

ГАЗИФІКАЦІЯ ВІДХОДІВ ЯК ТЕРМОХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Маркіна Людмила, Коваленко Даниїл

Державна наукова установа «Інститут
екологічного відновлення та розвитку України»

Анотація

У статті досліджено газифікацію відходів як сучасну термохімічну технологію, що спрямована на підвищення рівня екологічної безпеки та зменшення негативного впливу відходів на навколишнє природне середовище. В умовах зростання обсягів утворення твердих побутових і промислових відходів, обмеженості полігонних потужностей та посилення екологічних вимог газифікація розглядається як ефективна альтернатива традиційним методам захоронення та прямого спалювання. У роботі проаналізовано сутність процесу газифікації, основні фізико-хімічні перетворення органічної складової відходів у високотемпературному середовищі з обмеженим доступом окисника, а також особливості формування синтез-газу як цільового продукту. Показано, що газифікація забезпечує значне зменшення маси й об'єму відходів, зниження їх токсичності та мінімізацію довгострокових екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних об'єктів. Особливу увагу приділено екологічним аспектам експлуатації газифікаційних установок, зокрема рівню викидів забруднюючих речовин і можливостям їх скорочення за рахунок застосування сучасних систем очищення газової фази. Проведено порівняльний аналіз газифікації з іншими термічними технологіями оброблення відходів, такими як піроліз і спалювання, що дозволило обґрунтувати переваги

газифікації з позицій екологічної ефективності та ресурсної доцільності. Зроблено висновок, що впровадження газифікаційних технологій у системи управління відходами сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, підвищенню рівня екологічної та енергетичної безпеки територій і створює передумови для сталого розвитку.

Ключові слова: газифікація відходів, термохімічні технології, синтез-газ, екологічна безпека, управління відходами, енергетична утилізація, сталий розвиток.

Abstract

The article investigates waste gasification as a modern thermochemical technology aimed at improving environmental safety and reducing the negative impact of waste on the environment. Under conditions of increasing volumes of municipal and industrial waste generation, limited landfill capacity, and stricter environmental regulations, gasification is considered an effective alternative to conventional disposal and incineration methods. The study analyzes the essence of the gasification process, the main physicochemical transformations of the organic fraction of waste in a high-temperature environment with limited oxidant supply, and the formation of synthesis gas as the target product. It is shown that gasification provides a significant reduction in waste mass and volume, decreases toxicity, and minimizes long-term environmental risks associated with air, soil, and water pollution. Particular attention is

paid to the environmental aspects of gasification plant operation, including pollutant emissions and the possibilities for their reduction through advanced gas cleaning systems. A comparative analysis of gasification with other thermal waste treatment technologies, such as pyrolysis and incineration, is carried out, substantiating the advantages of gasification in terms of environmental efficiency and resource recovery. The study concludes that the integration of gasification technologies into waste management systems contributes to the implementation of circular economy principles, enhances environmental and energy security, and supports sustainable development.

Keywords: waste gasification, thermochemical technologies, syngas, environmental safety, waste management, energy recovery, sustainable development.

Вступ

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімким зростанням обсягів утворення відходів, що зумовлено урбанізацією, індустріалізацією та підвищенням рівня споживання матеріальних ресурсів. Накопичення твердих побутових і промислових відходів за умов обмежених можливостей їх захоронення формує одну з ключових загроз екологічній безпеці територій, проявами якої є деградація ґрунтів, забруднення поверхневих і підземних вод, погіршення якості атмосферного повітря та зростання техногенних ризиків для здоров'я населення. Традиційні підходи до поводження з відходами, що базуються переважно на полігонному захороненні або прямому спалюванні, дедалі частіше виявляються екологічно та соціально неприйнятними, що актуалізує пошук альтернативних технологічних рішень.

У контексті переходу до принципів сталого розвитку та циркулярної економіки особливої уваги набувають термохімічні технології перероблення відходів, здатні поєднувати зменшення їх негативного впливу на довкілля з отриманням вторинних енергетичних

ресурсів. Газифікація відходів розглядається як одна з найбільш перспективних технологій цього напрямку, оскільки забезпечує глибоке термічне перетворення органічної складової у контрольованому середовищі з обмеженим доступом окисника. Такий підхід дозволяє істотно знизити масу та об'єм відходів, мінімізувати утворення токсичних сполук і сформувати синтез-газ, який може бути використаний для виробництва теплової та електричної енергії або як сировина для хімічних процесів.

На відміну від процесів прямого спалювання, газифікація характеризується вищим рівнем керованості фізико-хімічних перетворень, що створює передумови для зменшення викидів забруднюючих речовин та підвищення екологічної ефективності технології. Водночас екологічна доцільність застосування газифікації значною мірою залежить від морфологічного складу відходів, режимів термічної обробки та ефективності систем очищення газової фази, що зумовлює необхідність комплексного аналізу даної технології з позицій екологічної безпеки.

У зв'язку з цим актуальним є наукове обґрунтування ролі газифікації відходів у сучасних системах управління відходами, з урахуванням її екологічних переваг, потенційних обмежень і можливостей інтеграції в регіональні та національні стратегії сталого розвитку. Дослідження газифікаційних технологій у контексті підвищення рівня екологічної безпеки дозволяє сформувати науково обґрунтовані підходи до їх впровадження та сприяє переходу від утилізаційної моделі поводження з відходами до ресурсоефективної та екологічно орієнтованої системи.

Метою дослідження є наукове обґрунтування газифікації відходів як термохімічної технології підвищення рівня екологічної безпеки шляхом аналізу процесів термічного перетворення органічної складової відходів, оцінювання екологічних переваг і обмежень

технології, а також визначення її ролі в сучасних системах управління відходами. Досягнення поставленої мети передбачає формування комплексного уявлення про екологічну ефективність газифікаційних установок та можливості їх інтеграції в регіональні й національні стратегії сталого розвитку.

Наукова гіпотеза дослідження полягає в припущенні, що застосування газифікації відходів за умови оптимізованих температурних режимів і використання сучасних систем очищення газової фази забезпечує істотне зниження екологічних ризиків порівняно з традиційними методами захоронення та прямого спалювання. Передбачається, що така технологія дозволяє не лише мінімізувати викиди забруднюючих речовин і зменшити токсичність твердих залишків, а й підвищити рівень ресурсної та енергетичної ефективності систем поводження з відходами, що в цілому сприяє зміцненню екологічної безпеки території.

Матеріали та методи

Розкриття сутності процесу газифікації ґрунтується на його трактуванні як складного багатостадійного термохімічного процесу високотемпературного часткового окиснення органічної складової відходів у контрольованому середовищі з обмеженим доступом окисника. Такий підхід принципово відрізняє газифікацію від прямого спалювання, при якому відбувається повне окиснення органічної речовини з утворенням переважно діоксиду вуглецю, водяної пари та значної кількості теплової енергії. У випадку газифікації кількість окисника навмисно обмежується, що забезпечує переважання відновних і рівноважних реакцій та сприяє формуванню газоподібних продуктів із високою енергетичною цінністю.

Керування складом газифікуючого середовища, температурними режимами та часом перебування матеріалу в реакторі дозволяє регулювати співвідношення

основних компонентів синтез-газу, зокрема монооксиду вуглецю, водню, метану та вуглекислого газу. Це створює можливості для цілеспрямованої оптимізації процесу залежно від подальшого способу використання газової фази, а також для мінімізації утворення небезпечних побічних сполук. На відміну від прямого спалювання, за якого формування токсичних компонентів відбувається безпосередньо в зоні горіння та значною мірою залежить від нестабільності температурного режиму, газифікація забезпечує більш прогнозований і контрольований перебіг реакцій, що є важливою передумовою підвищення екологічної безпеки технології.

У реакторі газифікації реалізується послідовний комплекс фізико-хімічних перетворень, кожне з яких відіграє визначальну роль у формуванні кінцевих продуктів процесу. На початковій стадії відбувається сушіння відходів, під час якого видаляється волога та знижується енергетичне навантаження на подальші етапи термічної обробки. Наступною є стадія піролізу, що супроводжується термічним розкладанням органічної речовини з утворенням легких компонентів і твердого вуглецевмісного залишку. Подальші відновні реакції між вуглецем, водяною парою та вуглекислим газом сприяють утворенню монооксиду вуглецю та водню, які визначають паливну цінність синтез-газу. Часткове окиснення, у свою чергу, забезпечує підтримання необхідного теплового балансу процесу без залучення зовнішніх джерел енергії.

Сукупність зазначених стадій формує не лише склад і теплотворну здатність синтез-газу, а й фізико-хімічні властивості твердого залишку, який зазвичай характеризується зменшеною масою, нижчою біодоступністю небезпечних компонентів і підвищеною стабільністю порівняно з початковими відходами. Це створює передумови для зниження екологічних ризиків під час подальшого поводження з твердими

продуктами газифікації та розширює можливості їх вторинного використання.

Зосередження на екологічних аспектах застосування газифікаційних технологій дозволяє розглядати їх не лише як інженерне рішення з перероблення відходів, а як комплексний інструмент зниження довгострокових екологічних ризиків. Однією з ключових переваг газифікації є істотне скорочення обсягів захоронення відходів, що безпосередньо впливає на зменшення площ полігонів, зниження навантаження на ґрунтове середовище та мінімізацію ризиків фільтраційного забруднення підземних і поверхневих вод. Відмова від захоронення органічної фракції відходів також знижує ймовірність утворення біогазу та неконтрольованих викидів метану, що має суттєве значення з огляду на кліматичні аспекти екологічної безпеки.

Перетворення органічної складової відходів у газоподібне паливо в процесі газифікації створює передумови для скорочення використання викопних енергоресурсів і зменшення сумарного антропогенного навантаження на довкілля. Синтез-газ, отриманий у результаті термохімічної обробки, може бути використаний для виробництва теплової та електричної енергії або як сировина для подальших хімічних перетворень, що відповідає принципам ресурсоефективності та циркулярної економіки. Таким чином, газифікація сприяє переходу від утилізаційної моделі поводження з відходами до моделі їх залучення у вторинний ресурсний обіг.

Важливим екологічним аспектом є вплив газифікації на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря. У порівнянні з прямим спалюванням відходів, газифікаційні процеси характеризуються нижчим потенціалом утворення оксидів азоту, діоксиду сірки, твердих частинок, а також діоксинів і фуранів, оскільки основні реакції відбуваються в контрольованому середовищі з обмеженим доступом кисню. Перенесення стадії окиснення газоподібних продуктів за межі основного

реактора створює можливість застосування багатоступневих систем очищення синтез-газу, що дозволяє ефективно видаляти пил, кислі гази та органічні домішки. За умови використання сучасних технологій газоочищення екологічні показники газифікаційних установок можуть відповідати або навіть перевищувати вимоги чинних нормативів щодо викидів забруднюючих речовин.

Окремої уваги потребує проблема поводження з твердими залишками газифікації, які утворюються внаслідок термохімічного перетворення неорганічної складової відходів. На відміну від зольних залишків після спалювання, тверді продукти газифікації зазвичай характеризуються нижчою розчинністю небезпечних компонентів і більш стабільною мінеральною структурою. Це зменшує ризики вторинного забруднення довкілля під час їх зберігання або захоронення та відкриває можливості для залучення таких матеріалів у вторинне використання, зокрема у будівельній галузі або як заповнювачі за умови дотримання екологічних вимог. У сукупності зазначені фактори свідчать про те, що газифікація відходів може розглядатися як екологічно доцільна технологія, здатна суттєво підвищити рівень екологічної безпеки та знизити негативний вплив систем поводження з відходами на навколишнє природне середовище.

Кількісне порівняння викидів доречно подавати не як «абстрактну екологічність», а через зіставлення фактичних (або розрахункових) концентрацій у димових газах із граничними значеннями, які встановлені регуляторно. Для газифікаційних ліній, де синтез-газ після очищення доспалюється в котлі/камері допалювання або двигуні, екологічна оцінка на виході установки практично зводиться до контролю параметрів, аналогічних установкам термічного оброблення відходів, оскільки саме стадія окиснення (допалювання) формує основний потік газів, що

відводиться в атмосферу. Важливо також, що нормативи задаються у стандартних умовах і за нормованої частки кисню, тому порівняння коректне лише після приведення вимірювань до «сухого газу» та відповідного O₂.

Нижче наведено зіставлення ключових граничних показників для

установок спалювання відходів у ЄС [21], та в Україні [7]. Числа наведено як середньодобові (daily average) для безперервно контрольованих речовин, а для діоксинів/фуранів і металів — як середні за період відбору проб, що відповідає логіці нормування.

Таблиця 1 – Порівняння граничних показників викидів забруднюючих речовин для установок термічної обробки відходів (стандартизація: сухий газ; O₂ = 11 %)

Показник	ЄС (IED 2010/75/EU)	Україна (Наказ №856, 2025)
Пил (TSP/PM), мг/Нм ³	10	10
ТОС (загальний органічний вуглець), мг/Нм ³	10	10
HCl, мг/Нм ³	10	10
HF, мг/Нм ³	1	1
SO ₂ , мг/Нм ³	50	50
NO _x як NO ₂ , мг/Нм ³ (потужність > 6 т/год або нові установки)	200	200
NO _x як NO ₂ , мг/Нм ³ (потужність ≤ 6 т/год)	400	400
Діоксини + фурани, нг I-TEQ/Нм ³ (6–8 год відбір проб)	0,1	0,1
Cd + Tl (сумарно), мг/Нм ³ (30 хв–8 год відбір)	0,05	0,05
Hg, мг/Нм ³ (30 хв–8 год відбір)	0,05	0,05
Σ(Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V), мг/Нм ³	0,5	0,5
CO, мг/Нм ³ (середньодобове значення)	50	—

Ця таблиця показує принципову річ для аргументації в статті: українські граничні значення для «класичних» маркерів атмосферного впливу на рівні інтегрованого контролю практично синхронізовані з вимогами IED для установок спалювання відходів (і за набором речовин, і за числовими рівнями, і за приведенням до 11% O₂ у сухих газах). Це дозволяє в тексті коректно підсилити тезу про екологічну доцільність газифікації через «керованість процесу + очищення газової фази» так: якщо газифікаційний комплекс проектується з повним контуром охолодження/очищення синтез-газу та стабільним допалюванням, то досягнення нормативів стає інженерно передбачуваним, оскільки контроль ведеться по тих самих реперних

показниках, що й для найжорсткіше регульованих термічних установок, а формування діоксинів/фуранів та кислих газів переноситься в режим, де їх простіше відсікати технологічно (температурно-часовий режим, швидке «quench»-охолодження, сорбційно-реагентне вилучення HCl/HF/SO₂, уловлювання пилу та металів у фільтрувальних ступенях).

Наведемо короткий приклад розрахунку “запасу по нормативу” для трьох контрольних показників, які найчастіше використовують як реперні для екологічної оцінки газифікаційних комплексів із допалюванням: пил, NO_x та SO₂. Для коректності порівняння приймаємо, що концентрації приведені до стандартних умов для сухих димових газів

за 11% O₂, а граничні значення (ELV) становлять для пилу 10 мг/Нм³, для NO_x (як NO₂) 200 мг/Нм³ та для SO₂ 50 мг/Нм³. Тоді сценарії 30%, 70% і 90% від ELV відповідають різним рівням технологічної “наближеності” до ліміту, а запас по нормативу зручно визначати як різницю між ELV і фактичною концентрацією: $\Delta = ELV - C$, де $C = k \cdot ELV$, $k = 0,30; 0,70; 0,90$.

Для кількісної оцінки екологічної надійності газифікаційних установок використано підхід визначення запасу щодо граничних значень викидів (ELV). Як базові прийнято нормативні концентрації забруднюючих речовин у димових газах, приведені до стандартних умов (сухий газ, 11 % O₂): для твердих

частинок (пилу) – 10 мг/Нм³, для оксидів азоту (NO_x у перерахунку на NO₂) – 200 мг/Нм³, для діоксиду сірки (SO₂) – 50 мг/Нм³. Оцінювання проведено для трьох сценаріїв експлуатації установки, що відповідають рівням 30 %, 70 % та 90 % від гранично допустимих значень.

Запас по нормативу визначали як різницю між граничним значенням і фактичною концентрацією забруднюючої речовини, що дозволяє оцінити ступінь екологічної стійкості процесу та чутливість системи до коливань режимів роботи.

Кількісна оцінка запасу щодо граничних значень викидів для основних забруднюючих речовин наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Кількісна оцінка запасу щодо граничних значень викидів (ELV)

Забруднююча речовина	ELV, мг/Нм ³	30 % ELV, мг/Нм ³	Запас, мг/Нм ³	70 % ELV, мг/Нм ³	Запас, мг/Нм ³	90 % ELV, мг/Нм ³ / запас
Пил	10	3	7	7	3	9 / 1
NO _x	200	60	140	140	60	180 / 20
SO ₂	50	15	35	35	15	45 / 5

Отримані результати свідчать, що за рівня викидів, що не перевищує 30 % від граничних значень, газифікаційна установка має значний технологічний резерв, який забезпечує високу екологічну стійкість і низьку чутливість до зміни експлуатаційних параметрів. Сценарій 70 % ELV характеризується зменшенням, але достатнім запасом по нормативу, що вимагає стабільного контролю процесу газоочищення та режимів горіння або допалювання. За умов наближення до 90 % ELV запас по нормативу стає мінімальним, що підвищує ризик

перевищення граничних значень у перехідних режимах роботи та потребує додаткових інженерних заходів з оптимізації процесу або підсилення систем очищення.

Графічно співвідношення між сценаріями 30 %, 70 % і 90 % ELV доцільно інтерпретувати як послідовне наближення фактичних концентрацій до нормативної межі, де зі зростанням частки від ELV зменшується екологічний запас і підвищуються вимоги до стабільності технологічного процесу.

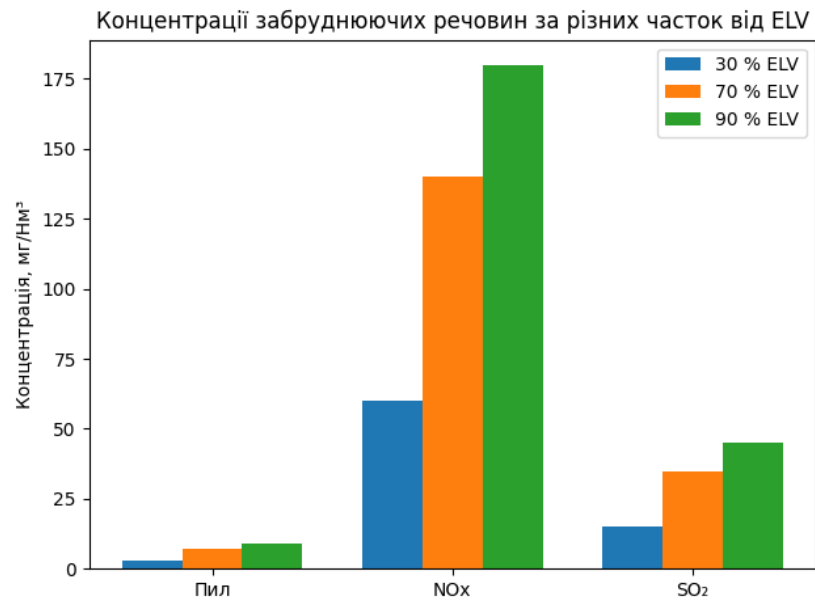


Рис. 1 – Концентрації забруднюючих речовин

На рис. 1 наведено порівняння концентрацій пилу, оксидів азоту та діоксиду сірки за сценаріїв експлуатації газифікаційної установки на рівні 30 %, 70 % і 90 % від гранично допустимих значень. Діаграма наочно демонструє зменшення запасу по нормативу зі зростанням частки від ELV, що підтверджує необхідність стабільного контролю режимів газоочищення при роботі в наближених до граничних умовах.

Порівняння газифікації з іншими термічними методами оброблення відходів, зокрема прямим спалюванням і піролізом, дозволяє комплексно оцінити її екологічні та технологічні переваги в контексті підвищення рівня екологічної безпеки. Пряме спалювання відходів ґрунтується на повному окисненні органічної складової за надлишку кисню, що супроводжується утворенням значних обсягів димових газів і потребує складних систем очищення для дотримання екологічних нормативів. Піроліз, у свою чергу, реалізується в безкисневому середовищі та орієнтований переважно на отримання рідких і твердих продуктів, проте характеризується підвищеною

чутливістю до морфологічного складу відходів і обмеженими можливостями стабільного енергетичного використання продуктів процесу без додаткових стадій обробки.

Газифікація займає проміжне, але технологічно більш гнучке положення між зазначеними методами, поєднуючи переваги контролюваного термохімічного перетворення з можливістю безперервного енергетичного використання газоподібних продуктів. Обмежений доступ окисника та відновне середовище дозволяють зменшити потенціал утворення токсичних органічних сполук у реакційній зоні, тоді як перенесення стадії окиснення за межі газифікатора створює передумови для більш ефективного контролю викидів. З екологічної точки зору це означає вищий рівень керованості процесу та прогнозованість досягнення нормативних показників порівняно з прямим спалюванням.

Для наочності відмінностей між термічними технологіями у статті доцільно використовувати порівняльну таблицю, яка узагальнює їх ключові характеристики з позицій екологічної безпеки та ресурсної ефективності

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика термічних технологій оброблення відходів з позицій екологічної безпеки

Технологія	Середовище процесу	Основний продукт процесу	Потенціал утворення токсичних сполук	Керованість викидів забруднюючих речовин	Загальний рівень екологічної безпеки
Спалювання	Надлишок кисню	Теплова енергія, димові гази	Високий	Обмежена	Середній
Піроліз	Безкисневе середовище	Піролізна олія, твердий кокс	Середній	Середня	Середній
Газифікація	Обмежений доступ окисника	Синтез-газ	Нижчий	Висока	Підвищений

Узагальнення порівняльних характеристик показує, що газифікація забезпечує більш збалансоване поєднання екологічних та енергетичних параметрів, особливо в системах, орієнтованих на мінімізацію захоронення відходів і скорочення антропогенного навантаження на довкілля. На відміну від піролізу, де утилізація рідких і твердих продуктів може супроводжуватися додатковими екологічними ризиками, газифікація

дозволяє інтегрувати процес у єдину енергетичну схему з централізованим контролем викидів. Порівняно зі спалюванням, газифікаційні установки характеризуються меншою кількістю димових газів на одиницю обробленої маси відходів, що спрощує досягнення нормативних вимог. Порівняльні характеристики основних термохімічних технологій перероблення відходів наведено в табл. 4.



Рисунок 2 – Концентрації забруднюючих речовин за різних часток від граничних значень викидів (ELV)

Таблиця 4 – Порівняльна характеристика основних термохімічних технологій оброблення відходів

Параметр	Торрефікація	Піроліз	Газифікація	Спалювання (інсинерація)
Атмосфера процесу	Інертне середовище	Киснедефіцитне середовище	Обмежений доступ кисню	Надлишок кисню
Температурний діапазон	200–350 °С	300–1300 °С	800–1200 °С	750–1100 °С
Робочий тиск	Атмосферний	Близько 1 бар	1–45 бар	Близько 1 бар
Основні продукти процесу	Твердий вуглецевий залишок (char)	Твердий кокс + рідке паливо (смола) + синтез-газ	Синтез-газ (CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , легкі вуглеводні)	CO ₂ , H ₂ O та теплова енергія
Термохімічний характер	Ендотермічний	Ендотермічний	Екзотермічний	Екзотермічний
Швидкість нагріву	Низька	Повільна (≈10 °С/хв); швидка (до 600 °С/с)	Змінна (залежить від типу газифікатора)	Середня
Типи відходів	Харчові відходи, ПВХ-пластики, зношені шини, деревні залишки	Попередньо оброблені ТПВ (видалення скла, металів, інертних домішок)	Попередньо оброблені ТПВ (видалення скла, металів, інертних домішок)	Змішані тверді побутові відходи
Технологічні рішення	Оберткові барабани, шнекові реактори, багатоподові печі, реактори з рухомих шаром, стрічкові сушарки, мікрохвильові реактори	Оберткові печі, трубчасті реактори (промислові); реактори з фіксованим і псевдозрідженим шаром (лабораторні дослідження)	Газифікатори з потоком, псевдозрідженим шаром, циклонні та насадкові газифікатори	Печі з псевдозрідженим шаром, печі з киплячим шаром, решітчасті печі

Таким чином, порівняльний аналіз свідчить, що газифікація відходів має потенціал стати ключовою термохімічною технологією у сучасних системах управління відходами, поєднуючи високий ступінь екологічної безпеки з можливістю ефективної енергетичної та ресурсної утилізації продуктів процесу.

Висновок

Газифікація відходів є ефективною термохімічною технологією, здатною забезпечити підвищення рівня екологічної безпеки систем поводження з відходами за рахунок керованості процесів термічного перетворення органічної складової та

можливості цілеспрямованого контролю утворення забруднюючих речовин. Реалізація процесу в умовах високотемпературного часткового окиснення з обмеженим доступом окисника створює передумови для стабільного формування синтез-газу з прогнозованими фізико-хімічними характеристиками та ефективного очищення газової фази перед її енергетичним використанням. Порівняння екологічних показників газифікаційних установок із вимогами нормативів Європейського Союзу та України свідчить про можливість досягнення відповідності граничним рівням викидів пилу, оксидів азоту,

діоксиду сірки та стійких органічних забруднювачів за умови застосування сучасних систем газоочищення та оптимізації режимів роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для обґрунтування технічних і організаційних рішень під час проектування та впровадження газифікаційних комплексів у складі регіональних і локальних систем управління відходами, а також у процесах оцінювання впливу на довкілля та формування екологічних вимог до об'єктів термічної переробки. Встановлення технологічного запасу по ключових показниках викидів підвищує надійність експлуатації газифікаційних установок і знижує ризики перевищення нормативів у перехідних режимах роботи. Додатковою екологічною перевагою газифікації є суттєве скорочення обсягів захоронення відходів і можливість залучення твердих залишків до вторинного використання за умови дотримання екологічних вимог, що в сукупності сприяє зменшенню антропогенного навантаження на довкілля та підвищенню рівня екологічної безпеки територій.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про управління відходами». Відомості Верховної Ради України. – 2022. – № 10. – Ст. 74.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». Відомості Верховної Ради України. – 1991. – № 41. – Ст. 546.
3. Національний план управління відходами до 2030 року. Затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // Офіційний вісник України. – 2019. – № 22.
4. ДСТУ 4462.3.01:2006. Охорона природи. Поводження з відходами. Термічне оброблення відходів. Загальні вимоги. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 24 с.
5. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування (у частині

поводження з осадами та відходами). – Київ : Мінрегіон України, 2013.

6. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 25.04.2025 № 856. Про затвердження Вимог до викидів забруднюючих речовин від установок спалювання та співспалювання відходів // Офіційний вісник України. – 2025.

7. Мальований Михайло Степанович, Шмандій Валерій Миколайович. Термічні методи переробки твердих побутових відходів у системі екологічної безпеки // *Екологічна безпека*. – 2017. – № 1(23). – С. 9–15.

8. Шмандій Валерій Миколайович, Харламова Олена Вікторівна, Мальований Михайло Степанович. Аналіз екологічних ризиків термічної утилізації відходів // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2018. – № 5(112). – С. 123–129.

9. Мальований Михайло Степанович, Харламова Олена Вікторівна. Сучасні підходи до управління відходами в Україні // *Екологічні науки*. – 2019. – № 2(25). – С. 18–25.

10. Білецький Володимир Степанович. Техногенно-екологічна безпека : монографія. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2014. – 312 с.

11. Кравченко Олександр Миколайович, Бондар Олександр Іванович. Управління відходами як чинник екологічної безпеки держави // *Екологічні науки*. – 2019. – № 4(27). – С. 88–95.

12. Markina Liudmyla Mykolaivna, Ushkats Svitlana Yuriiivna, Mihelev Ivan Leonidovych, Zholobenko Nataliia Yuriiivna. Determination of morphological composition of municipal solid waste for Mykolayiv city (Ukraine) and forecasting of their accumulation in the future // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2022. – № 6(1). – С. 87–94.

13. Markina Liudmyla Mykolaivna. Analysis of the world market of waste management // *Technologies of Advanced Materials and Products*. – 2024. – Vol. 5, Issue 2. – P. 34–48. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.307321.

15. European Parliament and Council. Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // *Official Journal of the European Union*. – 2010. – L 334. – P. 17–119.

16. Arena Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review // *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32, Issue 4. – P. 625–639. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.

17. Higan Christopher, van der Burgt Maarten. *Gasification*. – 2nd ed. – Oxford : Elsevier, 2008. – 456 p.
