

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-67-76>

УДК 678.746.32.5

СПОСОБИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

Савчук Б.П., Пушкаръов Д.В.

METHODS OF POLYMER WASTE PROCESSING

Savchuk B.P., Pushkarov D.V.

Проведено аналіз існуючих способів утилізації пластикових відходів, таких як захоронення, спалювання, механічна та хімічна переробка. Показано переваги та недоліки існуючих способів утилізації та переробки пластмасових відходів в різних частинах світу. Так, захоронення та спалювання є найпоширенішими та найдешевшими способами утилізації полімерних відходів. Захоронення призводить лише до накопичення відходів на сміттєзвалищах, а спалювання полімерних відходів дозволяє регенерувати значну кількість енергії, що може бути використана в різних галузях. Проте спалювання генерує надмірне виділення парникового газу в атмосферу, що негативно впливає на навколишнє середовище. Механічна та хімічна переробка полімерних відходів дозволяє знижувати обсяги відходів та повторно використовувати матеріали. Проте при обробці пластиків важливою є проблема сортування відходів, що ускладнює переробку пластикових сумішей та знижує ефективність використання цих технологій.

Проведено пошук нових підходів в процесах утилізації та переробки полімерних відходів, що дозволять реалізувати принципи циклічного використання матеріалів.

Розглянуто особливості процесів переробки різних типів полімерних матеріалів методами механічної та хімічної переробки з попереднім сортуванням за типами. Встановлено можливості повторного застосування отриманих продуктів перероблення полімерних матеріалів. Проаналізовано можливість застосування біополімерів для вирішення проблеми утилізації полімерних відходів. Розглянуто можливість застосування принципів циклічної економіки до організації переробки відходів біополімерів. Показано можливість ефективного поєднання комплексних рішень в напрямку управління полімерними відходами при реалізації засад бережливого виробництва.

Запропоновано комплексний підхід до переробки полімерних відходів синтетичних та біополімерів шляхом їх перетворення у продукти придатні для повторного використання з використанням сучасних методів та підходів, цифрових технологій та нових концепцій. Застосування елементів діджиталізації при організації переробки полімерних відходів дозволить перенести ці технології на наступний щабель розвитку для забезпечення сталого розвитку та покращення екологічної ситуації.

Ключові слова: полімерні відходи, циклічна економіка, технології переробки, синтетичні полімери, біорозкладані полімери.

Вступ. Людська діяльність завдає значного впливу стану навколишнього середовищу. Швидке зростання промисловості, урбанізація та споживання ресурсів призвели до скорочення природних ресурсів, забруднення повітря, води і ґрунтів, а також до змін клімату. Вирубка лісів, розширення сільськогосподарських угідь і будівництво інфраструктури руйнують природні екосистеми та знижують біорізноманіття.

Промислові відходи і хімічні забруднювачі забруднюють річки, озера і океани, що призводить до загибелі морських екосистем і загрожує здоров'ю людей. Викиди парникових газів, вуглекислого газу та метану спричинені спалюванням викопного палива, стали головним фактором глобального потепління та зміни клімату.

Ці негативні наслідки змушують нас переглянути наші підходи до використання ресурсів та управління відходами. У відповідь на ці виклики важливо впроваджувати

екологічно чисті технології та стратегії сталого розвитку. Багато вчених ототожнюють зміну клімату з коливаннями природних процесів під впливом техногенної діяльності людини, викликані розвитком промисловості та сільського господарства, а стрімке збільшення населення та відходів лише погіршує становище [1-2]. Наслідками такої діяльності є втрата біорізноманіття, що може призвести до розпаду екологічних груп та серйозних змін в екосистемах [3-5].

Значну частину твердих відходів складає пластик. У Європі та Північній Америці щорічно утворюється від 1,6 до 2,2 тон твердих відходів на людину, які можна поступово переробити або повторно використовувати [6-8]. За офіційними оцінками, у 2015 році в Сполучених Штатах утворилося приблизно 238 мільйонів тон побутових відходів. [9]. Середньодобова кількість твердих побутових відходів у Китаї становить 7,3 тис т. [10-14].

Метою роботи є аналіз існуючих способів утилізації пластикових відходів та пошук нових підходів до реалізації принципів циклічної економіки в процесах переробки полімерних відходів.

Результати дослідження. Дякуючи значному спектру застосування полімери стали невід'ємною складовою сучасного життя (Рис. 1, б) [15]. Середній річний обсяг виробництва полімерних матеріалів в період з 2016 по 2020 роки перевищує 330 мільйонів метричних тон (рис.1, а). За оцінками, до 2050 року світове виробництво пластику становитиме близько 1,1 мільярда тон (рис. 1, а) [16].

За інформацією агентство охорони навколишнього середовища, що з усієї кількості пластикових відходів, які утворюються, тільки 9% щорічно переробляється (рис. 2, б).

Дослідження показали, що 19% пластику спалюється, а решта відправляється на смітник для захоронення або взагалі не утилізується. Висока енергоємність і вартість процесу захоронення призводять до того, що цей процес не завжди відповідає технології, внаслідок чого відходи потрапляють у водойми [17, 18]. Пластикові відходи важко розкладаються і можуть спричинити забруднення навколишнього середовища [19]. Тому правильне поводження з пластиковими відходами є основним фактором вирішення проблем із забруднення навколишнього середовища та сталого розвитку. Тому так важливо перейти від традиційної моделі

менеджменту відходів до генеративної та відновлювальної моделі.

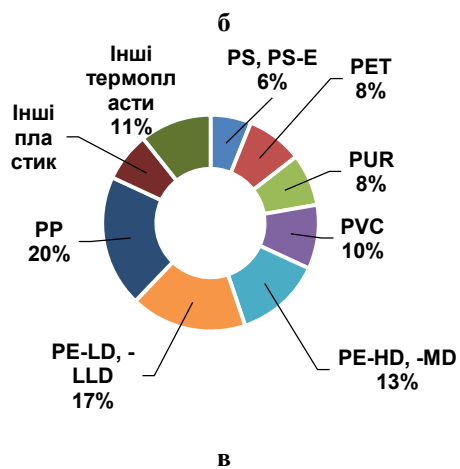
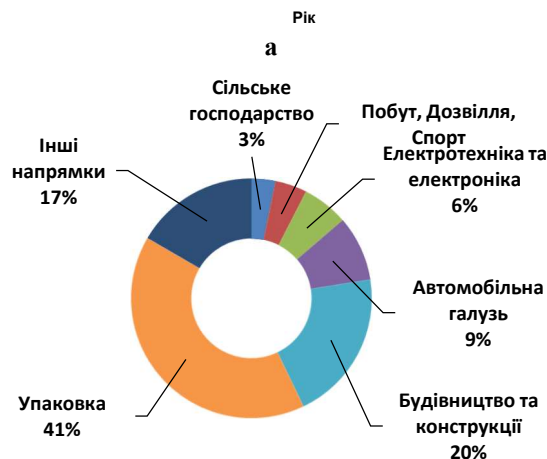
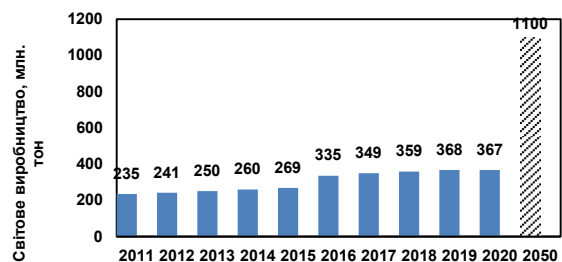


Рис. 1. Світове виробництво полімерів [21]: а – об'єми виробництва пластику за період з 2011-2020 та оцінка на 2050 рік, б – розподіл пластику за сферами використання, в – розподіл використання пластику за типами полімерів

Генеративна модель менеджменту спрямована на створення систем, які відновлюють та покращують природні ресурси, замість того щоб просто знижувати шкоду. Вона включає в себе підходи до переробки, повторного використання та утилізації відходів, які мінімізують негативний вплив на довкілля та сприяють сталому розвитку.

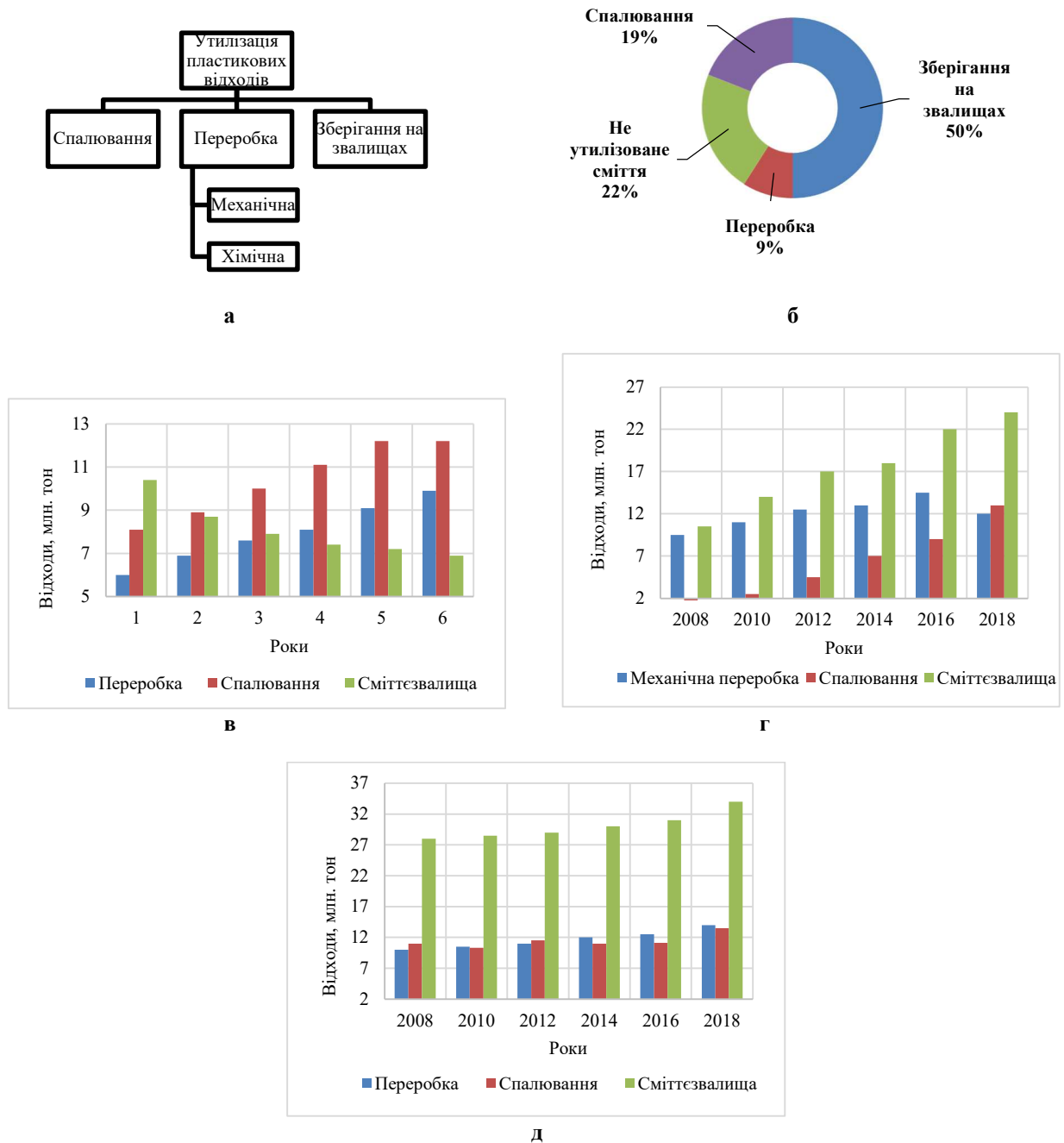


Рис. 2. Глобальна утилізація пластикових відходів [23-28]:

а – способи утилізації пластикових відходів, б – світовий розподіл способів утилізації пластикових відходів, в – тренди утилізації пластикових відходів у Євросоюзі за 2010-2020 роки, г – тренди утилізації пластикових відходів у Китаї за 2008-2017 роки, д – тренди утилізації пластикових відходів у США за 2008-2018 роки

Відновлювальна модель менеджменту акцентує увагу на циклічній економіці, де матеріали і ресурси використовуються повторно, зберігаючи їхню цінність протягом тривалого часу. Це означає перехід від лінійної економіки до циклічної, де продукти розробляються з урахуванням їхньої подальшої переробки та відновлення.

Перехід до цих нових моделей допоможе зменшити навантаження на природні ресурси,

скоротити кількість відходів, що потрапляють на звалища. Це є критично важливим кроком для забезпечення екологічної стійкості та збереження нашої планети для майбутніх поколінь.

До стандартних методів переробки та утилізації пластикових матеріалів відносять термічне розкладання або спалювання, захоронення на звалищах, механічну та хімічну переробку (рис. 2, а). Основною проблемою, яка

залишається в переробці полімерних відходів, є їх швидка, ефективна ідентифікація та сортування [20].

Більшість полімерних відходів викидають на сміттєзвалища та у навколишнє середовище (рис. 2, б). Тим часом енергетична переробка пластикових відходів зазвичай використовується шляхом спалювання, в якому значна кількість енергії може бути регенована та використана в різних галузях [22]. Проте такий спосіб має свої недоліки (рис. 2, а) надмірне виділення парникового газу в атмосферу під час спалювання.

Полімерні матеріали значно менше переробляються порівняно з іншими матеріалами, які споживаються у великих кількостях, такими як скло, папір, кераміка та алюміній [29, 30]. Загальна переробка пластику складна технологія через його багатоступеневу обробку, утилізацію та сортування, розповсюдження та використання [31, 32].

Для цілей вторинної переробки полімери повинні мати маркування такі як: PET – поліетилентерефталат - 1, HDPE – поліетилен високої щільності – 2, PVC – полівінілхлорид - 3, LDPE – поліетилен низької щільності - 4, PP – поліпропілен - 5, PS – полістирол – 6 і Other – інші полімери - 7. Згідно з дослідженнями, здатність до сортування та переробки пластикових матеріалів, згаданих у цій категорії, становить понад 50%.

Пластикові відходи можна переробляти хімічним та механічним шляхом (рис. 2, а, рис. 3). Початковим етапом їх сортують, що, за допомогою різних технологій, таких як густина, колір, електростатичні властивості, інфрачервоне випромінювання. Механічна переробка є найбільш використовуваною технікою переробки полімерів завдяки швидкому процесу та ефективності (рис. 3). Однак, в деяких джерелах, механічна переробка описується як не ефективна через складність переробки сумішей відходів, тому більшість пластикових відходів спалюється [33-35]. Під час хімічної переробки полімерний ланцюг розривається до вихідних мономерів, які можна використовувати разом з первинною сировиною. (рис. 3).

Продукти отримані матеріали в результаті переробки полімерних відходів можуть бути більш екологічними та ефективними, щоб замінити інші типи матеріалів. Наприклад, перероблені відходи поліетиленових пакетів, були використані для виробництва підлогової плитки з покращеними механічними

властивостями та меншою горючістю [36]. Це дослідження показало, що поліетиленові пакети, які, як відомо, є основним джерелом забруднення води та ґрунту, можна перетворити на дуже міцні та легкі, а головне корисні вироби. Пластикові відходи також використовують у виробництві балок, армованих волокном [37, 38], тротуару [39], для виробництва цементу [40], для модифікації асфальтового покриття [41]. Пластикові відходи можуть бути використані як потенційна заміна деревини, блоків і цегли за допомогою обробки формовкою [42].

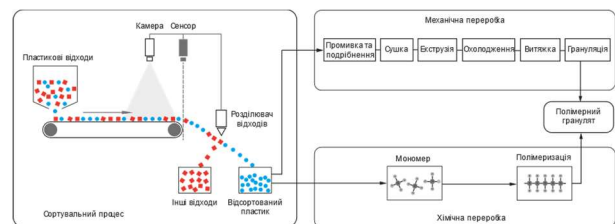


Рис. 3. Схеми переробки полімерних відходів механічним та хімічним методами

Відомо що існують певні обмеження у переробці та використанні пластикових відходів, на які варто звернути увагу. Головне обмеження переробки пластикових відходів це складності збору відходів та налагодженої інфраструктури. Не повне розуміння довгострокової ефективності переробленого пластику призвело до обмеження прийому та використання пластикових відходів підрядниками. Пластикові відходи часто складаються з різних типів пластику з різноманітними технологічними та експлуатаційними добавками, отже, їх переробка без належного сортування може призвести до неоднорідних характеристик отриманого композиційного матеріалу. Переробка певних типів полімерів потребує спеціального обладнання, що часто перешкоджає переробці цих типів пластикових відходів в країнах з несприятливою економічною ситуацією. Також, не менш важливим фактором, що перешкоджає якісній переробці полімерних відходів, є відсутність стандартів переробки. Наприклад, незважаючи на широкі дослідження використання пластикових відходів у цементних композитах, досі немає стандарту для використання пластикових відходів у будівельних цілях.

Ще однією концепцією у боротьбі з полімерними відходами деякі фахівці вважають використання біорозкладаних пластиків.

Біорозкладаний пластик який часто сприймається як можливе вирішення проблеми полімерних відходів придатний до розкладу лише за певних умов, котрі часто не є здійсненими у природньому середовищі. Тобто ефективність біорозкладу можливо забезпечити лише за наявності розвиненої системи промислового компостування, що є значним викликом для країн що розвиваються.

Біонічний розклад таких пластиків відбувається при певних умовах, пов'язаних із середовищем утилізації та часом розкладання. Біодеградабельність слід розглядати як кращий спосіб утилізації одноразових виробів після того, як він виконав свою роль, наприклад, для упаковки харчових продуктів, сільськогосподарських або медичних виробів. Біорозклад - своєчасний, безпечний та ефективний спосіб повного розкладання пластикових виробів, призначених для біологічного розкладання, у середовищі утилізації через харчовий ланцюг мікроорганізмів. Біологічне розкладання може відбуватись в умовах компостування (компостований пластик), ґрунтових умовах, анаеробних умовах (анаеробні метантенки, полігони) або морських умовах [43].

Біорозклад пластиків складається з двох етапів: фрагментації, тобто руйнування полімерних ланцюгів під впливом тепла, під впливом комплексу чинників, що призводить до фрагментації пластикового матеріалу, та асиміляції фрагментів пластику мікробним середовищем. Для того, щоб пластиковий виріб вважався біорозкладним, необхідна повна біодеградація (як фрагментація, так і асиміляція). Фрагменти пластику можуть становити потенційну небезпеку для навколишнього середовища, якщо вони не будуть повністю асимільовані мікробними популяціями, присутніми в системі утилізації, за відносно короткий період часу [43].

Біодеградабельність пластику залежить від багатьох факторів: сировини, хімічного складу, а також від умов навколишнього середовища, за яких відбувається біорозклад пластикових виробів. Якщо розкладаний пластик не розроблений спеціально для розкладання в певному середовищі, наприклад, у морському середовищі або ґрунті, він може не розкладатиметься в певних умовах. Біорозкладані пластмаси в основному призначені для біологічного розкладання в умовах промислових компостних установках, де температура перевищує 50°C впродовж

тривалих періодів тижнів або місяців. Вони не повинні потрапляти в навколишнє середовище і не повинні розглядатися як вирішення проблеми засмічення навколишнього середовища пластиковими відходами. Основним рішенням для зменшення кількості пластику в навколишньому середовищі є краще управління відходами, особливо в країнах, що розвиваються.

Біорозкладані пластики можна розділити на дві групи: полімери природнього походження – ті що виготовляються з біомаси і мають вроджені властивість біологічного розкладання; та полімери з синтетичних ресурсів – ті які маю додаткову властивість, але виробляються з викопних ресурсів.

Ця група полімерів в основному використовується в поєднанні з полімерами пластиками на біологічній основі, наприклад, крохмалем або целюлозою. Їх здатність до біологічного розкладання та механічні властивості покращують експлуатаційні характеристики згаданих матеріалів у конкретних сферах застосування. Найважливішими біорозкладаними пластмасами на біологічній основі є полімери на основі крохмалю - термопластичний крохмаль, полімолочна кислота, полімери полігідроксиацидів, полімери целюлози. Основними допоміжними компонентами полімерних матеріалів є доданки, такі як наповнювачі пігменти, змашувальні агенти, стабілізатори та багато інших. Доданки покращують переробку цих матеріалів або кінцеві властивості продукту, наприклад, механічні. Для біорозкладних полімерів дуже важливо, щоб усі додаткові компоненти також піддавалися біологічному розкладанню, або були інертними, та не повинні мати негативного впливу компостування [44].

Синтетичні полімери здебільшого отримують з нафтової сировини, з вугілля та природного газу. Це полімери, які не зустрічаються в природі, і, як наслідок, коли вони потрапляють у природне біотичне середовище, вони не можуть бути задіяні у процес метаболізму живих організмів. Для таких цих полімерів здатність до розкладання може бути досягнута за рахунок інтеграції в полімер нестійких зв'язків (ефірних або складноефірних), які є чутливими до гідролітичної дії [45]. Такі полімерні матеріали представляють невелику групу розкладних полімерів на основі синтетичної сировини, які використовуються для покращення

властивостей розкладних пластиків на біологічній основі. Найважливішими з них є полібутиратадипаттерефталат, полібутиленсукцинат, полікапролактон та полівініловий спирт.

Розкладні полімери знайшли застосування в багатьох сферах застосування з коротким терміном служби, де здатність до розкладу є ключовою перевагою, наприклад, у пакуванні, харчовій промисловості, сільському господарстві. Для виробництва таких продуктів використовують розкладні пластмаси на біологічній основі та на основі синтетичної сировини та їх суміші. Проте розкладні пластики повноцінно не можуть замінити традиційні широкоживані пластики у всіх сферах людської діяльності, оскільки не володіють таким широким спектром експлуатаційних властивостей. Перевагою розкладних пластиків над іншими видами пластику є їхня здатність до біологічного розкладання після завершення їх терміну експлуатації. Але ця додаткова властивість має цінність лише за умови правильного поводження з такими матеріалами, тобто якщо вони утилізуються за таких умов, які уможливають їх біологічне розкладання. Вони мають потенціал до розкладання природними агентами лише за певних умов, але ці умови мають бути використані, щоб повністю скористатися перевагами розкладання полімерного матеріалу [46].

Підсумовуючи вище наведену інформацію можна сказати, що одним із дієвих способів комплексного вирішення таких екологічних проблем, як утилізація та переробка полімерних відходів може стати використання стратегії циклічної економіки на заміну традиційній лінійній (рис. 4).

Отже, використання технологій переробки та повторного використання відходів частково вирішує не тільки проблему дефіциту ресурсів, але й вносить важливий внесок у збереження екології. Завдяки таким технологіям зменшується необхідність у видобуванні нових природних ресурсів, що дозволяє зберегти природні екосистеми і зменшити екологічний вплив видобувної промисловості. Наприклад, використання вторинних матеріалів у виробництві зменшує потребу в видобуванні нових руд, що, в свою чергу, знижує викиди парникових газів та інші забруднювачі, пов'язані з цими процесами.

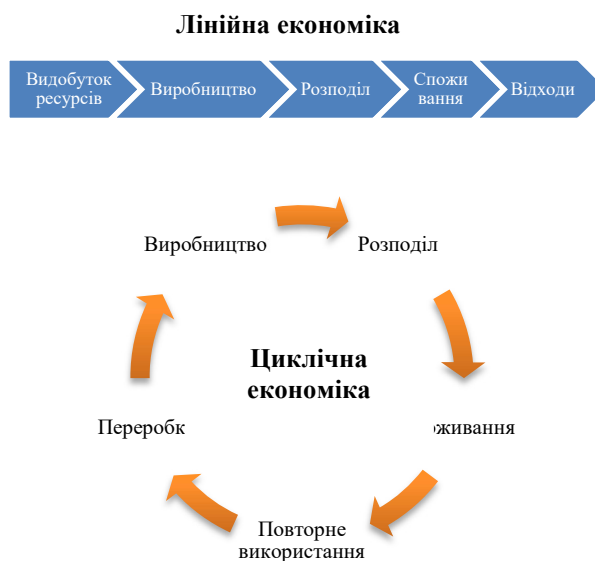


Рис. 4. Схематичне зображення лінійної та циклічної економіки

Цей підхід також сприяє формуванню циклічної економіки, яка порівняно з традиційною лінійною моделлю економіки, призводить до значних соціальних та екологічних поліпшень. Лінійна модель, що базується на принципі "взяти, зробити, викинути", призводить до швидкого виснаження природних ресурсів і накопичення відходів. Натомість, циклічна економіка передбачає збереження матеріалів у виробничому циклі якомога довше, що сприяє зменшенню відходів і ефективнішому використанню ресурсів.

Соціальні поліпшення включають створення додаткових робочих місць у галузях, пов'язаних з переробкою, ремонтом та повторним використанням матеріалів. Це стимулює розвиток локальних економік і сприяє підвищенню рівня життя в громадах. Крім того, зменшення відходів і забруднення покращує якість життя, знижує ризики для здоров'я та сприяє створенню більш чистого і безпечного середовища.

Екологічні поліпшення включають зменшення викидів парникових газів, зниження рівня забруднення води та ґрунтів, а також збереження біорізноманіття. Циклічна економіка сприяє збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь і допомагає у боротьбі зі зміною клімату.

Таким чином, технології переробки та повторного використання твердих відходів є ключовими елементами переходу до циклічної економіки, яка приносить значні соціальні та екологічні переваги порівняно з традиційною

лінійною економікою. Циклічна економіка також сприяє розвитку нових технологій та інновацій, оскільки вона ставить перед собою завдання не лише забезпечити вторинне використання ресурсів, а й стимулювати пошук більш ефективних та сталих методів обробки та використання матеріалів. В умовах циклічної економіки компанії та дослідницькі установи активно розробляють нові технології для підвищення ефективності виробництва та зменшення відходів. Наприклад, це можуть бути методи рециклінгу, що дозволяють відновлювати та повторно використовувати матеріали, які раніше вважалися непридатними для повторного використання.

Такий підхід сприяє відкриттю нових можливостей для сталого розвитку та покращення якості навколишнього середовища. Розробка біорозкладних матеріалів або створення більш довговічних та міцних продуктів зменшує навантаження на природні ресурси та знижує рівень забруднення. Крім того, розвиток цифрових технологій дозволяє створювати розумні системи управління ресурсами, що підвищують ефективність використання енергії та матеріалів на всіх етапах виробничого циклу.

Інновації в області циклічної економіки також можуть сприяти створенню нових бізнес-моделей, таких як моделі сервісного типу, де продукти не продаються, а надаються в оренду або як послуга. Це дозволяє зменшити потребу в виробництві нових товарів і, відповідно, зменшити споживання природних ресурсів та кількість відходів. У свою чергу, це стимулює розвиток нових підходів до дизайну продукції, щоб зробити її більш придатною для багаторазового використання та легшою в ремонті чи модернізації.

В результаті, циклічна економіка не лише допомагає зберігати ресурси та захищати довкілля, але й стимулює розвиток технологій та інновацій, що робить її важливим елементом сучасної економічної та екологічної політики.

Існує багато концепцій функціонування циклічної економіки [47]. Крім того, дослідники запропонували підхід до економічної переробки [48]. Однак концепція циклічної економіки не була загально визначена до 2013 року. Циклічна економіка спрямована на не лише на зменшення відходів у процесі виробництва та розподілу цих відходів, а також на створення умов для успішної переробки продуктів після їх використання [49]. Рамкова директива щодо відходів [50] ще покращила інтеграцію між

циклічною економікою та управлінням відходами.

Деякі стратегії циклічної економіки можуть створювати екологічні системи управління відходами, які максимізують економічну ефективність, зменшують споживання ресурсів і запобігають забрудненню навколишнього середовища. Стратегія циклічної економіки добре узгоджується з ціллю вирішення проблеми зміни клімату. Це може зменшити викиди вуглецю в промисловості, при утилізації відходів, споживанні енергії, будівництві та транспорті, тим самим пом'якшуючи глобальні зміни клімату. Це може покращити якість повітря та води, зменшити споживання енергії та природних ресурсів, а також ефективно та розумно утилізувати тверді та токсичні відходи.

Висновки. За прогнозами об'єми виробництва полімерів до 2050 року приблизно зростуть у три рази відповідно зростуть і об'єми полімерних відходів. Тому проблема утилізації та переробки полімерних відходів з кожним днем стає все актуальнішою. Методи утилізації, а саме захоронення та спалювання є найдешевшими але несуть значні ризики забруднення навколишнього середовища. Ще однією тенденцією боротьби з полімерними відходами розглядають використання біополімерів, що можуть розкладатись під дією мікроорганізмів. Проте біополімери розкладаються за певних умов і вони не володіють достатнім спектром властивостей, щоб замінити традиційні широкоживані пластики у сферах не пов'язаних з одноразовими виробами та упаковкою. Лише повторна переробка полімерних відходів з повторним цільовим застосуванням може вирішити важливу проблему утилізації полімерних відходів.

Пластикові відходи створюють серйозні екологічні проблеми через свою довговічність і стійкість до розкладання. Пластикові вироби можуть розпадатися на мікропластики, які потрапляють в океани, річки і навіть в повітря, завдаючи шкоди тваринам і рослинам. Мікропластики також можуть потрапляти в харчові ланцюги, що становить ризик для здоров'я людини.

Збільшення виробництва полімерів за останні роки підкреслює необхідність впровадження ефективних методів управління пластиковими відходами. Традиційні методи утилізації, такі як спалювання і захоронення на звалищах, не є екологічними рішеннями. Вони

призводять до викидів токсичних речовин і забруднення ґрунтів та водних ресурсів.

Одним із ключових підходів до вирішення проблеми полімерних відходів є розробка технологій переробки унікальних видів пластиків. Інноваційні методи переробки дозволяють не лише зменшити обсяги відходів, але й створювати нові продукти з перероблених матеріалів, що зменшує потребу у виробництві нових полімерів. Наприклад, технології хімічного рециклінгу дозволяють розкласти пластики на їх основні компоненти, які потім можуть бути використані для виробництва нових пластикових виробів. Це створює замкнутий цикл використання матеріалів, який є основою циклічної економіки.

Крім того, розробка біологічно розкладних полімерів є ще одним перспективним напрямком. Розкладні полімери можуть бути задіяні у природних процесах, що зменшує їх вплив на довкілля. Такі матеріали можуть використовуватися у виробництві пакування, одноразового посуду та інших виробів, що зменшує об'єми полімерів, які потрапляють на у природне середовище, за умови створення умов, що є необхідними для їх розкладу.

Отже, зростання виробництва полімерних матеріалів та проблема пластикових відходів вимагають комплексного підходу, що включає розвиток технологій переробки, використання біорозкладаних матеріалів та впровадження принципів циклічної економіки. Це дозволить зменшити негативний вплив пластикових відходів на довкілля та сприятиме сталому розвитку.

Вторинна переробка та повторне використання твердих відходів може бути частковим або повним рішенням проблеми дефіциту природних ресурсів, та захисту навколишнього середовища. Підхід циклічної економіки, порівняно з традиційною економікою, забезпечує більші соціальні та екологічні вигоди, сприяючи перетворенню відходів у цінну сировину для промисловості.

Література

- Harvey, J. A., Tougeron, K., Gols, R., Heinen, R., Abarca, M., Abram, P. K., ... & Chown, S. L. Scientists' warning on climate change and insects. *Ecological monographs*, 2023. 93(1), e1553.
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., ... & Yap, P. S. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, 2023. 21(1), 55-80.
- Abarca, M., Larsen, E. A., & Ries, L. Heatwaves and novel host consumption increase overwinter mortality of an imperiled wetland butterfly. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019. 7, 193.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015. 347(6223), 1259855.
- Venter, O., Sanderson, E. W., Magrath, A., Allan, J. R., Beher, J., Jones, K. R., ... & Watson, J. E. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature communications*, 2016. 7(1), 12558.
- Cooper, D. R., & Gutowski, T. G. The environmental impacts of reuse: a review. *Journal of Industrial Ecology*, 2017. 21(1), 38-56.
- Guerrero, M. Hogland, 2013 Guerrero L., Mass G., Hogland W. Solid waste management, *Waste Management*, 2013. 33(1), 220-232.
- Aguilar-Hernandez, G. A., Sigüenza-Sanchez, C. P., Donati, F., Merciai, S., Schmidt, J., Rodrigues, J. F., & Tukker, A. The circularity gap of nations: A multiregional analysis of waste generation, recovery, and stock depletion in 2011. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019. 151, 104452.
- United states Environmental Protection Agency National overview: facts and figures on materials, wastes and recycling. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>. Accessed April 25, 2015. 2022
- Zhu Y, Zhang Y, Luo D, Chong Z, Li E, Kong X A review of municipal solid waste in China: characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies. *Environ Dev Sustain* 2021. 23:6603–6622. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00959-9>
- Li J, Xiao F, Zhang L, Amirkhanian SN. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: a review. *J Clean Prod* 2019. 233:1182–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>
- Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egypt J Pet* 27:1275–1290. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Chen L, Wang L, Cho D-W, Tsang DCW, Tong L, Zhou Y, Yang J, Hu Q, Poon CS Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials. *J Clean Prod* 222:335–343. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.057>
- Ibrahim MIM, Mohamed NAEM Towards sustainable management of solid waste in Egypt. *Procedia Environ Sci* 34:336–347. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.030>
- Evode, S.A. Qamar, M. Bilal, D. Barceló, H.M. Iqbal Plastic waste and its management strategies for

- environmental sustainability Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 4, 2021, Article 100142
16. Y.-Y. Lai, Y.-M. Lee Management strategy of plastic wastes in Taiwan Sustainable Environment Research, 32 (2022), pp. 1-10
 17. Z. Yuan, R. Nag, E. Cummins Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - from marine to food systems Sci Total Environ, 823 (2022), Article 153730
 18. P. Emenike, O. Arooye, S. Academe, P. Unokiwedi, D. Omole The effects of microplastics in oceans and marine environment on public health—a mini-review IOP conference series: earth and environmental science, IOP Publishing, 2022. Article 012019
 19. Y. Chen, S. Selvinsimpson Current trends, challenges, and opportunities for plastic recycling Plastic and Microplastic in the Environment: Management and Health Risks, 2022, Pp. 205-221
 20. D. Pan, F. Su, C. Liu, Z. Guo Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products Advanced Composites and Hybrid Materials, 3, 2020, Pp. 443-461
 21. Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, 2017. e1700782.
 22. T. Astrup, J. Møller, T. Fruergaard Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions Waste Manag Res, 27, 2009. Pp. 789-799
 23. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 3(7), 2017. e1700782.
 24. Geyer, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. In Plastic waste and recycling, 2020. Pp. 13-32. Academic Press.
 25. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 82, 576-596.
 26. Kan, M. Dynamic flows and stocks of plastics in the United States and pathways towards zero plastic pollution by 2050 (Doctoral dissertation), 2021.
 27. Heller, M. C., Mazon, M. H., & Keoleian, G. A. Plastics in the US: toward a material flow characterization of production, markets and end of life. Environmental Research Letters, 2020. 15(9), 094034.
 28. Jiang, X., Wang, T., Jiang, M., Xu, M., Yu, Y., Guo, B., ... & Zhu, B. Assessment of plastic stocks and flows in China: 1978-2017. Resources, Conservation and Recycling, 2020. 161, 104969.
 29. P.O. Awoyera, J.M. Ndambuki, J.O. Akinmusuru, D.O. Omole Characterization of ceramic waste aggregate concrete HBRC journal, 14. 2018. Pp. 282-287
 30. P.O. Awoyera, A. Adesina Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective Case Stud Constr Mater, 12, 2020. Article e00330
 31. J.N. Hahladakis, E. Iacovidou An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling J Hazard Mater, 380, 2019, Article 120887
 32. N. Singh, D. Hui, R. Singh, I. Ahuja, L. Feo, F. Fraternali Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications Compos B Eng, 115, 2017. Pp. 409-422
 33. S. Serranti, G. Bonifazi Techniques for separation of plastic wastes Use of recycled plastics in eco-efficient concrete, Elsevier, 2019. Pp. 9-37
 34. O. Kho, H. Hsien LCA of plastic waste recovery into recycled materials Energy and Fuels in Singapore, 145, 2019. P. 67
 35. Y. Aryan, P. Yadav, S.R. Samadder Life Cycle Assessment of the existing and proposed plastic waste management options in India: a case study J Clean Prod, 211 (2019), pp. 1268-1283
 36. R.V. de Camargo, C. Saron Mechanical-chemical recycling of low-density polyethylene waste with polypropylene J Polym Environ, 28, 2020. Pp. 794-802
 37. M.Y. Khalid, Z.U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials Sustainable Materials and Technologies, 2021, Article e00382
 38. F. Khalid, J. Irwan, M.W. Ibrahim, N. Othman, S. Shahidan Performance of plastic wastes in fiber-reinforced concrete beams Construct Build Mater, 183, 2018. Pp. 451-464
 39. M.L. Henriksen, C.B. Karlsen, P. Klarskov, M. Hinge Plastic classification via in-line hyperspectral camera analysis and unsupervised machine learning Vib Spectrosc, 118, 2022, Article 103329
 40. S. Serranti, V. Luciani, G. Bonifazi, B. Hu, P.C. Rem An innovative recycling process to obtain pure polyethylene and polypropylene from household waste Waste Manag, 35, 2015. Pp. 12-20
 41. X. Song, W. Hu, W. Huang, H. Wang, S. Yan, S. Yu, F. Liu Methanolysis of polycarbonate into valuable product bisphenol A using choline chloride-based deep eutectic solvents as highly active catalysts Chem Eng J, 388, 2020. Article 124324
 42. J.-S. Bae, S.-K. Oh, W. Pedrycz, Z. Fu Design of fuzzy radial basis function neural network classifier based on information data preprocessing for recycling black plastic wastes: comparative studies of ATR FT-IR and Raman spectroscopy Appl Intell, 49, 2019. Pp. 929-949
 43. Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences, 364(1526), 2127-2139.
 44. Šprajcar, M., Horvat, P., & Kržan, A. Biopolymers and bioplastics: plastics aligned with nature. Ljubljana: National Institute of Chemistry, 2012.

45. Yamamoto, M., Witt, U., Skupin, G., Beimborn, D., & Müller, R. J. Biodegradable aliphatic-aromatic polyesters: "Ecoflex®". *Biopolymers Online: Biology • Chemistry • Biotechnology • Applications*, 4, 2005.
46. Kiran, E. U., Stamatelatu, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. Production of biogas via anaerobic digestion. In *Handbook of biofuels production*, 2016. (pp. 259-301). Woodhead Publishing.
47. Adami, L., & Schiavon, M. From circular economy to circular ecology: a review on the solution of environmental problems through circular waste management approaches. *Sustainability*, 2021. 13(2), 925.
48. Leontief, W. The economy as a circular flow. *Structural change and economic dynamics*, 1991. 2(1), 181-212.
49. Yang, M., Chen, L., Wang, J. et al. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environ Chem Lett* 21, 2023. 55–80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
50. European Union Directive 2008/98/EC of The European Parliament and of The Council. 2008. <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>. Accessed April

Savchuk B.P., Pushkarov D.V. Methods of polymeric waste processing

An analysis of existing methods of recycling plastic waste, such as landfilling, incineration, mechanical and chemical processing, was conducted. The advantages and disadvantages of existing methods of recycling and recycling plastic waste in different parts of the world were shown. Thus, landfilling and incineration are the most common and cheapest methods of recycling polymer waste. Landfilling only leads to the accumulation of waste in landfills, and incineration of polymer waste allows you to regenerate a significant amount of energy that can be used in various industries. However, incineration generates excessive greenhouse gas emissions into the atmosphere, which negatively affects the environment. Mechanical and chemical processing of polymer waste allows you to reduce waste volumes and reuse materials. However, when processing

plastics, the problem of sorting waste is important, which complicates the processing of plastic mixtures and reduces the efficiency of using these technologies.

A search was conducted for new approaches in the processes of recycling and processing of polymer waste, which will allow to implement the principles of cyclical use of materials.

The features of the processes of processing different types of polymer materials by mechanical and chemical processing methods with preliminary sorting by type were considered. The possibilities of reusing the obtained products of processing polymer materials were established. The possibility of using biopolymers to solve the problem of recycling polymer waste was analyzed. The possibility of applying the principles of a circular economy to the organization of processing of biopolymer waste was considered. The possibility of effectively combining complex solutions in the direction of polymer waste management while implementing the principles of lean production was shown.

A comprehensive approach to the processing of synthetic and biopolymer polymer waste by converting them into products suitable for reuse using modern methods and approaches, digital technologies and new concepts was proposed. The use of digitalization elements in organizing the processing of polymer waste will allow these technologies to be transferred to the next stage of development to ensure sustainable development and improve the environmental situation.

Keywords: *polymer waste, circular economy, recycling technologies, synthetic polymers, biodegradable polymers.*

Савчук Богдан Петрович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, bohdan.sav95@gmail.com

Пушкаръов Денис Вікторович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, global23412@gmail.com

Стаття подана 22.01.2025