкти більше орієнтовані на приватний капітал і промислових партнерів, однак у них слабша підтримка донорів через «термічний» характер видалення та ризики зростання викидів CO_2. Наявність інтересу з боку бізнесу підвищує привабливість, але відсутність системних стимулів обмежує потенціал – **3/5.**

Таблиця 5

Порівняльна таблиця капітальних витрат на одиницю обладнання для об'єктів МБО з ресурсно-орієнтованим та енергетично-орієнтованим підходами [10]

Обладнання	**Приблизні витрати на одиницю обладнання, млн євро**	**МБО[1]**	**МБО[2]**
Попередній шредер (35 т/год)	0.65	опціонально	+
Повітряний класифікатор (10 т/год)	0.26	+	+
Оптичний сепаратор (10 т/год)	0.45	+	+
Фінальний подрібнювач (8 т/год)	0.8	-	+
Балістичний сепаратор (20 т/год)	0.24	+	+
Інше (конвеєри, інженерія, транспортування, монтаж та пусконалагоджувальні роботи)	0.84	+	+
Сушіння (20 т/год)	4.7	-	+
Загальний приблизний бюджет капітальних витрат, млн євро		2.44	7.94

Примітка: МБО[1] – ресурсно-орієнтований підхід; МБО[2] – енергетично-орієнтований підхід.

Економічна ефективність. Ресурсно-орієнтована схема залежить від ринку вторсировини, який в Україні характеризується волатильністю цін, нерозвиненою системою переробки й обмеженим попитом на окремі матеріали. Це робить економічну віддачу непередбачуваною й часто низькою, особливо у кризові періоди, що обґрунтовує оцінку **2/5**. RDF-модель має більший потенціал забезпечити стабільні грошові потоки завдяки довгостроковим контрактам з цементною промисловістю чи енергетичним сектором, де попит на паливо прогнозований і прив'язаний до імпортозаміщення викопних ресурсів. Незважаючи на залежність від цін на традиційні енергоносії, прогнозованість ринку робить цей підхід економічно ефективнішим – **3/5**.

Гнучкість системи. МБО з вилученням вторсировини може бути адаптована для оброблення як змішаних, так і окремо зібраних фракцій, а біологічна стабілізація дозволяє працювати з різним морфологічним складом відходів. Це забезпечує технологічну гнучкість у разі зміни регуляторних вимог або розвитку роздільного збирання – **4/5.** RDF-схема є менш гнучкою, оскільки її дохідність напряму залежить від наявності споживачів палива. У разі падіння попиту на RDF або змін у законодавстві (наприклад, посилення регуляції викидів) її ефективність різко знижується. Це обмежує варіативність розвитку і визначає нижчу оцінку – **2/5**.

Еколого-соціальні критерії

Ресурсна ефективність. Ресурсно-орієнтована модель МБО демонструє високий рівень ресурсної ефективності, оскільки спрямована на максимальне вилучення вторинної сировини, що дозволяє оцінити її у **4/5**. У випадку RDF-моделі значна частка ресурсоцінних матеріалів (передусім пластик) спрямовується на спалювання, що знижує рівень рециклінгу, тому її доцільно оцінити у **2/5**.

Вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. Схема з біостабілізацією органіки та відсутністю спалювання мінімізує ризики утворення діоксинів, токсичних викидів та золи, отже, має кращий профіль екологічної та санітарної безпеки – **4/5**. RDF-модель, навпаки, пов'язана з підвищеним ризиком погіршення якості повітря, потребою у контролі за викидами та загрозами для здоров'я населення в разі недотримання стандартів та правил експлуатації промислових установок, що знижує її оцінку до **2/5**.

Прийнятність для громад та соціальна підтримка. Ресурсно-орієнтована модель більш відповідає очікуванням громад, створює робочі місця та стимулює екосвідому поведінку населення, що формує вищий рівень соціальної підтримки – **4/5.** RDF-проєкти часто викликають опір місцевих жителів через асоціацію зі «спалюванням відходів» та потенційними екологічними ризиками, тому бал **2/5**, хоча також забезпечують громаду новими вакансіями.

Сприяння круговій економіці та «зеленій» відбудові. Модель МБО, орієнтована на вилучення вторсировини, напряму сприяє розвитку кругової економіки, інтегрується з іншими «зеленими» ініціативами та відповідає принципам відновлення після війни, що виправдовує бал **5/5**. RDF-модель суперечить базовим принципам циркулярності, оскільки орієнтована на енергетичне використання відходів замість повторного залучення ресурсів у

виробничий процес, тож її можна оцінити лише як **2/5**. Посилення вимог ЄС щодо запобігання утворенню відходів, повторного використання та рециклінгу зменшить привабливість RDF-виробництва, оскільки частина ресурсоцінних потоків (пластик, текстиль тощо) буде перенаправлена на відновлення, повторне використання або ж їх генерація загалом буде зменшуватися [10].

Таблиця 6

Інтегральна оцінка техніко-економічних та еколого-соціальних критеріїв підходів механіко-біологічного оброблення побутових відходів

Критерії	Вага, %	Бал		Інтегральна оцінка	
		МБО[1]	МБО[2]	МБО[1]	МБО[2]
Техніко-економічні					
Вартість реалізації та операційні витрати	20	3	2	0,6	0,4
Залучення коштів (інвестиційних чи донорських)	10	4	3	0,4	0,3
Економічна ефективність (в т. ч. дохідність)	10	2	3	0,2	0,3
Гнучкість системи	5	4	2	0,2	0,1
			Всього:	**1,4**	**1,1**
Еколого-соціальні					
Ресурсна ефективність	20	4	2	0,8	0,4
Вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини	10	4	2	0,4	0,2
Прийнятність для громад / соціальна підтримка	10	4	2	0,4	0,2
Сприяння круговій економіці та «зеленій» відбудові	10	5	2	0,5	0,2
Відповідність курсу ЄС	5	5	2	0,3	0,1
			Всього:	**2,4**	**1,1**
			Підсумковий бал:	**3,8**	**2,2**

Примітка: МБО[1] – ресурсно-орієнтований підхід; МБО[2] – енергетично-орієнтований підхід.

Відповідність курсу ЄС. Ресурсно-орієнтована схема відповідає європейській ієрархії управління відходами та вимогам щодо попереднього оброблення перед захороненням, що робить її найбільш узгодженою з політикою ЄС – **5/5**. RDF-підхід частково відповідає європейським вимогам у частині зменшення захоронення, але суперечить стратегічним цілям ЄС щодо пріоритету рециклінгу та скорочення викидів CO_2, тому бал є нижчим – **2/5**.

Інтегральна оцінка двох підходів до МБО змішаних ПВ засвідчує перевагу ресурсно-орієнтованого підходу, що отримав підсумковий бал 3,8 порівняно з 2,2 для енергетично-орієнтованого (табл. 6). Ресурсно-орієнтована схема переважила за більшістю еколого-соціальних критеріїв – передусім завдяки вищій ресурсній ефективності, позитивному впливу на довкілля та здоров'я населення, а також відповідності курсу ЄС і принципам кругової економіки. Водночас, хоча цей підхід вимагає значних капіталовкладень і має середній рівень економічної ефективності, його потенціал залучення міжнародного фінансування та адаптивність роблять його більш сталим у довгостроковій перспективі. Енергетично-орієнтована схема має певні переваги у сфері короткострокової дохідності та співпраці з промисловими споживачами, проте поступається у стратегічній узгодженості з екологічними цілями ЄС та суспільною прийнятністю. Загалом ресурсно-орієнтований підхід залишається більш стабільним і гнучким у поточних умовах, тоді як RDF-модель виявляє вищий потенціал прибутковості лише за наявності сталого попиту та приватних інвестицій.

Висновки

Порівняння двох підходів до МБО змішаних ПВ засвідчило, що, попри спільні елементи технологічного процесу, вони мають різні стратегічні орієнтири. Ресурсно-орієнтована схема спрямована на максимальне вилучення вторинної сировини та стабілізацію органічної складової, що робить її більш придатною для впровадження в громадах, орієнтованих на принципи кругової економіки. Енергетично-орієнтована схема з виробництвом RDF натомість фокусується на формуванні альтернативного палива та потребує гарантованого ринку збуту, що обмежує її застосування у громадах без промислових споживачів.

З економічного погляду, ресурсно-орієнтована модель відзначається нижчими початковими інвестиціями та гнучкістю масштабування, тоді як RDF-схема потребує значних капіталовкладень, але за умов стабільного ринку може забезпечити швидше повернення коштів. В екологічному вимірі перший підхід має переваги завдяки відсутності процесів спалювання та нижчим ризикам утворення викидів, тоді як RDF-виробництво пов'язане з підвищеним навантаженням на довкілля і меншим рівнем громадської прийнятності. Використання RDF слід

розглядати як тимчасовий інструмент у системі управління відходами – спосіб зменшення обсягів захоронення та заміщення частини викопних енергоносіїв. Оскільки спалювання фракцій відходів викопного походження, зокрема пластику, не відповідає довгостроковим кліматичним цілям і принципам сталого розвитку.

Отже, в контексті реформування системи управління відходами в Україні пріоритетним є впровадження ресурсно-орієнтованого підходу МБО, який узгоджується з принципами ЄС, концепцією «не завдай шкоди», сприяє переходу до кругової економіки та забезпечує вищу екологічну й соціальну ефективність у довгостроковій перспективі.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні оптимальних моделей інтеграції МБО з системами роздільного збирання, оцінці життєвого циклу технологій та визначенні їх ролі у реалізації цілей «зеленої» відбудови громад України.

Література

1. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року та визнання такими, що втратили чинність, деяких актів : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1353-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1353-2024-%D1%80 (дата звернення: 15.10.2025).
2. Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік : довідка / Міністерство інфраструктури України. – Київ, 2023. – URL: https://mindev.gov.ua/news/34323-analiz-stanu-sferi-povodzennia-z-pobutovimi-vidxodami-v-ukrayini-za-2022-rik (дата звернення: 15.10.2025).
3. Довідка щодо стану сфери управління побутовими відходами за 2023 рік / Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. – Київ, 2024. – URL: https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/dovidka-shhodo-stanu-sferi-upravlinnia-pobutovimi-vidxodami-za-2023-rik.docx (дата звернення: 15.10.2025).
4. Довідка щодо стану сфери управління побутовими відходами за 2024 рік / Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. – Київ, 2025. – URL: https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/dovidka-shhodo-stanu-sferi-upravlinnia-pobutovimi-vidxodami-za-2024-rik.docx (дата звернення: 15.10.2025).
5. Утворення та поводження з відходами I-IV класів небезпеки за категоріями матеріалів / Державна служба статистики України. – URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/upvI_IV/arch_upvI_IV_u.html (дата звернення: 15.10.2025).
6. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX // Відомості Верховної Ради України. – 2023. – № 4. – Ст. 30. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text (дата звернення: 15.10.2025).
7. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives // Official Journal of the European Union. – L 312. – 2008. – URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098 (дата звернення: 15.10.2025)
8. Favoino, E. (2020, June). Building a bridge strategy for residual waste: Material recovery and biological treatment to manage residual waste within a circular economy [Policy briefing]. Zero Waste Europe. URL: https://zerowasteeurope.eu/library/building-a-bridge-strategy-for-residual-waste/ (дата звернення: 15.10.2025).
9. Rodrigues, M., Antunes, J. A., & Miguéis, V. (2025). Aligning priorities: A comparative analysis of scientific and policy perspectives on municipal solid waste management. Waste Management, 193, 70-83.
10. European Investment Bank. (2024). Managing refuse-derived and solid recovered fuels : best practice options for EU countries. European Investment Bank. https://data.europa.eu/doi/10.2867/056652
11. Clemens, J., & Cuhls, C. (2003). Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. Environmental technology, 24(6), 745-754.
12. Pan, J., & Voulvoulis, N. (2007). The role of mechanical and biological treatment in reducing methane emissions from landfill disposal of municipal solid waste in the United Kingdom. Journal of the Air & Waste Management Association, 57(2), 155-163.
13. Bourtsalas, A. T., & Themelis, N. J. (2022). Materials and energy recovery at six European MBT plants. Waste Management, 141, 79-91.
14. Lombardi, F., Zingaretti, D., Verginelli, I., & Costa, G. (2022). Optimisation of the biostabilization process of an Italian mechanical–biological treatment plant to account for changes in waste composition. Waste and Biomass Valorization, 13(9), 3787-3800.
15. Gadaleta, G., De Gisi, S., Todaro, F., & Notarnicola, M. (2022). Environmental comparison of different mechanical–biological treatment plants by combining life cycle assessment and material flow analysis. Clean Technologies, 4(2), 380-394.
16. D'Adamo, I., Daraio, C., Di Leo, S., Gastaldi, M., & Rossi, E. N. (2024). Driving EU sustainability: Promoting the circular economy through municipal waste efficiency. Sustainable Production and Consumption, 50, 462-474.
17. Гапонич, Л. С., Топал, О. І., Голенко, І. Л., & Кобзар, С. Г. (2022). Оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей твердих побутових відходів України. Редакційна колегія, 45.
18. Сафранов, Т. А., Приходько, В. Ю., & Яновський, Д. Ю. (2023). Ресурсоцінний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області. Український гідрометеорологічний журнал, 32, 144-156.
19. Кобзар, С. Г., Топал, О. І., Гапонич, Л. С., & Голенко, І. Л. (2020). Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів. Èlektronnoe Modelirovanie, 42(6).
20. Буляндра, О. Ф., Гапонич, Л. С., Голенко, І. Л., & Топал, О. І. (2020). Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів.
21. Makovetska, Y., Omelianenko, T., & Omelchenko, A. (2021). Prospects for environmentally safe mechanical biological treatment of municipal solid waste in Ukraine. In E3S Web of Conferences (Vol. 255, p. 01002). EDP Sciences.
22. Приходько, В. Ю., Сафранов, Т. А., & Шаніна, Т. П. (2021). Особливості міграції біогенних елементів при

комплексній утилізації біоорганічної складової твердих побутових відходів. Український гідрометеорологічний журнал, 28(28), 92-99.

23. Маркіна, Л. М., Власенко, О. В., Тодчук, Д. В., Ковтунов, О. В., & Онопчук, І. М. (2024). Управління процесами впливу на клімат технологій перетворення відходів на енергію на прикладі термічної деструкції. Заступник головного редактора: Нагорнева НА, 105.

24. Kolodiichuk, I. (2021). Техніко-економічне обґрунтування рециклінгу відходів в україні. Economic journal of Lesya Ukrainka Volyn National University, 1(25), 151-160.

25. Замрига, А. В., & Черненко, О. В. (2024). Адміністративно-правове регулювання поводження з побутовими відходами в особливих умовах. Київський часопис права, (3), 125-130.

26. Trehub, O. A. (2022). Освоєння біоенергетичного потенціалу побутових відходів в умовах післявоєнного відновлення: економіко-правовий вимір. Economics and Law, (3 (66)), 47-59.

27. Berezyuk, S., Tokarchuk, D., & Pryshliak, N. (2019). Economic and environmental benefits of using waste potential as a valuable secondary and energy resource. Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. Vol. X. Issue 1 (33). P. 149-160.

28. Graça, J., Murphy, B., & Kelleher, B. (2023). Valorisation alternatives to landfill for organic residues. Environmental Protection Agency, Government of Ireland. Report No. 432.

29. EN ISO 21640:2021. Solid recovered fuels – Specifications and classes. – Geneva: International Organization for Standardization, 2021. – 36 p.

30. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Про затвердження Правил технічної експлуатації полігонів, припинення експлуатації, рекультивації та догляду за полігонами після припинення їх експлуатації: Наказ № 263 від 10 лютого 2025 р. – Київ: Міндовкілля України, 2025. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text (дата звернення: 15.10.20255).

31. European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS) [Електронний ресурс]. – Brussels: European Commission, 2024. – URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (дата звернення: 15.10.2025).

32. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data. — Geneva: IPCC, 2019. — URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_2_Ch02_Waste_Data.pdf (дата звернення: 15.10.2025).

33. Tauš, P., Šimková, Z., Cehlár, M., Krajňáková, I., & Drozda, J. (2023). Fulfilment of EU goals in the field of waste management through energy recovery from waste. Energies, 16(4), 1913.

34. Jakubus, M., & Stejskal, B. (2020). Municipal solid waste management systems in Poland and the Czech Republic. A comparative study. Environment protection engineering, 46(3).

35. Samadi Khadem, R., Ojaghi Aghchekani, A., & Fataei, E. (2022). Determination of optimal urban waste management strategy using SWOT analysis: a case study. Journal of Advances in Environmental Health Research, 10(4), 305-318.

36. A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe : Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2020) 98 final. — Brussels, 11 Mar. 2020. — URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN (дата звернення: 15.10.2025).

37. Do No Significant Harm : technical guidance by the Commission / European Commission. — Luxembourg, 18 Feb. 2021. — URL: https://commission.europa.eu/document/download/993e026c-4118-46ed-b7ff-5224c19aa254_en?filename=2021_02_18_epc_do_not_significant_harm_-technical_guidance_by_the_commission.pdf (дата звернення: 15.10.2025)

38. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23 травня 2017 р. № 2059-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19 (дата звернення: 15.10.2025).

39. Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення : Закон України від 16 лип. 2024 р. № 3855-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/3855-20 (дата звернення: 15.10.2025).

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, December 27). On approval of the National Waste Management Plan until 2033 and recognition of certain acts as invalid (Order No. 1353-r). Legislation of Ukraine database. Verkhovna Rada of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/go/1353-2024-%D1%80

2. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2023). Analysis of the state of the municipal waste management sector in Ukraine for 2022: Report. https://mindev.gov.ua/news/34323-analiz-stanu-sferi-povodzennia-z-pobutovimi-vidxodami-v-ukrayini-za-2022-rik

3. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2024). Report on the state of the municipal waste management sector for 2023. Kyiv. https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/dovidka-shhodo-stanu-sferi-upravlinnia-pobutovimi-vidxodami-za-2023-rik.docx

4. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2025). Report on the state of the municipal waste management sector for 2024. Kyiv. https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/dovidka-shhodo-stanu-sferi-upravlinnia-pobutovimi-vidxodami-za-2024-rik.docx

5. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). Generation and management of waste of hazard classes I–IV by material categories. https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/upvI_IV/arch_upvI_IV_u.html

6. Verkhovna Rada of Ukraine. (2022, June 20). On waste management: Law of Ukraine No. 2320-IX. Vidomosti

Verkhovnoi Rady Ukrainy, 2023(4), Article 30. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text

7. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. (2008, November 19). On waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, L 312. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098

8. Favoino, E. (2020, June). Building a bridge strategy for residual waste: Material recovery and biological treatment to manage residual waste within a circular economy [Policy briefing]. Zero Waste Europe. https://zerowasteeurope.eu/library/building-a-bridge-strategy-for-residual-waste/

9. Rodrigues, M., Antunes, J. A., & Miguéis, V. (2025). Aligning priorities: A comparative analysis of scientific and policy perspectives on municipal solid waste management. Waste Management, 193, 70-83.

10. European Investment Bank. (2024). Managing refuse-derived and solid recovered fuels : best practice options for EU countries. European Investment Bank. https://data.europa.eu/doi/10.2867/056652

11. Clemens, J., & Cuhls, C. (2003). Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. Environmental technology, 24(6), 745-754.

12. Pan, J., & Voulvoulis, N. (2007). The role of mechanical and biological treatment in reducing methane emissions from landfill disposal of municipal solid waste in the United Kingdom. Journal of the Air & Waste Management Association, 57(2), 155-163.

13. Bourtsalas, A. T., & Themelis, N. J. (2022). Materials and energy recovery at six European MBT plants. Waste Management, 141, 79-91.

14. Lombardi, F., Zingaretti, D., Verginelli, I., & Costa, G. (2022). Optimisation of the biostabilization process of an Italian mechanical–biological treatment plant to account for changes in waste composition. Waste and Biomass Valorization, 13(9), 3787-3800.

15. Gadaleta, G., De Gisi, S., Todaro, F., & Notarnicola, M. (2022). Environmental comparison of different mechanical–biological treatment plants by combining life cycle assessment and material flow analysis. Clean Technologies, 4(2), 380-394.

16. D'Adamo, I., Daraio, C., Di Leo, S., Gastaldi, M., & Rossi, E. N. (2024). Driving EU sustainability: Promoting the circular economy through municipal waste efficiency. Sustainable Production and Consumption, 50, 462-474.

17. Gaponych, L. S., Topal, O. I., Holenko, I. L., & Kobzar, S. H. (2022). Assessment of RDF production potential based on the technological and morphological properties of municipal solid waste in Ukraine. Editorial Board, 45.

18. Safranov, T. A., Prykhodko, V. Yu., & Yanovskyi, D. Yu. (2023). Resource-value potential of the municipal solid waste stream of Odesa region. Ukrainian Hydrometeorological Journal, 32, 144–156.

19. Kobzar, S. H., Topal, O. I., Gaponych, L. S., & Holenko, I. L. (2020). Modeling the process of co-combustion of natural gas with fuels derived from municipal solid waste. Elektronnoe Modelirovanie, 42(6).

20. Bul'andra, O. F., Gaponych, L. S., Holenko, I. L., & Topal, O. I. (2020). Prospects for the use of fuel from municipal solid waste at sugar plant thermal power stations.

21. Makovetska, Y., Omelianenko, T., & Omelchenko, A. (2021). Prospects for environmentally safe mechanical biological treatment of municipal solid waste in Ukraine. In E3S Web of Conferences (Vol. 255, p. 01002). EDP Sciences.

22. Prykhodko, V. Yu., Safranov, T. A., & Shanina, T. P. (2021). Features of biogenic element migration during complex utilization of the bio-organic component of municipal solid waste. Ukrainian Hydrometeorological Journal, 28(28), 92–99.

23. Markina, L. M., Vlasenko, O. V., Todchuk, D. V., Kovtunov, O. V., & Onopchuk, I. M. (2024). Management of climate impact processes of waste-to-energy technologies on the example of thermal destruction. Deputy Editor-in-Chief: Nahorneva N. A., 105.

24. Kolodiichuk, I. (2021). Technical and economic justification of waste recycling in Ukraine. Economic Journal of Lesya Ukrainka Volyn National University, 1(25), 151–160.

25. Zamryha, A. V., & Chernenko, O. V. (2024). Administrative and legal regulation of municipal waste management under special conditions. Kyiv Journal of Law, (3), 125–130.

26. Trehub, O. A. (2022). Development of the bioenergy potential of municipal waste under post-war recovery conditions: Economic and legal dimension. Economics and Law, 3(66), 47–59.

27. Berezyuk, S., Tokarchuk, D., & Pryshliak, N. (2019). Economic and environmental benefits of using waste potential as a valuable secondary and energy resource. Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. Vol. X. Issue 1 (33). P. 149-160.

28. Graça, J., Murphy, B., & Kelleher, B. (2023). Valorisation alternatives to landfill for organic residues. Environmental Protection Agency, Government of Ireland. Report No. 432.

29. EN ISO 21640:2021. Solid recovered fuels – Specifications and classes. – Geneva: International Organization for Standardization, 2021. – 36 p.

30. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2025, February 10). On approval of the rules for the technical operation of landfills, cessation of operation, reclamation, and maintenance of landfills after cessation of operation: Order No. 263. Kyiv: Ministry of Environmental Protection of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text

31. European Commission. (2024). EU Emissions Trading System (EU ETS) [Electronic resource]. Brussels: European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

32. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste. Chapter 2: Waste generation, composition and management data. Geneva: IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_2_Ch02_Waste_Data.pdf

33. Tauš, P., Šimková, Z., Cehlár, M., Krajňáková, I., & Drozda, J. (2023). Fulfilment of EU goals in the field of waste management through energy recovery from waste. Energies, 16(4), 1913.

34. Jakubus, M., & Stejskal, B. (2020). Municipal solid waste management systems in Poland and the Czech Republic. A comparative study. Environment protection engineering, 46(3).

35. Samadi Khadem, R., Ojaghi Aghchekani, A., & Fataei, E. (2022). Determination of optimal urban waste

management strategy using SWOT analysis: a case study. Journal of Advances in Environmental Health Research, 10(4), 305-318.

36. European Commission. (2020, March 11). A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2020) 98 final. Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN

37. European Commission. (2021, February 18). Do no significant harm: Technical guidance by the Commission. Luxembourg. https://commission.europa.eu/document/download/993e026c-4118-46ed-b7ff-5224c19aa254_en?filename=2021_02_18_epc_do_not_significant_harm_-technical_guidance_by_the_commission.pdf

38. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017, May 23). On environmental impact assessment: Law of Ukraine No. 2059-VIII. Legislation of Ukraine database. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19

39. Verkhovna Rada of Ukraine. (2024, July 16). On integrated prevention and control of industrial pollution: Law of Ukraine No. 3855-IX. Legislation of Ukraine database. https://zakon.rada.gov.ua/go/3855-20

Рецензентка: д-р техн. наук, проф. кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Кривомаз Тетяна Іванівна, Київського національного університету будівництва та архітектури

Авторка: ПЕРЕБИНОС Альона Ростиславівна

канд. техн. наук, асистентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці
Київського національного університету будівництва та архітектури
E-mail: perebynos.ar@knuba.edu.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0565-9413

COMPARATIVE ASSESSMENT OF MECHANICAL-BIOLOGICAL TREATMENT APPROACHES FOR MIXED MUNICIPAL SOLID WASTE IN UKRAINE

A. Perebynos
Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

The transition of Ukraine's municipal solid waste (MSW) management system towards alignment with European Union legislation and the principles of the circular economy necessitates a critical evaluation of available treatment technologies. This article addresses the pivotal issue of selecting the optimal Mechanical-Biological Treatment (MBT) approach for mixed MSW in the context of national waste reform and the strategy for "green" post-war reconstruction. Specifically, the study focuses on a comparative assessment of two dominant MBT paradigms: the resource-oriented scheme (focused on high-level material recovery and biostabilisation) and the energy-oriented scheme (focused on RDF/SRF production).

The primary objective of the research was to conduct a robust, multi-criteria comparison to guide the harmonisation of national policy with the waste management hierarchy enshrined in Directive 2008/98/EC.

The methodology employed involved a comprehensive SWOT analysis of both approaches, which was subsequently quantified using a weighted, integrated assessment model encompassing four critical sustainability dimensions: technical, economic, environmental, and social criteria. This rigorous quantification allowed for the objective determination of the relative advantages, limitations, opportunities, and risks associated with each technology under current Ukrainian conditions.

The analysis revealed that the resource-oriented scheme provides for the maximum extraction of secondary raw materials, including high-quality recyclables and biostabilisation of the residual organic component. This approach ensures high resource efficiency, minimises the quantity of waste requiring final disposal, enhances environmental safety by reducing methane emissions, and demonstrates strong compliance with the core principles of the circular economy. The energy-oriented approach, conversely, primarily focuses on the production of a high-calorific solid renewable fuel (RDF/SRF) for co-incineration by industrial consumers. While this scheme offers the potential for faster return on capital investment due to predictable fuel sales, it is concurrently associated with high initial capital expenditure, increased operational risks related to atmospheric emissions, and critical dependence on a stable and competitive market for the final fuel product.

The results of the integrated quantitative assessment indicate a significant advantage of the resource-oriented model, achieving a total weighted score of 3.8 points, compared to 2.2 points attained by the energy-oriented model. This numerical finding confirms that the resource-oriented approach, which prioritises material recovery and biostabilisation, is fundamentally more compatible with EU targets and Ukraine's long-term environmental protection and "green" reconstruction strategy.

Keywords: *waste management, material recovery, biostabilisation, RDF/SRF, circular economy, sustainable development, green recovery.*