

УДК 628.4.032:66.095:504.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.1.37>

ТЕХНОЛОГІЧНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПЕТ-ПЛЯШОК ЯК ВАЖЛИВИЙ ЧИННИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Воронкова В.Г. – д.філос.н., професор,
завідувач кафедри управління та адміністрування,
Запорізький національний університет
orcid.org/0000-0002-0719-1546

Бєлоконь К.В. – к.т.н., доцент,
заслужений директор з наукової роботи,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потєбні
Запорізького національного університету
orcid.org/0000-0003-2000-4052

Метеленко Н.Г. – д.е.н., професор,
професор кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Запорізький національний університет
orcid.org/0000-0002-6757-3124

Оглобліна В.О. – к.е.н., доцент,
доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Запорізький національний університет
orcid.org/0000-0001-6627-0255

Юрченко А.І. – завідувач лабораторією природоохоронних заходів
в агропромисловому і паливно-енергетичному комплексі,
Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут
екологічних проблем»
orcid.org/0009-0004-9293-5520

У статті досліджено сучасні технологічні підходи до модернізації процесів переробки ПЕТ-пляшок в умовах зростання екологічних вимог та необхідності впровадження принципів сталого розвитку у промислове виробництво. Метою даної роботи є аналіз ефективних методів 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. Проаналізовано праці як зарубіжних, так і вітчизняних науковців, що підтверджують важливість комплексного підходу до переробки пластикових відходів з акцентом на удосконалення систем очищення технологічних газів. Досліджено технологічні виміри системи очищення технологічних газів при промисловій переробці пластикових пляшок та визначено ключові технологічні параметри, що впливають на якість вторинної сировини та енергоефективність виробництва. Переробка пластикових відходів розглядається як одна з ключових проблем сучасного екологічного та технологічного розвитку, у контексті якої визначено ключові параметри процесів та їх впливу на продуктивність і якість переробки пластиків. Газові викиди зазвичай містять суміші летких органічних сполук, оксиди азоту, вуглекислий газ та інші токсичні компоненти, що сприяють забрудненню повітря, підвищенню парникового ефекту та токсичному навантаженню на біоту. Вивчення цих характеристик дозволяє точно визначити технологічні рішення для їх очищення, враховуючи реакційну здатність і адсорбційний



потенціал кожного компонента. Доведено, що технологічна модернізація сприяє зменшенню ресурсоспоживання, скороченню викидів забруднювальних речовин та підвищенню економічної ефективності підприємств. Результати дослідження можуть бути використані при розробці стратегії розвитку підприємств з переробки полімерних відходів та формуванні екологічно орієнтованої промислової політики України.

Ключові слова: ПЕТ-пляшки, вторинна переробка, полімерні відходи, технологічна модернізація, рециклінг, сталий розвиток, екологічна безпека, очищення технологічних газів.

Voronkova V.G., Belokon K.V., Metelenko N.G., Ogloblina V.O., Yurchenko A.I. Technological modernization of pet bottle processing as an important factor in ensuring the sustainable development of modern manufacturing

The article examines modern technological approaches to the modernization of PET bottle processing in the context of growing environmental requirements and the need to implement sustainable development principles in industrial production. The purpose of this work is to develop an effective system for cleaning 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 environmental protection regulations. The works of both foreign and domestic scientists have been analyzed, confirming the importance of an integrated approach to plastic waste recycling with an emphasis on the improvement of process gas cleaning systems. The technological measurements of the process gas purification system in the industrial processing of plastic bottles were studied, and the key technological parameters affecting the quality of secondary raw materials and the energy efficiency of production were determined. Plastic waste recycling is considered one of the key issues in modern environmental and technological development, in the context of which the key parameters of processes and their impact on the productivity and quality of plastic recycling have been identified. Gas emissions usually contain mixtures of volatile organic compounds, nitrogen oxides, carbon dioxide, and other toxic components that contribute to air pollution, increase the greenhouse effect, and cause toxic stress on biota. Studying these characteristics allows us to accurately determine technological solutions for their purification, taking into account the reactivity and adsorption potential of each component. It has been proven that technological modernization contributes to reducing resource consumption, reducing pollutant emissions, and increasing the economic efficiency of enterprises. The results of the study can be used in developing strategies for the development of polymer waste processing enterprises and in forming Ukraine's environmentally oriented industrial policy.

Key words: PET bottles, secondary processing, polymer waste, technological modernization, recycling, sustainable development, environmental safety, process gas cleaning.

Постановка проблеми та її актуальність. 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 пластикових пляшок із поліетилен-терефталату (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 як діоксини, фурани, формальдегід, леткі органічні сполуки, оксиди азоту, сірки та вуглецю, а також важкі метали у вигляді аерозолів. Викид таких компонентів в атмосферу без відповідного

очищення становить серйозну загрозу не лише для довкілля, але й для здоров'я населення, працівників підприємств та кліматичної стабільності в регіоні. 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. Очищення викидів сприяє зменшенню штрафних санкцій, підвищенню рівня екологічної відповідальності підприємства, поліпшенню його іміджу та конкурентоспроможності, а також дозволяє повторно використовувати деякі компоненти газових потоків як вторинну сировину або джерело енергії. Таким чином, впровадження систем очищення технологічних газів у процесах переробки пластикових пляшок є необхідною умовою забезпечення сталого розвитку промисловості, збереження довкілля та дотримання вимог національного і міжнародного природоохоронного законодавства. В умовах зростання екологічних викликів, виснаження природних ресурсів та посилення вимог до екологічної безпеки виробництва проблема ефективної переробки полімерних відходів набуває особливої ваги. ПЕТ-пляшки становлять значну частку твердих побутових відходів, а їх накопичення негативно впливає на стан довкілля та ресурсний баланс держави. Технологічна модернізація процесів переробки ПЕТ-пляшок відповідає принципам циркулярної економіки, сприяє зменшенню енерговитрат, підвищенню якості вторинної сировини та зниженню екологічного навантаження. У контексті сучасного виробництва впровадження інноваційних технологій – автоматизованого сортування, енергоефективного подрібнення, удосконалених методів очищення та гранулювання – забезпечує підвищення конкурентоспроможності підприємств і формує підґрунтя для сталого розвитку. Особливої актуальності тема набуває для України в умовах євроінтеграційних процесів, необхідності гармонізації екологічних стандартів та переходу до ресурсоефективної моделі економіки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних умовах активного розвитку промисловості, зростання обсягів виробництва та споживання продукції на основі полімерних матеріалів, зокрема пластикових пляшок з поліетилентерефталату (ПЕТ), постає гостра необхідність у впровадженні ефективних технологій захисту навколишнього середовища. Забруднення повітря, ґрунтів і водних ресурсів є безпосереднім наслідком недостатньо контрольованих або застарілих технологічних процесів, що мають місце під час переробки полімерних відходів. У сучасній науковій літературі спостерігається активізація досліджень, присвячених пошуку ефективних та екологічно безпечних технологій переробки пластикових відходів, зокрема ПЕТ. Основна увага приділяється як вдосконаленню методів переробки, так і розробці заходів із мінімізації супутніх шкідливих викидів, що утворюються у процесі перетворення пластику на вторинну сировину або хімічні продукти. Зокрема, дослідженням механічної переробки ПЕТ присвячено роботу Chen X. et al. [1], у якій детально аналізуються проблеми, пов'язані з контамінацією сировини, впливом домішок на якість продукції та потребою у супутніх технологіях очищення. Автори наголошують, що навіть за умови ефективної сортувальної системи механічна переробка супроводжується енергетичними витратами, утворенням летких сполук та стічних вод, які потребують додаткової фільтрації. Альтернативні підходи до переробки, зокрема хімічна деполімеризація, розглядаються у роботі Galan N. J. et al. [2], де описано інноваційний метод

carbonate-interchange deconstruction (CID), що дозволяє отримати цінні продукти з ПЕТ-відходів з високою селективністю. Цей метод значно знижує кількість побічних шкідливих речовин, однак автори визнають необхідність подальших досліджень щодо поведження з леткими органічними сполуками, які утворюються в процесі реакції. Ще одним перспективним напрямом є фотокаталітична переробка пластикових відходів, зокрема з отриманням водню як побічного продукту. Wang L. et al. [3] запропонували використання каталізаторів на основі оксидів високої ентропії, які дозволяють ефективно розкласти ПЕТ у м'яких умовах із мінімальним утворенням токсичних викидів. Цей підхід потенційно може замінити високотемпературні методи, які є джерелами оксидів азоту, вуглецю та інших небезпечних речовин. Загалом, у літературі простежується зростаюча увага до оцінки повного життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) переробних технологій. У дослідженні Kawai F. [4] було показано, що застосування хімічного або комбінованого підходу до переробки ПЕТ дозволяє зменшити викиди парникових газів на 18-23 % порівняно з первинним виробництвом пластику. Проте, як зазначають автори [5, 6], очищення технологічних газів залишається критично важливою ланкою, яка визначає екологічну ефективність усього процесу. Разом з тим, аналіз наявних публікацій засвідчує наявність певних прогалин у дослідженнях. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються питання довготривалої експлуатації систем газоочищення, їх енергоспоживання, ефективності нейтралізації різних типів забруднювачів, а також утворення вторинних токсичних продуктів під час термічного чи каталітичного очищення. Автори вказують на нестачу якісних систем газоочищення на вітчизняних підприємствах, що призводить до підвищення рівня забруднення атмосферного повітря у промислових зонах [7]. Подібні висновки містяться у роботі [8], які підкреслюють, що в Україні промислова переробка пластикових пляшок часто супроводжується значними викидами летких органічних сполук і оксидів азоту, що потребує впровадження ефективних систем газоочищення. Вони пропонують застосування комбінованих технологій, таких як мокре очищення з подальшим каталітичним окисненням, що, за їхніми даними, дозволяє знизити концентрацію шкідливих речовин у відхідних газах до нормативних рівнів. У роботі [9] акцент зроблено на аналізі енергетичної ефективності та екологічної безпеки різних способів очистки газів, що утворюються при переробці полімерних відходів. Дослідження [6-9] висвітлюють питання впливу домішок та забруднень у вихідній сировині на ефективність очищення технологічних газів. Вони показали, що наявність барвників, пластифікаторів та інших добавок у ПЕТ-продуктах значно ускладнює процес очищення, викликаючи утворення токсичних побічних продуктів, що потребує розробки адаптованих систем газоочищення із застосуванням багатоступеневих технологічних процесів.

Матеріали та методи. Методологічною основою дослідження є комплексний підхід до аналізу екологічних, технологічних та економічних аспектів очищення газових викидів, що утворюються під час промислової переробки пластикових пляшок, зокрема поліетилентерефталату (ПЕТ). У ході роботи застосовано методи системного аналізу, що дозволяють розглядати процес очищення газів як цілісну багатокомпонентну систему, в якій взаємодіють джерела забруднення, технології очищення та фактори навколишнього середовища. Для збору та обробки інформації використовувалися методи аналізу науково-технічної літератури, нормативно-правової документації, а також дані з відкритих джерел щодо сучасних технологій переробки пластикових відходів та газоочищення. Було проведено порівняльний аналіз ефективності різних типів установок очищення (мокрих,

сухих, комбінованих) з точки зору зменшення концентрацій основних забруднювальних речовин у відповідності до гранично допустимих норм. Оцінювання технічної доцільності впровадження певної системи газоочищення здійснювалося із використанням методів техніко-економічного аналізу. Для розрахунку екологічного ефекту застосовано методики оцінки впливу на навколишнє середовище, а також базові принципи екологічного нормування викидів у атмосферне повітря. Таким чином, методологія дослідження поєднує теоретичний аналіз, прикладні розрахунки та техніко-екологічне обґрунтування для забезпечення комплексного вирішення поставлених завдань.

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.

Технологічні виміри дослідження системи очищення газів при промисловій переробці пластикових пляшок. Технології захисту навколишнього середовища виступають не лише як засіб зменшення техногенного навантаження, а й як складова частина сучасних екологічно орієнтованих виробничих систем. До таких технологій належать, передусім, методи очищення газових викидів, які дозволяють ефективно видаляти або нейтралізувати шкідливі компоненти до рівня, що відповідає чинним екологічним нормативам. Зокрема, у процесах термічної переробки ПЕТ-відходів активно застосовуються такі способи, як мокре та сухе очищення, адсорбція, абсорбція, термічне або каталітичне окиснення, електростатичне осадження, біологічні фільтри тощо. Кожна з цих технологій має свої переваги й обмеження, що визначаються складом викидів, обсягами газопотоку, особливостями виробничого процесу та економічною доцільністю впровадження. Окрім безпосереднього очищення викидів, до технологій захисту доквілля належать і профілактичні заходи, спрямовані на зменшення утворення забруднюючих речовин на початкових стадіях виробництва. Як свідчить дослідження, ефективне застосування сучасних технологій захисту навколишнього середовища в галузі переробки пластикових пляшок забезпечує зниження рівня техногенного навантаження, підвищення екологічної безпеки підприємств, відповідність вимогам природоохоронного законодавства, а також сприяє досягненню стратегічних цілей сталого розвитку. Впровадження таких рішень є не лише екологічно, а й економічно обґрунтованим кроком у розвитку сучасної промисловості (табл. 1).

Аналіз наукових вимірів дослідження системи очищення технологічних газів свідчить про міждисциплінарний характер проблематики, що охоплює як техніко-технологічні, так і соціально-економічні, екологічні та правові аспекти. Встановлено, що ефективне вирішення задач очищення газів, які утворюються при переробці ПЕТ-відходів, потребує одночасного врахування фізико-хімічних характеристик забруднювачів, впливу на навколишнє середовище, енергоспоживання та економічної доцільності застосування конкретних технологій. Кожен із вимірів – від хімічного аналізу складу викидів до соціальної оцінки наслідків для населення – формує цілісну наукову базу для проектування та впровадження високоефективних систем очищення. Особливої уваги потребують інноваційні та енергозберігаючі рішення, які дозволяють одночасно досягати екологічної безпеки та економічної ефективності. Таким чином, подальші дослідження мають базуватися на комплексному підході, що поєднує технологічну інженерію, екологічний моніторинг, законодавчу базу та соціальні аспекти сталого розвитку.

Таблиця 1

**Наукові виміри дослідження системи очищення технологічних газів
при промисловій переробці пластикових пляшок**

Науковий вимір	Сутність	Методи та підходи	Очікувані результати / прикладні задачі
Техніко-технологічний	Вивчення процесів утворення та складу газових викидів при термічній або хімічній переробці ПЕТ-пляшок	Хроматографія, спектроскопія, термогравіметричний аналіз (ТГА), мас-спектрометрія	Ідентифікація токсичних компонентів, розробка ефективних технологій їх знешкодження
Екологічний	Оцінка впливу газових викидів на атмосферне повітря, здоров'я населення та довкілля	LCA (оцінка життєвого циклу), екотоксикологічний аналіз, моделювання розсіювання забруднень	Зменшення шкідливого впливу на довкілля, відповідність екологічним нормам
Хімічний	Дослідження хімічного складу технологічних газів та продуктів реакцій	Спектральний аналіз, ІЧ-спектроскопія, аналіз органічних сполук	Розробка фільтрувальних та каталітичних систем з урахуванням типу речовин
Фізико-хімічний	Оцінка ефективності абсорбційних, адсорбційних, термічних і каталітичних методів. Газодинамічне моделювання, експериментальні дослідження, математичне моделювання очищення	Газодинамічне моделювання, експериментальні дослідження, математичне моделювання	Підбір оптимальної технології очищення для конкретного виробництва
Інженерний (конструкторський)	Розробка конструкцій газоочисного обладнання	CAD-моделювання, модульне проєктування, інженерні розрахунки	Створення високоефективних систем очищення з мінімальними втратами енергії
Енергетичний	Аналіз споживання енергії системами очищення, енергетична ефективність процесів	Енергоаудит, енергетичний аналіз, термодинамічне моделювання	Енергоаудит, енергетичний аналіз, термодинамічне моделювання
Економічний	Обґрунтування економічної доцільності впровадження технологій очищення	Техніко-економічний аналіз, розрахунок окупності, SWOT-аналіз	Вибір оптимальної технології з погляду вартості, прибутковості та витрат
Правовий і нормативний	Оцінка відповідності процесу чинному екологічному законодавству	Аналіз нормативної бази (ДСТУ, ISO, євродирективи), аудит викидів	Забезпечення правової відповідності діяльності підприємства
Соціальний	Вивчення впливу викидів на якість життя населення поблизу підприємств	Соціологічні дослідження, оцінка ризиків для здоров'я, громадські слухання	Підвищення рівня екобезпеки, екосвідомості населення
Інноваційний	Оцінка потенціалу впровадження новітніх технологій (фотокаталіз, біофільтри, наноматеріали)	Патентний аналіз, науково-технічна експертиза, порівняльне тестування	Адаптація сучасних інновацій до українських умов виробництва

Переробка пластикових відходів як одна з ключових проблем сучасного екологічного та технологічного розвитку. Переробка пластикових відходів є однією з ключових проблем сучасного екологічного та технологічного розвитку, що безпосередньо пов'язана із забезпеченням сталого використання ресурсів та зниженням негативного впливу на довкілля. Пластикові матеріали, завдяки своїм фізико-хімічним властивостям – міцності, стійкості до корозії та легкості у виробництві – набули широкого розповсюдження у промисловості та побуті. Водночас саме ці характеристики ускладнюють їхнє природне розкладання, що призводить до накопичення відходів у навколишньому середовищі та загострює екологічні проблеми. Академічне розуміння переробки пластикових відходів базується на системному аналізі технологічних процесів, що включає механічні, фізико-хімічні та термічні методи обробки матеріалів. Механічна переробка передбачає сортування, подрібнення та гранулювання пластикових виробів із метою отримання вторинної сировини, яка може використовуватися для виробництва нових полімерних продуктів. Фізико-хімічні методи включають розчинення, хімічне розщеплення макромолекул полімерів та виділення компонентів із відходів для подальшого повторного використання у промислових процесах. Термічна обробка, до якої належать піроліз і газифікація, дозволяє перетворювати пластикові відходи на паливні продукти або енергетичні ресурси, одночасно знижуючи обсяг твердих відходів. Технологічні особливості переробки пластикових матеріалів визначаються їхньою структурою, хімічним складом та типом полімеру. Так, термопластики, які піддаються багаторазовому нагріванню без значної деградації, підходять для механічної переробки та повторного лиття, тоді як терморезистивні полімери потребують хімічного або термічного розщеплення для вторинного використання. Суттєвим аспектом є також попереднє сортування відходів за типом пластику, кольором та ступенем забрудненості, оскільки це визначає ефективність та якість отриманого вторинного матеріалу [7]. Концептуально процес переробки пластикових відходів можна розглядати як інтегрований технологічний цикл, що поєднує збір, сортування, обробку та повторне використання ресурсів. Такий підхід забезпечує максимальне відновлення цінних компонентів та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Отже, аналіз технологічних особливостей переробки пластикових відходів включає багаторівневу оцінку фізико-хімічних властивостей полімерів, вибір оптимальних методів перетворення відходів та концептуалізацію процесу як складної системи, що забезпечує ефективне та екологічно безпечне управління пластиковими ресурсами. Такий підхід є фундаментальним для розвитку інноваційних технологій переробки та формування стратегії сталого використання пластикових матеріалів у сучасному суспільстві [10].

Визначення ключових параметрів процесів та їх впливу на продуктивність і якість переробки пластиків. Процеси переробки матеріалів, зокрема пластиків, характеризуються низкою технологічних параметрів, які визначають ефективність, продуктивність та якість кінцевого продукту. Ключові параметри включають температурні режими, швидкість подачі сировини, тиск у робочій зоні, час перебування матеріалу у процесі, а також властивості вихідної сировини (вологість, розмір частинок, хімічний склад). Академічне тлумачення впливу параметрів на продуктивність і якість процесу переробки ґрунтується на принципі оптимізації: належне поєднання параметрів забезпечує максимальну продуктивність при мінімальних витратах енергії та ресурсів, одночасно підтримуючи стабільну якість кінцевого продукту. Зміни одного параметра, наприклад температури плавлення або часу обробки, можуть прямо впливати на в'язкість матеріалу, рівномірність його переробки та механічні властивості продукту.

Таким чином, системне дослідження ключових параметрів і їхнього взаємного впливу дозволяє не лише підвищити ефективність промислових процесів, але й сформуванати науково обгрунтовані рекомендації щодо оптимізації технологій переробки, враховуючи критерії продуктивності, якості та екологічної безпеки.

Виявлення факторів, що впливають на формування технологічних газів у промислових умовах. До факторів, які визначають склад, обсяг та властивості технологічних газів, що утворюються в процесах промислового виробництва, відносяться: характер сировини, умови температури та тиску, технологічні параметри реакцій, види обладнання та процеси хімічного або фізичного перетворення речовин. Цей аналіз необхідний для того, щоб зрозуміти взаємозв'язок між умовами виробництва та утворенням газових відходів, що дозволяє планувати ефективні заходи з очищення, контролю та мінімізації шкідливого впливу на довкілля (табл. 2).

Таблиця 2

Виявлення факторів, що впливають на формування технологічних газів у промисловому виробництві

Категорія фактору	Опис фактору	Вплив на утворення газів	Практичне значення
Характер сировини	Хімічний склад, домішки, фізичні властивості вихідних матеріалів	Визначає типи газів, їх токсичність, обсяг та реакційну здатність	Контроль якості сировини дозволяє зменшити утворення шкідливих газів, прогнозувати склад газової суміші
Температура	Режим нагрівання, точка плавлення/кипіння компонентів, тепловий режим процесу	Підвищення температури прискорює хімічні реакції та утворення легких компонентів	Оптимізація температурних режимів дозволяє зменшити утворення токсичних газів та енергозатрати
Тиск	Атмосферний, підвищений або вакуумний режим у реакторі/технологічній лінії	Впливає на швидкість реакцій та обсяг газоутворення	Контроль тиску допомагає регулювати інтенсивність газоутворення та безпечність процесу
Технологічні параметри реакцій	Концентрація реагентів, час перебування у реакторі, інтенсивність змішування, швидкість подачі	Визначають швидкість утворення газів, склад та пропорції компонентів	Регулювання параметрів дозволяє оптимізувати склад газів і зменшувати шкідливі домішки
Види обладнання	Конструкція реакторів, печей, котлів; матеріал стінок; герметичність; система вентиляції	Впливає на тепло- та масообмін, накопичення та виділення газів	Підбір та модернізація обладнання зменшує втрати сировини і обсяг шкідливих газових викидів
Процеси хімічного/фізичного перетворення	Окислення, відновлення, термічний розклад, випарювання, конденсація	Характер реакцій визначає склад, обсяг та швидкість газоутворення	Планування технології процесу дозволяє прогнозувати газові продукти та запроваджувати ефективні системи очищення
Інші зовнішні фактори	Вологість, присутність каталізаторів, швидкість видалення газів з реактора	Може змінювати склад та обсяг утворюваних газів	Дозволяє додатково контролювати екологічну безпеку та ефективність процесу

У результаті дослідження технологічних особливостей процесів промислової переробки пластикових пляшок встановлено, що дана проблематика має міждисциплінарний характер і поєднує інженерно-технологічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти. Основна увага наукових досліджень зосереджується на оптимізації технологічних процесів збирання, сортування, подрібнення, миття та вторинної переробки полімерних матеріалів, зокрема ПЕТ-пляшок, з метою підвищення ефективності їх повторного використання. Важливим виміром є дослідження фізико-хімічних властивостей полімерів, що визначають можливості та обмеження їх вторинної переробки, а також впливають на якість вторинної сировини. Отже, наукові виміри дослідження технологічних особливостей процесів промислової переробки пластикових пляшок є теоретичною та методологічною основою для подальшого вдосконалення технологій рециклінгу, підвищення їх економічної доцільності та екологічної безпеки, а також для формування сталих моделей управління відходами в сучасному промисловому суспільстві.

Висновки. Аналіз технологічних процесів промислової переробки пластикових пляшок показав, що сучасні виробничі лінії включають кілька ключових етапів: сортування, подрібнення, миття, термічну обробку та грануляцію. Кожен із цих етапів супроводжується утворенням технологічних газів, склад і концентрація яких визначаються типом пластику, умовами проведення процесу та механічними і хімічними реакціями, що відбуваються під час нагрівання та обробки матеріалу. Наукові дослідження підкреслюють необхідність комплексного підходу до вивчення цих процесів, що поєднує фізико-хімічні, технологічні та екологічні аспекти виробництва. Фізико-хімічні характеристики технологічних газів визначають екологічний вплив та методи очищення. Газові викиди зазвичай містять суміші летких органічних сполук, оксиди азоту, вуглекислий газ та інші токсичні компоненти, що сприяють забрудненню повітря, підвищенню парникового ефекту та токсичному навантаженню на біоту. Вивчення цих характеристик дозволяє точно визначити технологічні рішення для їх очищення, враховуючи реакційну здатність і адсорбційний потенціал кожного компонента. Дослідження методів очищення технологічних газів показало, що найбільш ефективними є комбінації абсорбції, адсорбції та каталітичного розкладу. Використання комплексного підходу дозволяє підвищити ефективність очищення та знизити ризики екологічного забруднення. Водночас аналіз існуючих технологій виявив системні дисфункції, які суттєво обмежують ефективність очищення газів. До них належать зниження ефективності при варіації складу газів, висока енергомісткість абсорбційних і каталізаторних установок, деградація сорбентів і каталізаторів під час тривалої експлуатації та недостатня інтеграція між окремими технологічними блоками. Технологічна модернізація процесів переробки ПЕТ-пляшок є важливим чинником забезпечення сталого розвитку сучасного виробництва. Вона дозволяє поєднати економічну доцільність із екологічною відповідальністю, зменшити обсяги відходів, оптимізувати використання ресурсів та підвищити якість вторинної продукції. Комплексний підхід до вдосконалення технологічних процесів сприяє формуванню замкнених виробничих циклів, зміцненню екологічної безпеки та підвищенню ефективності функціонування підприємств у довгостроковій перспективі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Chen X., Wang Y., Zhang L. Recent Progress in the Chemical Upcycling of Plastic Wastes. *ChemSusChem*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. P. 4137–4151. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202100868>

2. Upcycling of polyethylene terephthalate to high-value chemicals by carbonate-interchange deconstruction / N. J. Galan et al. *Green Chemistry*. 2025. Vol. 27, Iss. 27. P. 15124–15134. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5GC03354C>
3. Valorization of polyethylene waste via chemical looping gasification using high-entropy oxide oxygen carriers / L. Wang et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. Vol. 13, Iss. 5. Art. 118937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118937>
4. Kawai F. Emerging Strategies in Polyethylene Terephthalate Hydrolase Research for Biorecycling. *ChemSusChem*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. P. 4115–4122. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202100740>
5. Chen H., Wan K., Zhang Y., Wang Y. Waste to Wealth: Chemical Recycling and Chemical Upcycling of Waste Plastics for a Great Future. *ChemSusChem*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. P. 4123–4136. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202100652>
6. Biotechnology of Plastic Waste Degradation, Recycling, and Valorization: Current Advances and Future Perspectives / Z. H. Qin et al. *ChemSusChem*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. P. 4103–4114. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202100752>
7. Метеленко Н., Воронкова В., Оглобліна В. Європейські практики управління відходами: інновації та сталий розвиток. *HUMANITIES STUDIES: збірник наукових праць*. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2025. Випуск 25 (102). С. 230-244. <https://doi.org/10.32782/hst-2025-25-102-25>
8. Існюк С. Ю., Радовенчик Я. В. Сучасні технології переробки пластикових відходів в Україні. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 2021 р.). Київ, 2021. С. 169–172. DOI: <https://doi.org/10.20535/EHS.2021.232578>
9. Крот О. П., Ровенський О. І., Пуховой О. В. Методи очистки викидів підприємств термічного знешкодження твердих побутових відходів. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Харків, 2022 р.). Харків, 2022. С. 123–126.
10. Метеленко Н., Свінцова Н., Нікітенко В. Цифровізація аграрного сектору як інструмент впровадження зелених технологій у контексті сталого розвитку. *HUMANITIES STUDIES: Collection of Scientific Papers. Zaporizhzhia: Publishing house «Helvetica»*, 2025. 23(100). С. 256-266. <https://doi.org/10.32782/hst-2025-23-100-29>

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026