

**Сергій Климович Павлюк¹, Ганна Ігорівна Харитоненко²,
Ірина Валеріївна Суха³**

¹аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції
ННІ УДХТУ Українського державного університету науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: serpik07@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>

²кандидат біологічних наук, доцент кафедри промислової фармації

Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

E-mail: anna.kharitonenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9642-5334>

³кандидат технічних наук,

доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції

ННІ УДХТУ Українського державного університету науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: irinasuha3@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5579-2047>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ, БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ВТОРИННОГО ПЕТ

У статті висвітлено сучасні підходи до перероблення вторинного поліетилентерефталату (ПЕТ) з урахуванням аспектів забезпечення якості, безпечності та екологічності кінцевої продукції. Показано важливість використання вторинного ПЕТ у контексті сталого розвитку та зменшення впливу на навколишнє середовище. Розглянуто ефективність механічних та хімічних методів очищення, а також проаналізовано токсикологічні ризики, пов'язані з міграцією хімічних сполук у харчові продукти. Узагальнено вимоги міжнародних стандартів до безпечності вторинного ПЕТ, а також наведено переваги впровадження принципів замкнутого циклу у виробництво. Визначено потенційні загрози здоров'ю людини та окреслено шляхи їх зниження на основі сучасних технологій та регуляторних норм.

Ключові слова: вторинний поліетилентерефталат (ПЕТ); перероблення пластику; механічне очищення; хімія; токсикологічна безпека; контроль міграції; стандарти якості; екологічна безпека; харчова упаковка; екологія людини.

Табл.: 5. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах виробництва питання якості, безпечності та екологізації матеріалів і продукції стають дедалі важливішими. Це зумовлено зростаючими вимогами споживачів і посиленням законодавчих норм у сфері охорони навколишнього середовища та захисту здоров'я людей. Перероблення та використання вторинного ПЕТ є прикладом поєднання економічних, технологічних та екологічних підходів для створення конкурентоспроможної та безпечної продукції.

Постановка проблеми. Забезпечення високої якості продукції на основі вторинного ПЕТ є однією з основних цілей сучасних виробників. Одним із важливих етапів у процесі переробки ПЕТ є очищення від залишкових забруднень. Сучасні технології дозволяють знижувати рівень домішок до мінімальних значень, що сприяє безпеці матеріалу для повторного використання, зокрема у харчовій промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переробка ПЕТ є ключовим елементом сталого розвитку в умовах зростаючої потреби в екологічно безпечних матеріалах. Останні дослідження показують, що механічна та хімічна переробка ПЕТ є ефективними способами зниження негативного впливу полімерних відходів на довкілля [1-4]. Однією з основних проблем, з якими стикаються виробники, є очищення вторинного ПЕТ від залишкових забруднень, таких як барвники, хімічні речовини та інші домішки, що утворюються в процесі попередньої експлуатації матеріалу. За словами авторів [5-8], використання багатоступеневих фільтраційних систем і хімічних методів очищення дозволяє знизити рівень таких забруднень до мінімальних значень, що робить матеріал безпечним для повторного використання.

Важливим аспектом є контроль за міграцією шкідливих речовин з переробленого ПЕТ в харчові продукти. За даними досліджень, які проведені Європейським агентством з безпеки харчових продуктів (EFSA, 2022), вторинний ПЕТ, що використовується для

упаковки харчових продуктів, повинен проходити ретельні перевірки на міграцію хімічних сполук. Ці перевірки необхідні для того, щоб уникнути можливих ризиків для здоров'я споживачів, зокрема через наявність залишкових мономерів, барвників або пластифікаторів, таких як фталати, які можуть негативно впливати на гормональну систему людини [9-11].

Сучасні технології переробки ПЕТ, що наведені в роботах [12-14], сприяють значному зменшенню енергетичних витрат на виробництво нового матеріалу та зменшенню викидів парникових газів. Використання переробленого ПЕТ знижує необхідність у первинних ресурсах та сприяє збереженню природних ресурсів, що є важливим етапом у досягненні цілей сталого розвитку [15-16]. Принципи замкнутого циклу, що активно впроваджуються в процес переробки пластикових матеріалів, дозволяють зменшити обсяги відходів і підвищити ефективність використання сировини.

Проте, як зазначено в роботах [17-20], необхідно продовжувати дослідження для оцінки довгострокових токсикологічних ефектів, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ у харчовій промисловості. Це дозволить забезпечити більш точні критерії для безпеки продукції, що виготовляється з переробленого матеріалу.

У цілому, сучасні дослідження підтверджують, що переробка ПЕТ є важливим елементом у напрямку зменшення екологічного навантаження та забезпечення безпечної продукції. Однак, важливо продовжувати вдосконалення технологічних процесів очищення та підвищення вимог до регуляції використання вторинного ПЕТ у харчовій упаковці.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У виробництві вторинного ПЕТ важливе місце займає перевірка його якості за допомогою фізико-хімічних та механічних випробувань. Це включає вимірювання міцності, стійкості до впливу ультрафіолету та агресивних середовищ, а також визначення показників, таких як щільність, в'язкість розплаву і рівень залишкової вологості. Забезпечення стабільної якості дозволяє використовувати вторинний ПЕТ для виготовлення продукції, що відповідає міжнародним стандартам.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до забезпечення якості, безпечності та екологізації виробництва вторинного ПЕТ, а також вивчення його застосування у різних галузях промисловості.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах виробництва питання якості, безпечності та екологізації матеріалів та продукції стають дедалі важливішими. Це обумовлено як зростаючими вимогами з боку споживачів, так і посиленням законодавчих норм у сфері охорони навколишнього середовища та захисту здоров'я людей. Переробка та використання вторинного ПЕТ є яскравим прикладом того, як поєднання економічних, технологічних та екологічних підходів дозволяє створювати конкурентоспроможну та безпечну продукцію.

Забезпечення високої якості продукції на основі вторинного ПЕТ є однією з основних цілей сучасних виробників.

Одним із важливих етапів у процесі переробки ПЕТ є очищення від залишкових забруднень. Сучасні технології дозволяють знижувати рівень домішок до мінімальних значень, що забезпечує безпечність матеріалу для повторного використання, зокрема у харчовій промисловості. За допомогою багатоступеневих систем фільтрації та хімічного очищення видаляються барвники, хімічні речовини та інші забруднювачі, що виникають під час попередньої експлуатації матеріалу якості.

Для зниження рівня забруднень у вторинному ПЕТ використовуються різні методи очищення, порівняння ефективності яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Методи очищення ПЕТ та їхня ефективність щодо видалення забруднень

Метод очищення	Ефективність видалення (%)	Тип забруднень	Переваги	Недоліки
Гаряче промивання + мийні засоби	60-80	Масла, органічні речовини	Простота, недорого	Недостатня для фталатів
Вакуумна дегазація	70-90	Леткі, органічні сполуки	Ефективна для ацетальдегіду	Висока енергозатратність
Екструзія з вакуумом	85-95	ЛОС, фталати	Комбінована технологія	Потребує складного обладнання
Хімічна гідролізна очистка	90-99	Мономери, барвники	Глибоке очищення	Дорогий процес, утворення відходів

Джерело: розроблено авторами.

У виробництві вторинного ПЕТ важливе значення має перевірка його якості за допомогою фізико-хімічних та механічних випробувань. Це включає вимірювання міцності, стійкості до впливу ультрафіолету та агресивних середовищ, а також визначення показників, таких як щільність, в'язкість розплаву і рівень залишкової вологості.

Забезпечення стабільної якості дозволяє використовувати вторинний ПЕТ для виготовлення продукції, що відповідає міжнародним стандартам.

Питання безпечності матеріалів для споживачів є пріоритетним під час використання вторинного ПЕТ, особливо в харчовій та фармацевтичній промисловостях. Регулювання безпеки вторинного ПЕТ у різних країнах має певні відмінності, що вказані в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння стандартів щодо безпеки вторинного ПЕТ у різних регіонах

Параметр	ЄС (EFSA)	США (FDA)	Японія (JHOSPA)
Міграція загальна (SML)	≤ 60 мг/кг	≤ 50 мг/кг	≤ 50 мг/кг
Дозвіл на використання	Після оцінки процесу	Після сертифікації	Після токсикологічного тестування
Оцінка стерильності	Обов'язкова	Обов'язкова	Обов'язкова
Визначення залишкового ПЕТ	≤ 0,2 %	≤ 0,1 %	≤ 0,3 %

Джерело: розроблено авторами.

Існує кілька ключових напрямків забезпечення безпеки.

1. Контроль міграції речовин. Міграція шкідливих хімічних речовин із полімерів у харчові продукти або рідини є основною загрозою для безпеки споживачів. Відповідно до директив Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA), вторинний ПЕТ, що використовується для упаковки, повинен проходити ретельні перевірки на міграцію хімічних речовин, щоб виключити можливі ризики для здоров'я людей.

2. Стерильність і технології очищення при переробленні ПЕТ дозволяють гарантувати високу гігієнічність матеріалу, що робить його безпечним для контакту з харчовими продуктами. Контроль за процесами стерилізації упаковки та матеріалів забезпечує відповідність строгим вимогам у харчовій промисловості та фармацевтиці.

Екологізація виробничих процесів є важливим аспектом використання переробленого ПЕТ у сучасному виробництві.

Вона передбачає кілька підходів.

Зниження викидів: однією з основних екологічних переваг використання вторинного ПЕТ є значне зменшення викидів парникових газів під час його виробництва порівняно з первинним ПЕТ. За даними досліджень, використання перероблених матеріалів дозволяє знизити енергетичні витрати на виробництво до 50 %, а також значно скоротити кількість відходів, що потрапляють на сміттєзвалища.

Замкнутий цикл виробництва: впровадження принципів замкнутого циклу дозволяє значно підвищити екологічність виробництва. Це передбачає постійне повернення відходів виробництва у вигляді сировини для нових циклів виробництва, знижуючи потребу у первинній сировині та мінімізуючи кількість відходів.

Застосування «зелених» технологій: останнім часом більше виробників впроваджують «зелені» технології, що знижують енергоспоживання і використання природних ресурсів. Наприклад, використання сонячної енергії або інших відновлюваних джерел енергії у процесах переробки ПЕТ є ефективним способом зменшити негативний вплив на довкілля.

Сучасні підходи до забезпечення якості, безпеки та екологізації виробництва вторинного ПЕТ свідчать про значний прогрес у цій галузі. Поєднання передових технологій очищення та контролю матеріалів дозволяє отримувати продукцію, яка відповідає найвищим стандартам якості та безпеки. Водночас екологічні підходи до переробки ПЕТ створюють можливості для зниження негативного впливу на навколишнє середовище та ефективного використання ресурсів. Впровадження цих підходів забезпечує сталий розвиток у сфері переробки ПЕТ та його використання у різних галузях промисловості.

Токсикологічні аспекти використання тари для харчових продуктів із вторинного ПЕТ. Використання вторинного ПЕТ для виробництва тари, зокрема для харчових продуктів, викликає певні занепокоєння щодо можливого впливу на здоров'я споживачів. Це пов'язано з ризиком міграції хімічних речовин із полімеру в харчові продукти. Питання токсикологічної безпеки включає оцінку впливу потенційних забруднювачів, таких як залишкові мономери, добавки, домішки або продукти розкладу. Потенційні забруднювачі, які можуть залишатися у вторинному ПЕТ або утворюватися під час його переробки, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Потенційні забруднювачі у вторинному ПЕТ та їхні джерела

Забруднювач	Джерело	Потенційний вплив	Методи усунення
Ацетальдегід	Термічна обробка	Погіршення смаку	Вакуумна дегазація
Фталати	Добавки первинного ПЕТ	Гормональні порушення	Сорбційне очищення
Барвники	Кольорова упаковка	Токсичність, зміна кольору	Сорбція, хімічне очищення
Важкі метали	Попереднє використання	Токсичність	Хелатування, фільтрація

Джерело: розроблено авторами.

Міграція хімічних речовин

Одним з основних ризиків використання вторинного ПЕТ є міграція хімічних речовин із полімерної упаковки в харчові продукти. У процесі переробки ПЕТ може бути забруднений хімічними речовинами, такими як барвники, мастила або фталати, які використовуються у виробництві первинних полімерів. Крім того, під час експлуатації упаковки можливий процес деградації полімеру, що може призвести до утворення низькомолекулярних сполук, які мігрують у продукти харчування.

Відповідно до досліджень, вторинний ПЕТ, що використовується для харчової упаковки, може містити сліди важких металів, легких органічних сполук (ЛОС) або залишкових мономерів. Однією з таких речовин є ацетальдегід, який є побічним продуктом термічної обробки ПЕТ. Хоча його концентрація зазвичай є низькою, тривалий контакт із продуктами харчування може збільшувати його вміст у харчовій продукції.

Токсикологічні характеристики найпоширеніших забруднювачів вторинного ПЕТ подано в табл. 4.

Таблиця 4 – Токсикологічний профіль потенційних забруднювачів вторинного ПЕТ

Речовина	Клас небезпеки (GHS)	Можливий вплив на людину	NOAEL* (мг/кг маси тіла/день)	Джерело
Ацетальдегід	H351 (ймовірно канцероген)	канцерогенність, подразнення	120	WHO
ДЕГ (діетиленгліколь)	H302 (токсичний при ковтанні)	Ниркова токсичність	50	EFSA
Фталати (DEHP)	H360 (репродуктивна токсичність)	Порушення гормонального балансу	37	ECHA
Антимон (Sb)	H373 (токсичний при тривалому впливі)	Гематологічні зміни	6	US EPA

Джерело: розроблено авторами.

*NOAEL – найвища доза, при якій не спостерігається шкідливих ефектів.

Регулювання та безпека

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) та інші регуляторні органи встановили суворі вимоги щодо використання вторинного ПЕТ для виробництва упаковки для харчових продуктів. Для того щоб вторинний ПЕТ був допущений до використання в контакт з харчовими продуктами, він має відповідати ряду критеріїв:

1) ретельне очищення та процеси деконтамінації: сучасні методи переробки ПЕТ передбачають етапи багаторазового промивання та термічної обробки, що дозволяють видалити більшість можливих забруднювачів із полімеру.

2) ліміт на міграцію хімічних речовин: регулюючі органи встановлюють допустимі ліміти на міграцію хімічних речовин з упаковки в харчові продукти. Ці ліміти базуються на оцінках ризику для здоров'я людини. Наприклад, максимальний допустимий рівень міграції мономерів із вторинного ПЕТ у харчові продукти становить 60 мг/кг для різних хімічних речовин, включаючи ацетальдегід та фталати.

Перелік ключових міжнародних і національних нормативних документів, що регулюють безпечно використання вторинного ПЕТ, наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Основні нормативно-технічні документи, що регулюють переробку вторинного ПЕТ

Назва документа	Орган/країна	Основні положення
Regulation (EC) № 282/2008	Європейський Союз	Визначає вимоги до очищення вторинного ПЕТ
21 CFR §177.1630	США (FDA)	Умови безпеки вторинного ПЕТ для харчових цілей
ISO 15270:2008	ISO	Управління відходами полімерних матеріалів
ДСТУ EN 15343:2017	Україна (ДП "УкрНДНЦ")	Трасування та оцінка відповідності ПЕТ

Джерело: розроблено авторами.

Ризики для здоров'я

Одним з основних ризиків, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ для харчової упаковки, є можливість потрапляння до організму людини токсичних речовин, що можуть мати канцерогенні, мутагенні або репродуктивно токсичні властивості.

Дослідження показують, що під час неправильної переробки ПЕТ існує ризик зростання рівнів забруднень. Зокрема, фталати, які часто використовуються як пластифікатори, можуть призвести до гормональних порушень або розвитку ендокринних захворювань.

Іншим можливим джерелом забруднення є леткі органічні сполуки (ЛОС), що виникають під час термічної обробки ПЕТ. Важливо зазначити, що ці речовини можуть мігрувати з упаковки у продукти при підвищених температурах, наприклад, під час нагрівання їжі в пластиковій упаковці.

Крім цього, питання стосуються і міграції наночастинок, які можуть утворюватися під час виробництва вторинного ПЕТ. Попри те, що дослідження в цій сфері ще тривають, потенційний вплив наночастинок на організм людини залишається відкритим питанням.

Методи зниження ризиків

Для зниження ризиків, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ для виготовлення упаковки для харчових продуктів, необхідно застосовувати комплекс заходів, які включають таке.

1. Оптимізація процесів переробки: Забезпечення ретельного очищення ПЕТ перед повторним використанням та використання технологій деконтамінації, таких як багаторазова екструзія та вакуумна обробка.

2. Контроль за якістю: Виробники повинні забезпечувати контроль якості продукції на всіх етапах виробництва для мінімізації забруднень.

3. Дослідження довготривалих ефектів. Подальші дослідження щодо впливу міграції хімічних речовин із вторинного ПЕТ на здоров'я людини дозволять забезпечити більш надійний захист споживачів.

Використання вторинного ПЕТ для упаковки харчових продуктів може мати певні токсикологічні ризики, пов'язані з міграцією хімічних речовин у продукти харчування. Однак за умов дотримання сучасних технологічних стандартів переробки та очищення полімеру ризики можна звести до мінімуму. Регуляторні органи в багатьох країнах встановлюють жорсткі обмеження на міграцію потенційно шкідливих речовин із полімерної упаковки, забезпечуючи безпеку споживачів.

Висновки. Сучасні методи механічної та хімічної переробки дозволяють значно знизити рівень забруднень у вторинному ПЕТ, що робить його придатним для повторного використання у різних галузях промисловості, зокрема в харчовій.

Одним із ключових аспектів у процесі переробки є ретельне очищення матеріалу від залишкових забруднень. Сучасні технології, такі як багатоступеневі фільтраційні системи та хімічні обробки, допомагають мінімізувати рівень небажаних домішок і забезпечують безпеку матеріалу.

Питання токсичності залишкових хімічних сполук та міграції шкідливих речовин у харчові продукти залишаються актуальними, хоча сучасні методи очищення та регулювання міграції хімічних речовин допомагають мінімізувати ці ризики. Водночас використання вторинного ПЕТ зменшує негативний екологічний вплив завдяки зменшенню витрат енергії та зниженню обсягів відходів.

Вдосконалення технологій очищення та контроль якості продукції із вторинного ПЕТ створює можливості для його подальшого широкого застосування, забезпечуючи відповідність до міжнародних стандартів якості та екологічної безпеки.

Список використаних джерел

1. Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Conversion of waste PET into valuable products. *European Polymer Journal*, 82, 1-27.
2. Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453-1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>.
3. Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8>.
4. Buekens, A., & Yang, J. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(3), 415-434. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0241-2>.
5. Caldicott, R., & Banerjee, S. (2015). Sustainable packaging solutions for the food and beverage industry. *Packaging Technology and Science*, 28 (5), 385-391.
6. Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004>.
7. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>.
8. Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2017). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>.

9. Karayannidis, G. P., & Achilias, D. S. (2007). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(2), 128-146.
10. Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., ... & O'Connor, K. E. (2008). Up-cycling of PET (polyethylene terephthalate) to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Environmental Science & Technology*, 42(20), 7696-7701. <https://doi.org/10.1021/es801010e>.
11. Kosior, E., & Mitchell, J. (2000). Recycling of PET: a discussion of feedstock, chemical and mechanical recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 68(1), 33-39.
12. Lackner, M. (2015). Bioplastics. *Kunststoffe International*, 10, 84-86.
13. Lopez, J., Giró-Vega, M., & Vilaplana, F. (2020). Quality assessment of recycled PET flakes obtained from post-consumer bottles by means of solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Polymer Testing*, 86, 106478.
14. Maga, D., Hiebel, M., & Thonemann, N. (2019). Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 86-96.
15. Papaspyrides, C. D., & Papaspyrides, C. D. (Eds.). (2019). *Plastics in the Environment*. Elsevier.
16. Pivnenko, K., Erikssen, M. K., Martín-Fernández, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, 54, 44-52.
17. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
18. Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 34-52.
19. Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
20. Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 865-875.

References

1. Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Conversion of waste PET into valuable products. *European Polymer Journal*, 82, 1-27.
2. Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453-1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>.
3. Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8>.
4. Buekens, A., & Yang, J. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(3), 415-434. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0241-2>.
5. Caldicott, R., & Banerjee, S. (2015). Sustainable packaging solutions for the food and beverage industry. *Packaging Technology and Science*, 28 (5), 385-391.
6. Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004>.
7. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>.
8. Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2017). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>.
9. Karayannidis, G. P., & Achilias, D. S. (2007). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(2), 128-146.
10. Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., ... & O'Connor, K. E. (2008). Up-cycling of PET (polyethylene terephthalate) to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Environmental Science & Technology*, 42(20), 7696-7701. <https://doi.org/10.1021/es801010e>.
11. Kosior, E., & Mitchell, J. (2000). Recycling of PET: a discussion of feedstock, chemical and mechanical recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 68(1), 33-39.
12. Lackner, M. (2015). Bioplastics. *Kunststoffe International*, 10, 84-86.

13. Lopez, J., Giró-Vega, M., & Vilaplana, F. (2020). Quality assessment of recycled PET flakes obtained from post-consumer bottles by means of solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Polymer Testing*, 86, 106478.
14. Maga, D., Hiebel, M., & Thonemann, N. (2019). Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 86-96.
15. Papaspyrides, C. D., & Papaspyrides, C. D. (Eds.). (2019). *Plastics in the Environment*. Elsevier.
16. Pivnenko, K., Eriksen, M. K., Martín-Fernández, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, 54, 44-52.
17. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
18. Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 34-52.
19. Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
20. Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 865-875.

Отримано 18.07.2025

UDC 504.05:658.56:502.1

Serhii Pavliuk¹, Hanna Kharytonenko², Iryna Sukha³

¹PhD Student, Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Technology
Educational and Scientific Institute of UDCTU at the Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: serpik07@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>

²PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anna.kharitonenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9642-5334>

³PhD in Technical Sciences,
Associate Professor, Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Technology
Educational and Scientific Institute of UDCTU at the Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: irinasuha3@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-2047>

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO ENSURING QUALITY, SAFETY, AND ECO-FRIENDLINESS IN SECONDARY PET PRODUCTION

In the context of escalating global environmental issues and increasing quality and safety requirements for food products, the effective use of recycled polyethylene terephthalate (PET) is becoming highly relevant. Recycling polymer waste is considered an important tool for sustainable development that combines economic efficiency, resource conservation, and environmental responsibility. This raises the need to develop and improve technologies that ensure the safety of recycled materials used in the food industry.

The aim of the study is a comprehensive analysis of modern approaches to ensuring the quality, safety, and environmental sustainability of recycled PET, particularly in its application for food packaging. The paper presents a comparative evaluation of PET purification technologies, including mechanical methods, vacuum degassing, vacuum extrusion, and chemical hydrolysis. The effectiveness of each method in removing contaminants such as phthalates, dyes, volatile organic compounds, monomers, and heavy metals is analyzed. Special attention is paid to toxicological risks associated with the migration of chemical substances into food products

The article outlines international regulatory requirements (EFSA, FDA, JHOSPA) governing the use of recycled PET in food contact applications, with emphasis on permissible migration limits, sterilization assessments, and residual contaminant control. The advantages of closed-loop production and the implementation of "green technologies" that reduce greenhouse gas emissions, energy consumption, and waste volumes are highlighted. The study confirms that, with proper purification, quality control, and compliance with international standards, recycled PET can be safe and efficient for reuse in food-related applications.

It is concluded that the use of advanced PET recycling technologies supports the transition toward an environmentally responsible production model. Future research should focus on long-term toxicological impacts and improving assessment methods for the safety of recycled polymeric materials.

Keywords: recycled polyethylene terephthalate (PET); plastic recycling; mechanical purification; chemistry; toxicological safety; migration control; quality standards; environmental safety; food packaging; human ecology.

Table: 5. References: 20.