

ТЕРМІЧНА ДЕСТРУКЦІЯ ВІДХОДІВ У СИСТЕМІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ТА КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ

Власенко Олег, Коваленко Даниїл, Ковтунов Олександр.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та менеджменту,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ

Анотація

У статті розглянуто термічну деструкцію відходів у контексті реалізації принципів циркулярної економіки та кліматичної політики як одного з найбільш дискусійних інструментів сучасної системи управління відходами. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів утворення відходів, обмеженими можливостями їх екологічно безпечного захоронення, а також необхідністю скорочення викидів парникових газів відповідно до національних і міжнародних кліматичних зобов'язань. У цьому контексті термічна деструкція розглядається не як універсальне рішення, а як елемент інтегрованої системи поводження з відходами, застосування якого потребує науково обґрунтованих екологічних та кліматичних критеріїв.

Метою статті є аналіз ролі термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням її екологічних переваг, обмежень і потенційних ризиків. У процесі дослідження використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, нормативно-правового аналізу, системного та ризик-

орієнтованого підходів, а також елементи аналізу життєвого циклу для оцінювання екологічної та кліматичної ефективності термічної деструкції.

У роботі обґрунтовано, що термічна деструкція може сприяти зменшенню обсягів захоронення відходів і стабілізації небезпечних компонентів, проте її відповідність принципам циркулярної економіки та кліматичної нейтральності є обмеженою і залежить від технологічних рішень, ефективності систем очищення та дотримання принципів найкращих доступних технологій (ВАТ) [15]. Показано, що екологічна та кліматична доцільність застосування термічної деструкції визначається співвідношенням між досягнутим екологічним ефектом і залишковими ризиками. Отримані результати можуть бути використані при розробленні політик управління відходами, підготовці матеріалів оцінки впливу на довкілля та формуванні регіональних програм сталого розвитку.

Ключові слова: термічна деструкція відходів; циркулярна економіка; кліматична політика; управління відходами; екологічна безпека; парникові гази; ВАТ.

Abstract

The article examines thermal waste destruction within the framework of circular economy principles and climate policy, considering it as one of the most controversial instruments in modern waste management systems. The relevance of the study is driven by the continuous growth of waste generation, limited capacities for environmentally safe landfilling, and the need to reduce greenhouse gas emissions in line with national and international climate commitments. In this context, thermal destruction is not treated as a universal solution but as a component of an integrated waste management system whose application requires scientifically substantiated environmental and climate-related criteria.

The purpose of the article is to analyze the role of thermal waste destruction in the system of circular economy and climate policy, taking into account its environmental benefits, limitations, and potential risks. The research methodology is based on the analysis and synthesis of scientific literature, regulatory and legal analysis, systemic and risk-oriented approaches, as well as elements of life cycle assessment to evaluate the environmental and climate efficiency of thermal destruction technologies.

The study substantiates that thermal waste destruction can contribute to reducing landfill disposal volumes and stabilizing hazardous components; however, its compliance with circular economy principles and climate neutrality remains limited and

highly dependent on technological solutions, the efficiency of emission control systems, and adherence to Best Available Techniques (BAT). It is demonstrated that the environmental and climate feasibility of thermal destruction is determined by the balance between the achieved environmental benefits and the residual ecological and climate risks. The results obtained can be applied in the development of waste management policies, preparation of environmental impact assessment documentation, and the design of regional strategies for sustainable development.

Ключові слова: thermal destruction of waste; circular economy; climate policy; waste management; environmental safety; greenhouse gases; BAT.

Вступ

Сучасний етап соціально-економічного розвитку характеризується одночасним зростанням обсягів утворення відходів та посиленням екологічних і кліматичних обмежень, що формує нові виклики для системи управління відходами. Лінійна модель економіки, заснована на принципах «виробництво – споживання – захоронення», виявила свою екологічну та ресурсну неспроможність, що зумовило перехід до концепції циркулярної економіки як домінуючої парадигми сталого розвитку [7, 13]. У межах цієї концепції управління відходами розглядається не лише як проблема знешкодження, а як інструмент збереження ресурсів, зниження техногенного навантаження та

мінімізації негативного впливу на довкілля.

Паралельно з трансформацією економічних моделей зростає роль кліматичної політики, спрямованої на скорочення викидів парникових газів і досягнення кліматичної нейтральності. Сектор поводження з відходами є важливою складовою національних і міжнародних кліматичних стратегій, оскільки процеси захоронення, оброблення та перероблення відходів безпосередньо пов'язані з утворенням метану, діоксиду вуглецю та інших кліматично активних газів. У цьому контексті вибір технологій поводження з відходами набуває не лише екологічного, але й кліматичного значення [4, 9].

Термічна деструкція відходів займає особливе місце в сучасних системах управління відходами. З одного боку, вона дозволяє суттєво зменшити обсяги захоронення, стабілізувати небезпечні компоненти та обмежити довгострокові екологічні ризики. З іншого боку, застосування термічних технологій супроводжується утворенням атмосферних викидів, твердих залишків і споживанням енергетичних ресурсів, що викликає дискусії щодо її відповідності принципам циркулярної економіки та цілям кліматичної політики. Таким чином, термічна деструкція не може розглядатися як універсальне рішення, а потребує науково обґрунтованої оцінки її екологічної та кліматичної доцільності.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що більшість робіт зосереджена на технологічних і енергетичних аспектах термічної деструкції, тоді як її роль у системі циркулярної економіки та взаємодія з кліматичною політикою часто розглядаються фрагментарно. Водночас відсутність комплексного підходу до оцінювання екологічної та кліматичної ефективності термічної деструкції ускладнює формування обґрунтованих управлінських рішень і екологічної політики у сфері поводження з відходами.

Метою цієї статті є науковий аналіз термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням її екологічних переваг, обмежень і потенційних ризиків. Об'єктом дослідження є процеси термічної деструкції відходів у сучасних системах управління відходами, а предметом — екологічні та кліматичні аспекти їх застосування. У роботі використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, нормативно-правового аналізу, системного та ризик-орієнтованого підходів, а також елементи аналізу життєвого циклу для оцінювання екологічної й кліматичної ефективності термічної деструкції [14].

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному розгляді термічної деструкції відходів як складової циркулярної економіки з одночасним урахуванням вимог кліматичної політики та принципів найкращих доступних технологій. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх

використання при формуванні державної та регіональної політики управління відходами, підготовці матеріалів оцінки впливу на довкілля та обґрунтуванні екологічно допустимих технологічних рішень.

Теоретичні та методологічні засади дослідження

Формування наукових підходів до оцінювання ролі термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики потребує поєднання концептуальних, нормативних і прикладних методів дослідження. Такий підхід зумовлений міждисциплінарним характером проблеми, що охоплює екологічну економіку, кліматичну політику, технології поводження з відходами та екологічну безпеку.

У сучасних наукових дослідженнях циркулярна економіка розглядається як системна модель, спрямована на зменшення первинного ресурсоспоживання, мінімізацію утворення відходів і збереження вартості матеріалів упродовж максимально тривалого життєвого циклу. У межах цієї концепції технології поводження з відходами оцінюються не лише за ефективністю знешкодження, а й за здатністю сприяти замиканню матеріальних і енергетичних потоків. Термічна деструкція в такому контексті розглядається як допоміжний інструмент, призначений для оброблення залишкових потоків відходів, які не можуть бути залучені до матеріальної переробки без

створення додаткових екологічних ризиків.

Кліматична політика, у свою чергу, формує додаткові критерії оцінки технологій поводження з відходами, зосереджуючись на скороченні викидів парникових газів і досягненні кліматичної нейтральності. Екологічні інструменти реалізації кліматичної політики, зокрема регулювання промислових викидів, запровадження принципів найкращих доступних технологій та оцінка впливу на довкілля, безпосередньо впливають на допустимість і масштаби застосування термічної деструкції. У цьому контексті технології термічної обробки відходів мають оцінюватися з урахуванням як екологічних, так і кліматичних наслідків, включно з прямими та непрямими викидами парникових газів.

У сучасних наукових концепціях термічна деструкція відходів трактується неоднозначно. З одного боку, вона визнається ефективним способом зменшення обсягів захоронення та стабілізації небезпечних компонентів. З іншого боку, її обмежена відповідність принципам циркулярної економіки та потенційний кліматичний вплив зумовлюють необхідність чіткого наукового обґрунтування умов її застосування. Це вимагає використання методології, здатної інтегрувати екологічні, кліматичні та нормативні аспекти в єдину систему аналізу.

Методологічну основу дослідження становить поєднання якісних і аналітичних методів, що

дозволяє комплексно оцінити роль термічної деструкції відходів у сучасних системах управління відходами. Основні методи

дослідження, їх призначення та наукова функція узагальнені в таблиці

Таблиця 1 – Методи дослідження та їх наукове призначення

Метод дослідження	Сутність методу	Наукове призначення у дослідженні
Аналіз наукових джерел	Опрацювання фахових публікацій і монографій	Формування теоретичної бази та визначення наукових підходів
Нормативно-правовий аналіз	Аналіз законодавства та регуляторних документів	Оцінка відповідності термічної деструкції екологічним і кліматичним вимогам
Системний підхід	Розгляд технології як елемента цілісної системи	Визначення ролі термічної деструкції в управлінні відходами
Ризик-орієнтований підхід	Ідентифікація та оцінка екологічних ризиків	Обґрунтування екологічної допустимості застосування
Елементи аналізу життєвого циклу (LCA)	Оцінка впливів на різних етапах життєвого циклу	Порівняння кліматичних та екологічних ефектів альтернативних рішень
Порівняльний аналіз	Зіставлення різних методів поводження з відходами	Виявлення переваг і обмежень термічної деструкції

Узагальнення результатів, отриманих із використанням зазначених методів, здійснюється в межах інтегрованої методологічної схеми дослідження. Вона передбачає послідовний перехід від аналізу теоретичних концепцій циркулярної економіки та кліматичної політики до оцінювання екологічної й кліматичної ефективності термічної деструкції та формування науково обґрунтованих висновків щодо умов її застосування.

Методологічна схема дослідження включає такі етапи: аналіз характеристик відходів → оцінку нормативних та

кліматичних обмежень → вибір підходів до термічної деструкції → оцінювання екологічних і кліматичних ризиків → інтеграцію результатів та формування рекомендацій.

Подальший аналіз ролі термічної деструкції у системі циркулярної економіки доцільно здійснювати через оцінку її потенціалу щодо скорочення обсягів захоронення відходів. Захоронення залишається найбільш проблемним способом поводження з відходами з точки зору екологічної безпеки та кліматичної політики, оскільки супроводжується довготривалим негативним

впливом на ґрунти, водні об'єкти та атмосферне повітря, а також утворенням значних обсягів метану. У цьому контексті скорочення потоків відходів, що спрямовуються на полігони, є одним із ключових завдань сучасних систем управління відходами.

Термічна деструкція забезпечує істотне зменшення маси та об'єму відходів, що підлягають остаточному видаленню. За результатами узагальнення наукових досліджень, редукція об'єму відходів у процесі термічної обробки може досягати 70–90 %, що дозволяє значно знизити навантаження на полігонну інфраструктуру та подовжити строк її експлуатації. Особливо важливим є застосування термічної деструкції для відходів з високим рівнем небезпеки або складним морфологічним складом, для яких матеріальна переробка є технічно неможливою або економічно необґрунтованою.

Зменшення обсягів захоронення шляхом термічної деструкції має також непрямий кліматичний ефект, пов'язаний із запобіганням утворенню метану на полігонах. Біорозкладні компоненти відходів, що за умов захоронення стають джерелом парникових газів, у процесі термічної обробки зазнають необоротної трансформації, що дозволяє усунути один із ключових кліматичних ризиків сектору відходів. Водночас такий ефект не є автоматичним і залежить від структури відходів, технологічних параметрів процесу та ефективності екологічного контролю.

Разом з тим потенціал термічної деструкції щодо зменшення захоронення не слід розглядати ізольовано від загальної логіки циркулярної економіки. Надмірне орієнтування на термічні технології може створювати конкуренцію матеріальній і біологічній переробці та знижувати стимули до впровадження заходів із запобігання утворенню відходів. Тому екологічно обґрунтоване застосування термічної деструкції передбачає її використання виключно для залишкових потоків відходів після реалізації пріоритетних заходів циркулярної економіки.

Подальший аналіз ролі термічної деструкції у системі циркулярної економіки доцільно здійснювати через оцінку її потенціалу щодо скорочення обсягів захоронення відходів. Захоронення залишається найбільш проблемним способом поводження з відходами з точки зору екологічної безпеки та кліматичної політики, оскільки супроводжується довготривалим негативним впливом на ґрунти, водні об'єкти та атмосферне повітря, а також утворенням значних обсягів метану. У цьому контексті скорочення потоків відходів, що спрямовуються на полігони, є одним із ключових завдань сучасних систем управління відходами.

Термічна деструкція забезпечує істотне зменшення маси та об'єму відходів, що підлягають остаточному видаленню. За результатами узагальнення наукових досліджень, редукція об'єму відходів у процесі термічної

обробки може досягати 70–90 %, що дозволяє значно знизити навантаження на полігонну інфраструктуру та подовжити строк її експлуатації. Особливо важливим є застосування термічної деструкції для відходів з високим рівнем небезпеки або складним морфологічним складом, для яких матеріальна переробка є технічно неможливою або економічно необґрунтованою.

Зменшення обсягів захоронення шляхом термічної деструкції має також непрямий кліматичний ефект, пов'язаний із запобіганням утворенню метану на полігонах. Біорозкладні компоненти відходів, що за умов захоронення стають джерелом парникових газів, у процесі термічної обробки зазнають необоротної трансформації, що дозволяє усунути один із ключових кліматичних ризиків сектору відходів. Водночас такий ефект не є автоматичним і залежить від структури відходів, технологічних параметрів процесу та ефективності екологічного контролю.

Разом з тим потенціал термічної деструкції щодо зменшення захоронення не слід розглядати ізольовано від загальної логіки циркулярної економіки. Надмірне орієнтування на термічні технології може створювати конкуренцію матеріальній і біологічній переробці та знижувати стимули до впровадження заходів із запобігання утворенню відходів. Тому екологічно обґрунтоване застосування термічної деструкції передбачає її використання виключно для залишкових потоків

відходів після реалізації пріоритетних заходів циркулярної економіки.

Межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки визначаються передусім характером трансформації матеріальних потоків у процесі високотемпературної обробки. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які спрямовані на збереження або відновлення функціональної цінності матеріалів, термічна деструкція передбачає необоротне руйнування органічної складової відходів. Це обумовлює її обмежену здатність до замикання матеріальних циклів у класичному розумінні циркулярної економіки.

З позицій ключових принципів циркулярності термічна деструкція не сприяє запобігання утворенню відходів і лише опосередковано пов'язана з повторним використанням ресурсів. Її екологічна доцільність полягає не у відновленні матеріальної вартості, а у мінімізації негативних наслідків поводження з відходами, які не можуть бути залучені до пріоритетних циклів переробки. Таким чином, термічна деструкція функціонує як інструмент управління залишковими потоками, а не як повноцінний елемент циркулярного виробничо-споживчого циклу.

Водночас повна невідповідність термічної деструкції принципам циркулярної економіки також є спрощеним трактуванням. Часткове повернення ресурсної цінності можливе за рахунок використання мінеральної

фракції твердих залишків, а також через енергетичний ефект у разі заміщення первинних енергоносіїв. Однак ці аспекти мають допоміжний характер і не можуть компенсувати втрату матеріальної цінності органічної складової відходів.

Оцінка відповідності термічної деструкції принципам

Таблиця 2 – Відповідність термічної деструкції ключовим принципам циркулярної економіки

Принцип циркулярної економіки	Зміст принципу	Роль термічної деструкції	Оцінка відповідності
Запобігання утворенню відходів	Мінімізація утворення відходів на джерелі	Не впливає на стадію утворення	Відсутня
Повторне використання	Збереження функціональної цінності продукції	Не забезпечується	Відсутня
Матеріальна переробка	Повернення матеріалів у виробничі цикли	Обмежена (міеральні залишки)	Низька
Біологічна переробка	Відновлення біогенних компонентів	Неможлива	Відсутня
Скорочення захоронення	Мінімізація потоків на полігони	Забезпечується	Висока
Зниження екологічних ризиків	Обмеження довгострокового впливу	Забезпечується	Висока
Ресурсна ефективність	Збереження матеріальної вартості	Частково (енергетичний ефект)	Обмежена

Отже, межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки полягають у неможливості повноцінного замикання матеріальних циклів та відновлення ресурсної цінності відходів. Її застосування є виправданим лише у випадках, коли вичерпано потенціал запобігання

циркулярної економіки потребує диференційованого підходу, що враховує стадію ієрархії поводження з відходами, тип відходів та наявність альтернативних методів переробки. Узагальнення такої оцінки наведено в таблиці.

утворенню відходів, повторного використання та матеріальної або біологічної переробки. У такому форматі термічна деструкція виступає як інструмент екологічної стабілізації системи управління відходами, а не як базовий механізм циркулярної економіки.

Межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки визначаються передусім характером трансформації матеріальних потоків у процесі високотемпературної обробки. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які спрямовані на збереження або відновлення функціональної цінності матеріалів, термічна деструкція передбачає необоротне руйнування органічної складової відходів. Це обумовлює її обмежену здатність до замикання матеріальних циклів у класичному розумінні циркулярної економіки.

З позицій ключових принципів циркулярності термічна деструкція не сприяє запобіганню утворенню відходів і лише опосередковано пов'язана з повторним використанням ресурсів. Її екологічна доцільність полягає не у відновленні матеріальної вартості, а у мінімізації негативних наслідків поводження з відходами, які не можуть бути залучені до пріоритетних циклів переробки. Таким чином, термічна деструкція функціонує як інструмент

управління залишковими потоками, а не як повноцінний елемент циркулярного виробничо-споживчого циклу.

Водночас повна невідповідність термічної деструкції принципам циркулярної економіки також є спрощеним трактуванням. Часткове повернення ресурсної цінності можливе за рахунок використання мінеральної фракції твердих залишків, а також через енергетичний ефект у разі заміщення первинних енергоносіїв. Однак ці аспекти мають допоміжний характер і не можуть компенсувати втрату матеріальної цінності органічної складової відходів.

Оцінка відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки потребує диференційованого підходу, що враховує стадію ієрархії поводження з відходами, тип відходів та наявність альтернативних методів переробки. Узагальнення такої оцінки наведено в таблиці.



Рисунок 1 – Взаємодія термічної деструкції з матеріальною та біологічною переробкою в системі циркулярної економіки.

Термічна деструкція відходів у контексті кліматичної політики

Кліматична політика є одним із ключових чинників, що визначають сучасні підходи до управління відходами, оскільки сектор поводження з відходами робить суттєвий внесок у формування викидів парникових газів. Основними джерелами кліматичного впливу у цьому секторі є захоронення біорозкладних відходів, утворення метану на полігонах, а також викиди діоксиду вуглецю під час термічної обробки. У цьому контексті оцінка ролі термічної деструкції потребує зіставлення її кліматичних ефектів з альтернативними методами поводження з відходами.

З позицій кліматичної політики Європейського Союзу та України пріоритет надається таким рішенням, які забезпечують скорочення сукупних викидів

парникових газів упродовж усього життєвого циклу відходів. Захоронення відходів, особливо з високим вмістом органічної фракції, розглядається як кліматично несприятливий варіант через довготривале утворення метану, що має значно вищий потенціал глобального потепління порівняно з діоксидом вуглецю. У цьому аспекті термічна деструкція може виконувати компенсуючу функцію, зменшуючи потоки відходів, які спрямовуються на полігони, та обмежуючи утворення метану.

Водночас термічна деструкція супроводжується прямими викидами діоксиду вуглецю, походження яких залежить від складу відходів. Біогенний вуглець, що утворюється під час спалювання органічних компонентів, у кліматичній політиці зазвичай розглядається окремо від викидів викопного походження, пов'язаних

зі спалюванням пластиків та інших синтетичних матеріалів. Це зумовлює необхідність диференційованого підходу до оцінки кліматичного впливу термічної деструкції з урахуванням морфологічного складу відходів.

Застосування елементів аналізу життєвого циклу дозволяє комплексно оцінити кліматичну ефективність термічної деструкції шляхом урахування як прямих, так і непрямих викидів парникових газів. До непрямих ефектів належать скорочення викидів унаслідок зменшення захоронення, заміщення первинних енергоносіїв та зниження екологічних ризиків, пов'язаних із довготривалим зберіганням відходів. Саме співвідношення між цими ефектами визначає кліматичну доцільність використання термічної деструкції в конкретних умовах.

З точки зору реалізації кліматичної політики термічна деструкція може розглядатися як перехідний інструмент у процесі трансформації системи управління відходами. Її застосування є виправданим у випадках, коли вона сприяє скороченню сукупних викидів парникових газів порівняно з базовим сценарієм захоронення та не створює перешкод для розвитку матеріальної й біологічної переробки. У протилежному разі надмірне використання термічних технологій може вступати в суперечність із довгостроковими цілями кліматичної нейтральності та циркулярної економіки.

Таким чином, у контексті кліматичної політики термічна деструкція відходів повинна

оцінюватися як інструмент із обмеженою, але потенційно важливою роллю. Її ефективність визначається не абсолютним рівнем викидів, а здатністю зменшувати сумарний кліматичний вплив системи поводження з відходами за умови дотримання екологічних стандартів і принципів найкращих доступних технологій.

Екологічні ризики та обмеження термічної деструкції відходів

Застосування технологій термічної деструкції відходів супроводжується формуванням комплексу екологічних ризиків, що зумовлює необхідність їх системного аналізу та врахування при прийнятті управлінських і технологічних рішень. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які орієнтовані на відновлення ресурсної цінності, термічна деструкція передбачає глибоку трансформацію відходів, унаслідок чого основний екологічний ефект досягається за рахунок зменшення обсягів і стабілізації небезпечних компонентів. Водночас саме характер цієї трансформації зумовлює появу специфічних ризиків для окремих компонентів довкілля.

Найбільш значущими є ризики, пов'язані з викидами забруднюючих речовин в атмосферне повітря. У процесі термічної обробки можуть утворюватися оксиди азоту, сірки, тверді частинки, а за певних умов — діоксини та фурани [6, 11]. Рівень таких викидів істотно залежить від морфологічного складу відходів,

температурного режиму, тривалості перебування в реакційній зоні та ефективності систем очищення димових газів. Порушення технологічних параметрів або недостатній екологічний контроль здатні призвести до локального або регіонального погіршення якості атмосферного повітря.

Окрему групу екологічних ризиків становить утворення твердих залишків у вигляді золи та шлаків. Хімічний склад цих залишків визначається складом вихідних відходів і може включати важкі метали та інші токсичні компоненти. За відсутності належної стабілізації та контролю поводження з такими матеріалами виникає ризик вторинного забруднення ґрунтів і водних об'єктів, що обмежує можливості їх подальшого використання в господарській діяльності.

Водні екосистеми можуть зазнавати опосередкованого впливу термічної деструкції внаслідок утворення стічних вод, що формуються під час очищення газів або з технологічних майданчиків. За

неналежного очищення такі стоки можуть містити розчинені забруднювачі, що створює ризики для поверхневих і підземних вод. Крім того, розміщення об'єктів термічної деструкції без урахування територіальних та гідрогеологічних умов може посилювати екологічну вразливість прилеглих територій.

Екологічні обмеження застосування термічної деструкції пов'язані також із соціально-екологічними чинниками, зокрема сприйняттям таких об'єктів місцевими громадами та необхідністю дотримання принципів превентивності й прозорості екологічних рішень. У цьому аспекті екологічні ризики виходять за межі суто технологічних і потребують урахування в процесі стратегічного планування систем управління відходами.

Систематизація основних екологічних ризиків та відповідних обмежень наведена в таблиці, що дозволяє узагальнити характер впливів і визначити напрями їх мінімізації.

Таблиця 3 – Основні екологічні ризики термічної деструкції відходів

Компонент довкілля	Джерело ризику	Потенційний вплив	Характер обмеження
Атмосферне повітря	Викиди продуктів згоряння	Погіршення якості повітря	Необхідність багатоступеневої газоочистки
Ґрунти	Осідання золи та пилу	Акумуляція токсичних речовин	Обмеження використання територій
Поверхневі води	Стічні води з установок	Вторинне забруднення	Вимоги до очищення стоків
Підземні води	Неналежне поводження з залишками	Інфільтрація забруднювачів	Контроль захоронення золи

Компонент довкілля	Джерело ризику	Потенційний вплив	Характер обмеження
Біота	Комплексний вплив	Порушення екосистем	Територіальні обмеження
Населення	Локальні викиди та шум	Соціально-екологічні ризики	Необхідність громадського контролю

Для комплексного розуміння екологічних наслідків доцільно розглядати формування впливів термічної деструкції як послідовний процес, що охоплює всі етапи

поводження з відходами — від їх підготовки до остаточного розміщення залишків. Узагальнена схема формування екологічних впливів наведена нижче.

Схема формування екологічних впливів термічної деструкції відходів



Рисунок 2 – Формування екологічних впливів термічної деструкції відходів.

Таким чином, екологічні ризики та обмеження термічної деструкції відходів мають багатокомпонентний характер і потребують інтегрованого підходу до управління. Екологічна допустимість застосування термічних технологій визначається рівнем контролю викидів, поводженням з твердими залишками та відповідністю принципам найкращих доступних технологій, що дозволяє знизити

негативний вплив до прийняттого рівня.

Узагальнення екологічних вигод, обмежень та умов екологічно допустимого застосування термічної деструкції відходів наведено в інтегральній таблиці.

Узагальнення екологічних вигод, обмежень та умов екологічно допустимого застосування термічної деструкції відходів наведено в інтегральній таблиці

Таблиця 3 – Екологічні вигоди, обмеження та умови застосування термічної деструкції відходів

Екологічний аспект	Екологічні вигоди	Основні обмеження	Умови екологічно допустимого застосування
Скорочення обсягів захоронення	Значне зменшення маси та об'єму відходів, зниження навантаження на полігони	Неможливість повного усунення залишкових фракцій	Застосування виключно до залишкових потоків після переробки
Зниження довгострокових екологічних ризиків	Стабілізація небезпечних компонентів, обмеження інфільтрації забруднювачів	Утворення золи та шлаків з потенційною токсичністю	Контроль складу залишків, стабілізація перед розміщенням
Вплив на атмосферне повітря	Скорочення викидів метану порівняно із захороненням	Викиди NO _x , SO ₂ , пилу, можливе утворення діоксинів	Багатоступенева газоочистка, дотримання ВАТ
Кліматичний ефект	Потенційне зменшення сумарних викидів ПГ у системі управління відходами	Викиди CO ₂ , особливо викопного походження	Оцінка повного життєвого циклу, мінімізація викопної фракції
Ресурсна ефективність	Часткове використання мінеральної фракції залишків	Втрата органічної матеріальної цінності	Вилучення придатних до переробки фракцій до термічної обробки

Екологічний аспект	Екологічні вигоди	Основні обмеження	Умови екологічно допустимого застосування
Взаємодія з циркулярною економікою	Доповнення матеріальної та біологічної переробки	Обмежена відповідність принципам циркулярності	Чітке позиціонування як завершальної стадії
Територіальні та соціальні аспекти	Централізація оброблення складних відходів	Соціальне неприйняття, локальні екологічні ризики	Прозорі процедури ОВД, громадський контроль
Нормативна відповідність	Можливість регульованого впровадження	Високі регуляторні вимоги	Повна відповідність законодавству та БАТ

Висновки

Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити роль термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням екологічних вигод, обмежень і умов екологічно допустимого застосування. Отримані результати свідчать, що термічна деструкція не може розглядатися як універсальний або пріоритетний інструмент циркулярної економіки, однак за певних умов вона є важливим елементом сучасних систем управління відходами.

Встановлено, що основним екологічним ефектом термічної деструкції є суттєве скорочення обсягів захоронення та стабілізація небезпечних компонентів відходів, що дозволяє зменшити довгострокові екологічні ризики для ґрунтів, водних об'єктів та атмосферного повітря. Водночас необоротний характер матеріальних трансформацій

обмежує її відповідність принципам циркулярної економіки, зокрема щодо збереження ресурсної цінності органічної складової відходів.

Показано, що кліматична доцільність застосування термічної деструкції є умовною і залежить від порівняння з альтернативними сценаріями поводження з відходами, насамперед із захороненням. Потенційні кліматичні вигоди можуть бути досягнуті за рахунок запобігання утворенню метану, однак вони нівелюються за відсутності ефективних систем очищення викидів і належного врахування частки викопного вуглецю у складі відходів.

Обґрунтовано, що екологічна допустимість термічної деструкції визначається рівнем контролю атмосферних викидів, поводженням з твердими залишками та відповідністю принципам найкращих доступних технологій. Недотримання цих

умов може трансформувати локальну проблему управління відходами у джерело комплексного екологічного навантаження.

Доведено доцільність розгляду термічної деструкції виключно як завершальної стадії оброблення залишкових потоків відходів після реалізації потенціалу матеріальної та біологічної переробки. Такий підхід забезпечує узгодженість із ієрархією поводження з відходами та мінімізує ризик технологічної конкуренції з пріоритетними методами циркулярної економіки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при формуванні державної та регіональної політики управління відходами, обґрунтуванні рішень у процедурах оцінки впливу на довкілля та розробленні програм сталого розвитку з урахуванням кліматичних цілей.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку кліматичних та екологічних ефектів термічної деструкції з використанням повноцінного аналізу життєвого циклу для різних морфологічних складів відходів та регіональних умов, що дозволить підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері поводження з відходами.

Література

1. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX // *Відомості Верховної Ради України*. – 2022.

2. Національний план управління відходами до 2030 року

: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // *Офіційний вісник України*. – 2019.

3. Національна економічна стратегія на період до 2030 року : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 179 // *Урядовий кур'єр*. – 2021.

4. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 № 1363-р // *Офіційний вісник України*. – 2021.

5. Бондар О. І., Шевченко Р. І. Управління відходами в Україні в контексті переходу до циркулярної економіки // *Екологічні науки*. – 2019. – № 2. – С. 5–12.

6. Кравченко О. В., Ляшенко О. А. Екологічні аспекти термічних методів поводження з відходами // *Вісник екологічної безпеки та збалансованого природокористування*. – 2020. – № 1. – С. 41–48.

7. Мельник Л. Г., Дегтярєва І. Б. Циркулярна економіка як інструмент сталого розвитку: екологічні обмеження та перспективи // *Економіка природокористування і охорони довкілля*. – 2018. – № 4. – С. 3–11.

8. Сахно С. М., Коваленко В. О. Оцінка впливу технологій знешкодження відходів на довкілля // *Екологічні науки*. – 2021. – № 4. – С. 77–85.

9. Хвесик М. А., Бистряков І. К. Кліматична політика та екологічна трансформація економіки України // *Економіка України*. – 2020. – № 10. – С. 23–34.

10. Про затвердження Методичних рекомендацій з оцінки впливу на довкілля : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 08.09.2021 № 590. – Київ, 2021.

11. Жукова В. М., Поліщук А. О. Аналіз екологічних ризиків при застосуванні термічних технологій у сфері поводження з відходами // *Наукові праці Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Екологія.* – 2022. – № 322. – С. 112–120.

12. Директива 2008/98/ЄС про відходи (у редакції зі змінами) : переклад укр. мовою // *Офіційний сайт Європейського Союзу.* – Актуаліз. версія, 2018.

13. 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.

14. Astrup T. F., Tonini D., Turconi R., Boldrin A. Life cycle assessment of thermal waste treatment technologies: A systematic review // *Waste Management.* – 2018. – Vol. 76. – P. 203–215.

15. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019. Union, 2019.