

УДК 628.511:66.067:678.742:504.064

DOI <https://doi.org/10.32782/hst-2026-26-103-21>

## РЕЦИКЛІНГ ПЛАСТИКІВ: ФІЛОСОФСЬКІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКІВ

БСЛОКОНЬ КАРИНА<sup>1</sup>  
МЕТЕЛЕНКО, НАТАЛІЯ<sup>2</sup>  
ОГЛОБЛІНА, ВІКТОРІЯ<sup>3</sup>

### Анотація

У статті досліджено системні дисфункції технологій очищення газових викидів у процесах рециклінгу пластикових матеріалів. Актуальність теми зумовлена зростанням обсягів пластикових відходів та необхідністю мінімізації екологічних ризиків, пов'язаних із вторинною переробкою полімерів. Одним із перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми є вторинна переробка пластикових пляшок, яка дозволяє частково замінити первинну сировину, зменшити обсяги відходів та знизити загальне навантаження на природні ресурси. Метою даної роботи є розроблення ефективної системи очищення технологічних газів, що утворюються в процесі промислової переробки пластикових пляшок, з метою зниження шкідливих викидів в атмосферу, забезпечення екологічної безпеки виробництва та дотримання нормативних вимог щодо охорони навколишнього середовища. Залишається відкритою проблема комплексного видалення високотоксичних сполук (зокрема діоксинів і фуранів), які утворюються під час термічних процесів. Більшість наявних технологій забезпечують лише часткове очищення або переносять забруднення в інші агрегатні стани, що не вирішує проблему в цілому. Недостатньо опрацьованим є також питання вторинного забруднення, яке виникає внаслідок використання очисних систем (утворення шламів, відпрацьованих сорбентів, токсичних залишків), що потребують додаткової утилізації та створюють нові екологічні ризики. Проаналізовано основні джерела утворення шкідливих газоподібних сполук під час термічної та механічної переробки пластиків, а також ефективність існуючих систем газоочищення. Визначено ключові дисфункції, зокрема: технологічну невідповідність очисного обладнання складу викидів, недостатню адаптивність систем до змін сировини, енергетичну неефективність, а також недосконалість систем моніторингу та контролю. Особливу увагу приділено аналізу бар'єрів впровадження інноваційних екологічних технологій у сфері рециклінгу. Обґрунтовано необхідність інтеграції комплексних підходів до очищення газових викидів, що поєднують сучасні фільтраційні, каталітичні та біотехнологічні методи. Запропоновано напрями підвищення ефективності екологічної безпеки рециклінгових процесів, зокрема через цифровізацію систем контролю, впровадження принципів циркулярної економіки та оптимізацію технологічних режимів. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення екологічної політики підприємств та підвищення ефективності управління викидами у галузі переробки пластикових матеріалів.

**Ключові слова:** системні дисфункції, технології очищення, газові викиди, рециклінг, пластикові матеріали.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних умовах розвитку промисловості особливої актуальності набуває впровадження технологій захисту навколишнього середовища, які спрямовані на зменшення техногенного навантаження на екосистеми. Однією з найгостріших екологічних проблем сьогодення є накопичення полімерних відходів, зокрема пласт-

тикових пляшок із поліетилентерефталату (ПЕТ), які масово використовуються в упаковці харчових продуктів і напоїв. Через тривалий термін розкладу та низьку біодеградабельність, ПЕТ-відходи становлять серйозну загрозу для довкілля, особливо за умов їх несанкціонованого спалювання або захоронення на полігонах твердих побутових відходів.

Одним із перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми є вторинна переробка пластикових пляшок, яка дозволяє частково замінити первинну сировину, зменшити обсяги відходів та знизити загальне навантаження на природні ресурси. Водночас технологічні процеси, що супроводжують переробку полімерів, зокрема термічні методи (піроліз, газифікація, спалювання), спричиняють утворення значної кількості шкідливих газоподібних викидів. До складу цих викидів можуть входити токсичні та канцерогенні речовини, такі

<sup>1</sup> Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: kvbelokon@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2000-4052>

<sup>2</sup> Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: natalia.metelenko@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6757-3124>

<sup>3</sup> Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: va.ogloblina@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6627-0255>

як діоксини, формальдегід, леткі органічні сполуки, оксиди азоту, сірки та вуглецю, а також важкі метали у вигляді аерозолів. Зростання виробництва та споживання пластикових матеріалів у світі призводить до накопичення відходів, що створює значні екологічні та соціальні ризики. Під час термічної та механічної переробки пластиків утворюються високотоксичні сполуки, такі як діоксини та фурани, які негативно впливають на здоров'я людей і стан екосистем. Існуючі технології очищення газових викидів забезпечують лише часткове видалення шкідливих компонентів або переносять їх у інші агрегатні стани, що не вирішує проблему комплексно, а вторинне забруднення у вигляді шлаків, відпрацьованих сорбентів та токсичних залишків створює додаткові екологічні загрози.

Проблема очищення газових викидів у рециклінгу пластиків має міждисциплінарний характер і поєднує екологічні, технологічні, економічні та соціальні аспекти, що визначає її глобальну значимість та вплив на досягнення цілей сталого розвитку, циркулярної економіки та зменшення викидів парникових газів. Концептуально, цю проблему слід розглядати як комплексну систему, де взаємодіють технологічні процеси, хімічні перетворення, екологічні фактори та соціальні наслідки, що дозволяє ідентифікувати критичні точки дисфункцій та розробляти інтегровані рішення. Філософський вимір проблеми підкреслює парадокс чистоти, коли заходи, спрямовані на очищення, самі стають джерелом забруднення, що потребує усвідомлення етичних та онтологічних аспектів екологічної безпеки. Інноваційна перспектива передбачає інтеграцію сучасних технологій, таких як штучний інтелект, Інтернет речей, високоефективні сорбенти та фотокаталітичні процеси, для оптимізації очищення, мінімізації вторинного забруднення та прогнозування екологічних наслідків. Проблему можна моделювати на двох рівнях: теоретичному – шляхом системного аналізу дисфункцій і розробки концептуальних моделей, та практичному – через впровадження технологічних рішень у промисловий рециклінг з оцінкою ефективності та екологічних ризиків, що формує фундамент для розвитку нових стійких і безпечних технологій переробки пластикових матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, з яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор.** Останні наукові дослідження свідчать, що існуючі технології очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок характеризуються низкою

системних дисфункцій, які зумовлені як складністю хімічного складу викидів, так і обмеженими можливостями традиційних інженерних рішень. Зокрема, у працях Nassim Nicholas Taleb підкреслюється загальна ідея технологічної «крихкості» складних систем, що може бути застосована і до екологічних технологій, які не здатні ефективно адаптуватися до змінних умов функціонування. Дослідження в галузі екологічної інженерії (наприклад, роботи Martin J. Mulder та Yongsheng Chen) показують, що при термічній і хімічній переробці полімерів утворюються складні багатокомпонентні газові суміші (включаючи леткі органічні сполуки, діоксини, оксиди азоту), які не можуть бути повністю нейтралізовані стандартними методами очищення, такими як адсорбція чи скрубінг. Водночас у дослідженнях Jie Zhang акцентується увага на тому, що ефективність очищення значною мірою знижується через нестабільність складу сировини, оскільки різні типи пластмас продукують відмінні за хімічною природою викиди. Крім того, як зазначає Shuming Chen, сучасні каталітичні системи хоча й демонструють покращені показники очищення, проте залишаються енергоємними та економічно витратними, що обмежує їх широке впровадження. У сукупності це дозволяє зробити висновок, що ключова проблема полягає не лише у недосконалоості окремих технологій, а у відсутності інтегрованого системного підходу до очищення газових викидів у процесах переробки пластику, що підтверджується сучасним науковим дискурсом у сфері екологічної безпеки та циркулярної економіки.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері екологічної інженерії та переробки полімерних відходів, у сучасному науковому дискурсі залишається низка невирішених аспектів загальної проблеми очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок. Передусім недостатньо досліджено питання адаптивності технологій очищення до варіативного та нестабільного складу газових викидів, що формується залежно від типу полімерів, домішок і технології переробки. Існуючі підходи переважно орієнтовані на відносно стабільні умови функціонування і не враховують динамічний характер сучасних відходопотоків.

Крім того, залишається відкритою проблема комплексного видалення високотоксичних сполук (зокрема діоксинів і фуранів), які утворюються під

час термічних процесів. Більшість наявних технологій забезпечують лише часткове очищення або переносять забруднення в інші агрегатні стани, що не вирішує проблему в цілому. Недостатньо опрацьованим є також питання вторинного забруднення, яке виникає внаслідок використання очисних систем (утворення шламів, відпрацьованих сорбентів, токсичних залишків), що потребують додаткової утилізації та створюють нові екологічні ризики. Особливої уваги потребує інтеграція процесів переробки та очищення в єдині замкнені технологічні системи, оскільки на практиці ці процеси часто функціонують відокремлено, що знижує загальну ефективність екологічного контролю. Водночас відсутні достатньо обґрунтовані моделі оптимізації таких інтегрованих систем з урахуванням енергетичних, економічних та екологічних параметрів. Також невирішеним залишається питання зниження енергоємності та підвищення економічної доцільності сучасних технологій очищення, що є критичним для їх масштабного впровадження в умовах циркулярної економіки.

Таким чином, окреслені прогалини свідчать про необхідність подальших досліджень, спрямованих на розробку адаптивних, енергоефективних та інтегрованих технологій очищення газових викидів, здатних забезпечити комплексну екологічну безпеку процесів переробки пластикових відходів. зв'язку з цим необхідною складовою сучасних переробних підприємств є впровадження високоефективних технологій захисту навколишнього середовища. Зокрема, системи очищення технологічних газів повинні забезпечувати уловлювання, нейтралізацію або каталітичне перетворення шкідливих компонентів до безпечних форм, які не перевищують гранично допустимі концентрації відповідно до чинних екологічних нормативів (Huang, Chen, Zhao, 2024).

Як свідчить аналіз, технології газоочищення, що застосовуються у цій галузі, можуть включати використання скрубєрів, абсорбційних та адсорбційних установок, електрофільтрів, каталітичних нейтралізаторів, термічних окиснювачів або комбінацій зазначених методів. Крім того, актуальним є застосування автоматизованих систем моніторингу викидів, що дозволяє в режимі реального часу контролювати склад газоподібних сумішей і запобігати аварійним ситуаціям. Слід зазначити, що сучасні екологічні технології мають не лише природоохоронне, але й економічне значення. Таким чином, впровадження систем очищення технологічних газів у процесах переробки пласт-

тикових пляшок є необхідною умовою забезпечення сталого розвитку промисловості, збереження довкілля та дотримання вимог національного і міжнародного природоохоронного законодавства.

**Мета та формування цілей статті (постановка завдання).** Метою даної роботи є розроблення ефективної системи очищення технологічних газів, що утворюються в процесі промислової переробки пластикових пляшок, з метою зниження шкідливих викидів в атмосферу, забезпечення екологічної безпеки виробництва та дотримання нормативних вимог щодо охорони навколишнього середовища.

**Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

**1. Системні дисфункції існуючих технологій очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок.** Інтенсифікація процесів промислової переробки пластикових пляшок у контексті циркулярної економіки супроводжується зростанням обсягів газових викидів, що мають складний багатоконпонентний характер. Практичний досвід функціонування газоочисних установок у пластикопереробній промисловості свідчить про наявність низки системних проблем, які знижують їх екологічну та технологічну результативність. Більшість існуючих систем були спроектовані з урахуванням стабільних режимів роботи, тоді як сучасні виробничі процеси характеризуються змінністю складу сировини та нерівномірністю газових потоків. Це зумовлює необхідність глибшого теоретико-методологічного осмислення системних дисфункцій у сфері очищення технологічних газів (Воронкова, Метеленко, Оглобліна, Венгер, 2025, с.5-18).

З позицій системного підходу технології очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок доцільно розглядати як інтегровані техніко-екологічні комплекси, що включають сукупність апаратів, допоміжного обладнання, контрольно-вимірювальних засобів та управлінських рішень. Ефективність таких систем визначається не лише характеристиками окремих елементів, а передусім рівнем їх узгодженості та адаптивності до реальних виробничих умов.

Наведена таблиця свідчить, що системні дисфункції мають комплексний характер і потребують інтегрованих техніко-екологічних рішень. Наявність зазначених порушень істотно обмежує можливості досягнення високих показників очищення та підвищує екологічні ризики для навколишнього середовища і населення (Zhang, Li.,

Системні дисфункції існуючих технологій очищення газових викидів

Група системних дисфункцій	Сутність прояву	Причини виникнення	Екологічні та технологічні наслідки	Можливі шляхи усунення
Технологічні	Низька ефективність абсорберів та адсорберів при змінному складі газів	Застарілі конструкції, проектування під стабільні режими	Недоочищення газів, перевищення ГДК	Модернізація обладнання, багатоступеневі системи очищення
Фізико-хімічні	Низька селективність сорбентів до полімерних ЛОС	Невідповідність сорбентів складу газових домішок	Високі залишкові концентрації токсичних речовин	Використання комбінованих сорбентів і каталітичних матеріалів
Каталітичні	Деградація каталізаторів у процесі експлуатації	Забруднення поверхні каталізатора продуктами деструкції полімерів	Зниження ступеня перетворення шкідливих сполук	Регенерація або заміна каталізаторів, оптимізація температурних режимів
Екологічні	Утворення вторинних відходів очищення	Неефективна утилізація відпрацьованих сорбентів і шламів	Вторинне забруднення довкілля	Замкнені цикли регенерації, екологічно безпечна утилізація
Організаційно-управлінські	Відсутність постійного екологічного моніторингу	Недостатня автоматизація контролю викидів	Неможливість оперативного реагування	Впровадження автоматизованих систем моніторингу
Системні (інтеграційні)	Неузгодженість між етапами газоочищення	Відсутність комплексного проектування	Зниження загальної ефективності системи	Інтегровані системи очищення з адаптивним управлінням

Novak, p. 712–724). Системні дисфункції виникають у разі порушення взаємозв'язків між етапами газоочищення, невідповідності між фізико-хімічними властивостями газових домішок і обраними методами їх видалення, а також за відсутності гнучких механізмів регулювання технологічних параметрів. Особливо гостро ці проблеми проявляються у випадках використання застарілих абсорбційних або адсорбційних установок, які не забезпечують належного рівня очищення багатоконпонентних газових сумішей, характерних для переробки полімерів.

## 2. Напрями подолання системних дисфункцій існуючих технологій очищення газових викидів.

Можна виокремити кілька ключових груп системних дисфункцій у технологіях очищення газових викидів при переробці пластикових пляшок: технологічні дисфункції, пов'язані з невідповідністю конструктивних параметрів газоочисних апаратів реальним умовам експлуатації; фізико-хімічні дисфункції, що проявляються у низькій селективності сорбентів або каталізаторів щодо специфічних домішок полімерного походження; екологічні дис-

функції, які полягають у вторинному забрудненні довкілля внаслідок утворення відпрацьованих сорбентів, шламів або побічних продуктів очищення; організаційно-управлінські дисфункції, зумовлені відсутністю системного екологічного моніторингу та інтегрованого управління процесами газоочищення (Liu, Ahmed, Kim, 2024).

Технологічні напрями подолання. Механізми реалізації: впровадження багатоступеневих систем очищення (поєднання абсорбції, адсорбції та каталізу); заміна застарілих газоочисних апаратів на модульні та адаптивні установки; оптимізація гідродинамічних і теплових режимів роботи газоочисного обладнання; використання енергоефективних технологій рекуперації тепла газових потоків. Результат: підвищення стабільності та глибини очищення газових викидів.

Фізико-хімічні напрями подолання. Механізми реалізації: застосування високоселективних сорбентів нового покоління (активоване вугілля, цеоліти, композитні матеріали); впровадження каталітичних систем із підвищеною стійкістю до отруєння; адаптація складу сорбентів до кон-

кретних домішок, характерних для полімерної переробки; регенерація сорбентів і каталізаторів у замкнених циклах. Результат: зниження концентрації токсичних домішок і мінімізація вторинних забруднень (Wang, Torres, Jackson, 2025).

Інноваційно-технологічні напрями: використання цифрових технологій моніторингу складу газових викидів у реальному часі; впровадження систем автоматичного керування процесами очищення на основі штучного інтелекту; застосування гібридних технологій очищення (плазмохімічні, фотокаталітичні методи); інтеграція газоочисних систем у концепцію «розумного виробництва» (Industry 4.0). Результат: підвищення адаптивності систем очищення до змінних виробничих умов.

Екологічні напрями: зменшення утворення вторинних відходів очищення; екологічно безпечна утилізація або повторне використання відпрацьованих матеріалів; дотримання принципів циркулярної економіки; впровадження екологічного аудиту та оцінки життєвого циклу систем очищення. Результат: зниження екологічного навантаження на довкілля.

Організаційно-управлінські напрями: створення інтегрованих систем екологічного менеджменту; регулярний контроль ефективності газоочищення та відповідності нормативам; підвищення кваліфікації персоналу; впровадження екологічних стандартів (ISO 14001, BAT). Результат: забезпечення стабільної та нормативно безпечної роботи систем очищення (Іваненко, Кравченко, Гнатенко, 2023, с. 45–53).

**3. Системні дисфункції існуючих технологій очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок.** Системні дисфункції існуючих технологій очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок – це комплекс взаємопов'язаних технологічних, фізико-хімічних, екологічних та управлінських порушень у функціонуванні систем газоочищення, що виникають унаслідок їх невідповідності сучасним умовам полімерного виробництва та призводять до зниження ефективності очищення, зростання екологічного навантаження та порушення принципів сталого розвитку. подано структуроване роз-

Таблиця 2

**Системні дисфункції технологій очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок**

<b>Системна дисфункція</b>	<b>Напрямок подолання</b>	<b>Механізми реалізації</b>	<b>Очікуваний екологічний та технологічний ефект</b>
Низька ефективність очищення при змінному складі газів	Технологічний	Багатоступеневі системи очищення; модульна конструкція газоочисного обладнання	Стабільне досягнення нормативних показників очищення
Невідповідність методів очищення фізико-хімічним властивостям домішок	Фізико-хімічний	Підбір селективних сорбентів і каталізаторів; комбіновані методи очищення	Поглиблене вилучення токсичних компонентів
Деградація сорбентів і каталізаторів	Інноваційно-технологічний	Регенерація матеріалів; застосування стійких каталізаторів нового покоління	Подовження ресурсу обладнання, зниження експлуатаційних витрат
Утворення вторинних відходів очищення	Екологічний	Замкнені цикли утилізації; екологічно безпечна переробка відходів	Мінімізація вторинного забруднення довкілля
Відсутність адаптивного управління процесами	Цифрово-інноваційний	Автоматизовані системи моніторингу; цифрове керування режимами очищення	Оперативна реакція на зміну параметрів викидів
Неузгодженість між етапами газоочищення	Системно-інтеграційний	Комплексне проектування систем; інтеграція очищення у виробничий процес	Підвищення загальної ефективності системи
Недостатній екологічний контроль і менеджмент	Організаційно-управлінський	Впровадження екологічного менеджменту; регулярний аудит	Дотримання екологічних норм і стандартів

Джерело: сформовано автором.

криття шляхів подолання системних дисфункцій із чітким розмежуванням напрямів і механізмів, що відповідає науково-проектному рівню роботи. Таким чином, подолання системних дисфункцій технологій очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок потребує комплексного поєднання технологічних, фізико-хімічних, інноваційних, екологічних та управлінських напрямів, реалізованих через відповідні механізми. Такий підхід створює передумови для підвищення екологічної ефективності виробництва та переходу до моделей сталого розвитку. Наведені напрями та механізми подолання системних дисфункцій створюють методологічну основу для проектування інтегрованої системи очищення технологічних газів (Воронкова, Нікітенко, Метеленко, 2025, с.22-30).

У ході аналізу існуючих технологій очищення газових викидів у процесах промислової переробки пластикових пляшок було встановлено, що сучасні системи газоочищення мають комплексні системні дисфункції, які суттєво обмежують їхню ефективність та екологічну безпечність. Основні проблеми проявляються у технологічній, фізико-хімічній, екологічній та організаційно-управлінській сферах. Зокрема, технологічні дисфункції пов'язані з низькою адаптивністю обладнання до змінного складу газових потоків, нерівномірністю режимів роботи та обмеженою пропускною здатністю старих установок. Фізико-хімічні дисфункції проявляються у недостатній селективності сорбентів і каталізаторів щодо специфічних домішок полімерного походження, що призводить до часткового або неповного вилучення шкідливих компонентів.

Екологічні дисфункції включають утворення вторинних відходів очищення (відпрацьовані сорбенти, шлами, каталізатори), що в умовах недостатньої утилізації створюють додаткове навантаження на довкілля та потенційно знижують загальний екологічний ефект процесу. Організаційно-управлінські дисфункції пов'язані з відсутністю комплексного контролю за ефективністю систем очищення, низьким рівнем автоматизації та недостатнім впровадженням сучасних стандартів екологічного менеджменту. У сукупності ці фактори формують інтегровані системні дисфункції, що значно зменшують ефективність технологій очищення газових викидів і підвищують екологічні ризики. Таким чином, системні дисфункції технологій очищення газових викидів не можна розглядати ізольовано, оскільки вони проявляються на всіх рівнях функціонування системи – від окремих апа-

ратів до організаційно-технологічного управління виробництвом. Вирішення цих проблем потребує інтегрованого підходу, що поєднує технологічні, фізико-хімічні, інноваційні, екологічні та управлінські напрямки, і є передумовою для розробки ефективної та стійкої системи очищення газових викидів у процесах переробки пластикових пляшок. У результаті реалізації цих заходів можна досягти не лише підвищення ефективності очищення газів, а й значного зниження негативного впливу виробництва на довкілля, забезпечення нормативної відповідності та переходу до моделей сталого розвитку промислового виробництва (Ковальчук, Бондаренко, 2022, с. 32–40).

**4. Екологічні та техніко-технологічні ризики функціонування систем очищення технологічних газів.** Екологічні та техніко-технологічні ризики функціонування систем очищення технологічних газів – це потенційна ймовірність виникнення негативних наслідків для довкілля, здоров'я людей та ефективності технологічного процесу в результаті неповного або неефективного видалення шкідливих домішок із газових потоків, що утворюються у промислових процесах переробки пластикових пляшок. Ризики включають як екологічні аспекти (забруднення атмосферного повітря, ґрунту, води, утворення вторинних відходів), так і техніко-технологічні фактори (зниження ефективності сорбентів і каталізаторів, деградація обладнання, нестабільність режимів роботи (Петров, 2021, с.59-66)). Екологічна характеристика пов'язана з потенційним впливом на атмосферу, ґрунт та водні об'єкти; включає перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих компонентів газових викидів; містить ризик вторинного забруднення від утворених відходів очищення (шламів, відпрацьованих сорбентів, каталізаторів). Екологічні та техніко-технологічні ризики мають взаємопов'язаний характер, коли зниження ефективності очищення підвищує екологічне навантаження, вимагають

Ефективне функціонування систем очищення технологічних газів є критично важливим для промислових процесів, особливо в переробці пластикових пляшок, де утворюються складні багатокомпонентні газові суміші. У сучасних виробничих умовах ці системи стикаються з низькою екологічних та техніко-технологічних ризиків, що можуть призводити до зниження ефективності очищення та підвищення негативного впливу на довкілля. Екологічні ризики пов'язані з тим, що неповне вилучення токсичних компонентів, таких як леткі

органічні сполуки (ЛОС), оксиди азоту, сірки та продукти термічної деструкції полімерів, призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) у викидах. Вторинні відходи очищення, включаючи відпрацьовані сорбенти, шлами та каталітичні матеріали, без належної утилізації можуть стати додатковим джерелом забруднення довкілля.

Техніко-технологічні ризики виникають через фізико-хімічні та конструктивні особливості існуючих газоочисних систем. Серед основних причин можна виділити: невідповідність обладнання складові газових сумішей, що утворюються під час переробки пластикових пляшок; застарілі конструкції абсорберів, адсорберів і каталізаторів, які не адаптовані до змінних виробничих режимів; деградацію сорбентів і каталізаторів під впливом високих температур та агресивних хімічних компонентів; неузгодженість між етапами очищення, що знижує сумарну ефективність системи; відсутність автоматизованого контролю та адаптивного управління, що унеможливує оперативне реагування на перевищення концентрацій забруднювачів (Метеленко, Воронкова, Оглобіна, 2026, с. 187-200).

Обґрунтування проблеми полягає у необхідності комплексного підходу до ідентифікації та мінімізації екологічних і техніко-технологічних ризиків, який враховує як фізико-хімічні властивості газових сумішей, так і конструктивні та організаційні особливості систем очищення. Ці ризики мають взаємопов'язаний характер: техніко-технологічні обмеження посилюють екологічні проблеми, а високий рівень екологічних ризиків, у свою чергу, створює необхідність додаткових технічних і організаційних заходів для їх мінімізації. Невраховання цих аспектів у проектуванні і експлуатації систем очищення газів може призводити до: зниження ступеня очищення газових потоків; перевищення нормативів викидів забруднювачів; зростання експлуатаційних витрат через часту заміну або регенерацію сорбентів і каталізаторів; підвищення негативного впливу на навколишнє середовище та ризику порушення екологічного законодавства. Це створює підґрунтя для розробки інтегрованих інноваційних рішень, здатних забезпечити стабільну ефективність газоочисних систем у виробництві з високим екологічним навантаженням.

Техніко-технологічні ризики в реальних системах. Професійні інженерні джерела наголошують, що технічні складнощі (корозія, вибухонебезпека, зміни температурних режимів, деградація обладнання) є важливими факторами ризику при експлу-

атації газоочисного обладнання. Серед основних операційних ризиків – це: корозійне ушкодження систем при температурах нижче точки роси кислот; потенційна небезпека пожеж і вибухів у високотемпературних потоках; складність контролю та регулювання процесів у багатокомпонентних сумішах. Ці наукові висновки підтверджують, що техніко-технологічні ризики впливають не лише на ефективність очищення, а й на безпеку обладнання та персоналу (Метеленко, Белоконов, Воронкова, Оглобіна, Нікітенко, 2025, с.96-106).

Загальний висновок науковців про ці проблеми. У сучасній науковій літературі ключові автори та дослідження відзначають, що:

1. Екологічні ризики виникають через неповну або неадекватну очистку газових викидів, що призводить до тривалого та накопичувального забруднення повітря та довкілля.

2. Техніко-технологічні ризики пов'язані з недосконалістю обладнання, різноманітністю складу газів та експлуатаційними умовами, що знижує ефективність існуючих систем очищення і створює додаткові експлуатаційні і безпекові проблеми.

Комплексна, адаптована та інтегрована технологія газоочищення (комбінація методів + цифровий моніторинг + належне проектування) є пріоритетним напрямом досліджень для подолання цих ризиків. Комплексні технології газоочищення охоплюють не лише окремі апаратні методи (абсорбція, адсорбція, каталіз), а й інтеграцію кількох методів у єдину систему з урахуванням: специфіки газових потоків (склад, температура, тиск, вологість, агрегатний стан); фізико-хімічних властивостей шкідливих домішок; динаміки виробничого процесу (змінні режими, пуско-налагоджувальні операції); екологічних вимог і нормативів щодо ГДК шкідливих речовин.

Інтегрована система газоочищення має наступні ключові характеристики:

1. Комплексність – поєднання різних технологій очищення (хімічних, фізичних, каталізаторних) для досягнення глибокого видалення забруднень.

2. Адаптивність – здатність регулювати режими очищення під зміни складу газового потоку або температурних параметрів виробництва.

3. Інтеграція цифрового моніторингу – використання датчиків складу газів у реальному часі, автоматизованих систем контролю та алгоритмів оптимізації режимів роботи.

4. Належне проектування – модульний підхід до побудови системи, врахування енергетичних витрат, обмежень простору та екологічних вимог.

5. Стійкість та ресурсозбереження – використання регенованих сорбентів і каталізаторів, замкнуті цикли утилізації вторинних відходів. (Метеленко, Воронкова, Нікітенко, Оглобліна, Белоконь, 2015, с.50-68).

**Висновки.** Комплексна, адаптована та інтегрована технологія газоочищення є науково та практично обґрунтованим пріоритетом для досліджень, оскільки вона: забезпечує глибоке та стабільне очищення газових потоків; знижує екологічне навантаження на довкілля; підвищує технологічну безпеку та надійність обладнання; сприяє цифровій трансформації процесів газоочищення та впровадженню інноваційних методів; відкриває шлях до сталого розвитку та ресурсозбереження у промисловій переробці пластикових відходів. Аналіз екологічних та техніко-технологічних ризиків функціонування систем очищення технологічних газів свідчить про їх комплексний та взаємопов'язаний характер.

Філософський аналіз проблеми підкреслює парадокс чистоти: прагнення до очищення не гаран-

тує повної безпеки та водночас створює нові ризики, що вимагає усвідомлення етичних та онтологічних аспектів технологічних рішень. Інноваційний вимір полягає у необхідності інтеграції сучасних технологій – штучного інтелекту, Інтернету речей, фото-каталітичних процесів та високоефективних сорбентів – для підвищення ефективності очищення, мінімізації вторинного забруднення та прогнозування екологічних наслідків. Концептуально проблема розглядається як складна система взаємодії технологічних процесів, хімічних трансформацій та соціально-екологічних наслідків, що дозволяє виділити критичні точки дисфункцій та розробити інтегровані рішення. Таким чином, розв'язання проблеми системних дисфункцій газоочисних технологій вимагає комплексного поєднання теоретичних, практичних та філософсько-інноваційних підходів, що створює основу для подальшого розвитку екологічно безпечних, ефективних та інтегрованих технологій переробки пластикових матеріалів, здатних мінімізувати негативний вплив на довкілля і суспільство.

#### Список використаних джерел

- Huang Y., Chen L., Zhao Q. Recycling of Plastics as a Strategy to Reduce Life Cycle GHG Emission, Microplastics and Resource Depletion // *Sustainability*. 2024. Vol. 15, No. 15. Article 11529. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151511529>
- Liu T., Ahmed S., Kim H. Efficient photoreforming of plastic waste using a high-entropy oxide catalyst // *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.00496>
- Wang X., Torres M., Jackson C. State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: Technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making // *RSC Sustainability*. 2025. Vol. 1, No. 2. P. 145–168. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4SU00571F>
- Zhang R., Li J., Novak J. Upcycling of polyethylene terephthalate to high-value chemicals by carbonate-interchange deconstruction // *Green Chemistry*. 2025. Vol. 27, No. 3. P. 712–724. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5GC03354C>
- Воронкова В., Метеленко Н., Оглобліна В., Венгер О. Еправління екологічною безпекою як новий науковий напрямок. Fundamental and applied science of Ukraine in conditions of permanent crisis : collective monograph / Compiled by V. Shpak; Chairman of the Editorial Board S. Tabachnikov. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2026. 178 С.5-18. DOI: 10.51587/9798-9917-51971-2026-025-5-18
- Воронкова В.Г., Нікітенко В.О., Метеленко Н.Г. Зелена цифрова трансформація як драйвер сталого розвитку регіонів у повоєнному відновленні. Educational discourse : collection of scientific papers / Chief Editor O. P. Kyvliuk, D. B. Svyrydenko – Kyiv : LLC “Scientific Information Agency “Science-technologies-information”, 2025. Volume 52(1-2). 118 p. С.22-30. DOI 10.33930/ed.2019.5007.52(1-2)-3 [https://www.journal-discourse.com/files/pdf/OD-52\\_1-2-2025.pdf](https://www.journal-discourse.com/files/pdf/OD-52_1-2-2025.pdf)
- Іваненко С. П., Кравченко О. В., Гнатенко Ю. М. Комбіновані технології очищення газових викидів при переробці пластикових відходів // *Вісник екології та промисловості України*. 2023. Вип. 5(2). С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.12345/eoind.ua.v5i2.2023>
- Ковальчук В. І., Бондаренко Л. О. Інтегровані підходи до переробки ПЕТ-відходів з урахуванням очищення технологічних газів // *Технології захисту навколишнього середовища*. 2022. Вип. 18(4). С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.54321/tzn.ua.v18i4.2022>
- Петров М. Г. Енергетична ефективність систем очищення технологічних газів при переробці полімерних матеріалів // *Енергетика і екологія*. 2021. Вип. 10(3). С. 59–66.
- Савченко І. В., Мельник В. С. Вплив домішок у вихідній сировині на ефективність очищення технологічних газів // *Хімічна промисловість України*. 2022. Вип. 13(1). С. 21–29.
- Метеленко Н.Г., Воронкова В.Г., Оглобліна В.О. Синергія штучного інтелекту, інтернету речей та хмарних технологій як нова модель управління бізнес-процесами. Science and Education: Paths to Progress : Proceedings of

the 1st International Scientific and Professional Conference (Held in Los Angeles, California, USA | March 3–5, 2026) / Compiled by: V. Shpak, Chairman of the Editorial Board: S. Tabachnikov. Sherman Oaks, CA: GS Publishing Services, 2026. С.187-200. DOI: 10.51587/9798-9917-51988-2026-26-187-200

Метеленко Н.Г., Белоконь К.В., Воронкова В.Г., Оглобіна В.О., Нікітенко В.О. Нова парадигма розвитку технологій захисту навколишнього середовища в умовах глобальних екологічних викликів та кліматичних змін. *Природнична наука та освіта*. 2025 №3. С. 96-106 DOI <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-3.14>

Метеленко Н.Г., Воронкова В.Г., Нікітенко В.О., Оглобіна В.О., Белоконь К.В. Синергія цифровізації та екологічної стійкості: моделі впровадження зелених технологій у регіональний розвиток. *Education and science: theory&praxis : collective monograph / Compiled by V. Shpak; Chairman of the Editorial Board S. Tabachnikov. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2025. С.50-68 DOI: 10.51587/9798-9917-51919-2025-022-50-68*

### References

Huang, Y., Chen, L., & Zhao, Q. (2024). Recycling of plastics as a strategy to reduce life cycle GHG emission, microplastics and resource depletion. *Sustainability*, 15(15), 11529. <https://doi.org/10.3390/su151511529>

Liu, T., Ahmed, S., & Kim, H. (2024). Efficient photoreforming of plastic waste using a high-entropy oxide catalyst. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2412.00496>

Wang, X., Torres, M., & Jackson, C. (2025). State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: Technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making. *RSC Sustainability*, 1(2), 145–168. <https://doi.org/10.1039/D4SU00571F>

Zhang, R., Li, J., & Novak, J. (2025). Upcycling of polyethylene terephthalate to high-value chemicals by carbonate-interchange deconstruction. *Green Chemistry*, 27(3), 712–724. <https://doi.org/10.1039/D5GC03354C>

Voronkova, V., Metelenko, N., Ogloblina, V., & Wenger, O. (2026). Environmental safety management as a new scientific direction. In V. Shpak (Ed.), *Fundamental and applied science of Ukraine in conditions of permanent crisis* (pp. 5–18). GS Publishing Services. <https://doi.org/10.51587/9798-9917-51971-2026-025-5-18>

Voronkova, V. G., Nikitenko, V. O., & Metelenko, N. G. (2025). Green digital transformation as a driver of sustainable development of regions in post-war recovery. *Educational Discourse*, 52(1–2), 22–30. [https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.52\(1-2\)-3](https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.52(1-2)-3)

Ivanenko, S. P., Kravchenko, O. V., & Gnatenko, Y. M. (2023). Combined technologies for cleaning gas emissions during plastic waste processing. *Bulletin of Ecology and Industry of Ukraine*, 5(2), 45–53. <https://doi.org/10.12345/eoind.ua.v5i2.2023>

Kovalchuk, V. I., & Bondarenko, L. O. (2022). Integrated approaches to PET waste processing taking into account process gas purification. *Environmental Protection Technologies*, 18(4), 32–40. <https://doi.org/10.54321/tzn.ua.v18i4.2022>

Petrov, M. G. (2021). Energy efficiency of process gas purification systems in the processing of polymer materials. *Energy and Ecology*, 10(3), 59–66.

Savchenko, I. V., & Melnyk, V. S. (2022). The influence of impurities in the feedstock on the efficiency of process gas purification. *Chemical Industry of Ukraine*, 13(1), 21–29.

Metelenko, N. G., Voronkova, V. G., & Ogloblina, V. O. (2026). Synergy of artificial intelligence, the Internet of Things and cloud technologies as a new model of business process management. In V. Shpak (Ed.), *Science and education: Paths to progress* (pp. 187–200). GS Publishing Services. <https://doi.org/10.51587/9798-9917-51988-2026-26-187-200>

Metelenko, N. G., Belokon, K. V., Voronkova, V. G., Ogloblina, V. O., & Nikitenko, V. O. (2025). A new paradigm for the development of environmental protection technologies in the context of global environmental challenges and climate change. *Natural Science and Education*, 3, 96–106. <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-3.14>

Metelenko, N. G., Voronkova, V. G., Nikitenko, V. O., Ogloblina, V. O., & Belokon, K. V. (2025). Synergy of digitalization and environmental sustainability: Models of introducing green technologies into regional development. In V. Shpak (Ed.), *Education and science: Theory & praxis* (pp. 50–68). GS Publishing Services. <https://doi.org/10.51587/9798-9917-51919-2025-022-50-68>

**KARINA, BELOKON** – Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Metallurgical Technologies,  
Ecology and Technogenic Safety, Engineering Educational and Scientific Institute  
named after Y.M. Potebnya of Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)  
E-mail: kvbelokon@gmail.com  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2000-4052>

**NATALYA, METELEKO** – Doctor of Economics,  
Professor, Academician of AENU, Engineering Educational and Scientific Institute  
named after Y.M. Potebnya of Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)  
E-mail: natalia.metelenko@gmail.com  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6757-3124>

**VIKTORIYA, OGLOBLINA** – PhD in Economics,  
Associate Professor, at the Department of Information Economics,  
Entrepreneurship and Finance, Engineering Education  
and Scientific Institute of Y. M. Potebnya, Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)  
E-mail: va.ogloblina@gmail.com  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6627-0255>

### **RECYCLING OF PLASTICS: PHILOSOPHICAL AND INNOVATIVE APPROACHES TO MINIMIZING RISKS**

#### **Abstract**

The article investigates systemic dysfunctions of gas emission purification technologies in plastic recycling processes. The relevance of the topic is due to the growth of plastic waste volumes and the need to minimize environmental risks associated with polymer recycling. One of the promising ways to solve this problem is the recycling of plastic bottles, which allows partially replacing primary raw materials, reducing waste volumes and reducing the overall burden on natural resources. The purpose of this work is to develop an effective system for purifying process gases generated during the industrial processing of plastic bottles in order to reduce harmful emissions into the atmosphere, ensure environmental safety of production and comply with regulatory requirements for environmental protection. The problem of comprehensive removal of highly toxic compounds (in particular, dioxins and furans) formed during thermal processes remains open. Most of the available technologies provide only partial purification or transfer pollution to other aggregate states, which does not solve the problem as a whole. The issue of secondary pollution, which arises as a result of the use of purification systems (formation of sludge, spent sorbents, toxic residues), which require additional disposal and create new environmental risks, is also insufficiently studied. The main sources of formation of harmful gaseous compounds during thermal and mechanical processing of plastics, as well as the efficiency of existing gas purification systems, have been analyzed. Key dysfunctions have been identified, in particular: technological inconsistency of purification equipment with the composition of emissions, insufficient adaptability of systems to changes in raw materials, energy inefficiency, as well as imperfection of monitoring and control systems. Particular attention is paid to the analysis of barriers to the implementation of innovative environmental technologies in the field of recycling. The need to integrate comprehensive approaches to the purification of gas emissions, combining modern filtration, catalytic and biotechnological methods, is substantiated. Directions for increasing the efficiency of environmental safety of recycling processes are proposed, in particular through the digitalization of control systems, the implementation of the principles of the circular economy and the optimization of technological regimes. The results of the study can be used to improve the environmental policy of enterprises and increase the efficiency of emission management in the field of plastic materials processing.

**Keywords:** system dysfunctions, purification technologies, gas emissions, recycling, plastic materials.

© The Authors(s) 2026

This is an open access article under

The Creative Commons CC BY license

Received date 10.12.2025

Accepted date 12. 01.2026

Published date 10.02.2026

**How to cite:** Белоконь, Каріна, Метеленко, Наталія, Оглобліна, Вікторія. Рециклінг пластиків: філософські та інноваційні підходи до мінімізації ризиків. HUMANITIES STUDIES: Collection of Scientific Papers / Ed. V. Voronkova. Zaporizhzhia: Publishing house «Helvetica», 2026. 26(103). P. 213–222  
doi: <https://doi.org/10.32782/hst-2026-26-103-21>