

ШИЛОВИЧ Т.Б., к.т.н., доц.; ОМЕЛЬЧУК І.В., студентка  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕНУ В УКРАЇНІ ТА ШЛЯХІВ ЇХ ПОДОЛАННЯ У СВІТІ

*Проведено аналіз сучасних проблем утилізації поліетилену, що пропорційно зв'язані з ростом кількості міського населення та споживацьких потреб людства. Широке розповсюдження поліетилену через значний спектр сфер його використання є однією з причин росту кількості відходів. Визначено, що зменшення обсягів відходів можна досягнути шляхом впровадження циркулярної економіки або використання відходів ПЕ як альтернативних матеріалів, зменшення зменшення кількості матеріалів для виробництва пластмасових виробів, продовження терміну служби продуктів шляхом їх повторного використання, щоб відкласти утилізацію, де це можливо.*

**Ключові слова:** поліетилен, утилізація, переробка, рециклінг, піроліз

**DOI:** 10.20535/2617-9741.1.2021.228143

© Шилович Т. Б., Омельчук І. В., 2021.

**Постановка проблеми.** Урбаністичний стиль життя тісно пов'язаний із розвитком будівництва, автомобілебудування, виробництва пакувань, електроніки; підвищенням рівня доходів у країнах, що розвиваються; заміною металевих виробів пластмасовими аналогами [1]. За даними агентства Markets and Markets (США), світовий ринок упаковки щорічно зростає на 3,5%. Протягом 2015-2019 рр. його сукупні обороти зросли з 843,8 до 914,7 млрд. доларів США та очікується, що до 2021 року глобальний попит на поліетилен (ПЕ) сягне 332,4 млн т. Інша сторона науково-технічного прогресу – відходи як виробництва, так і побутові.

Усвідомлення проблеми накопичення відходів та їх впливу на навколишнє середовище сприяє пошуку нових способів повторного використання та зменшення шкідливого впливу використаних пластиків.

**Аналіз попередніх досліджень.** Загальною науковою проблемою є складність процесу утилізації використаних виробів з полімерних матеріалів та істотний негативний вплив на навколишнє середовище. Цій проблемі присвячено багато наукових праць та публікацій в ЗМІ [2-13].

Високий попит на ПЕ обумовлений його масовим використанням як пакувальний матеріал завдяки гнучкості, тепло- і електроізоляційним та бар'єрним властивостям, хімічній та термічній стійкості, легкості переробки та, головне, - доступності та низькій вартості. Для виготовлення упаковки використовують понад 35% всього ПЕ, що виготовляється. Іншими сферами його застосування є виготовлення електроізоляційних матеріалів; гідроізоляційних матеріалів; трубопроводів для води, харчових і технічних рідин і, навіть, газу; теплозахисних і шумоізолюючих матеріалів для будівництва, влаштуванні комунікацій, приладо- і машинобудування; деталей різної побутової та промислової техніки; з деяких видів ПЕ медичних протезів, зовнішніх і навіть внутрішніх; бронежилетів [3].

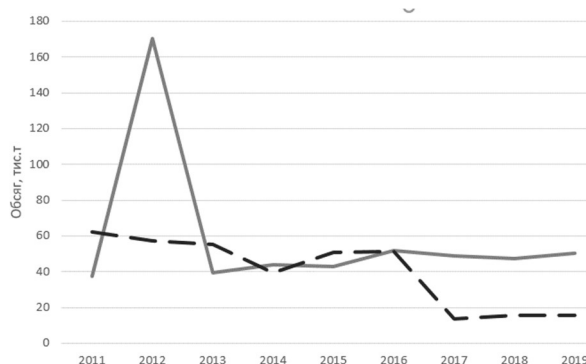
Широке розповсюдження та обмежений термін використання значного спектру виробів з ПЕ, наприклад, одноразових пакетів, має і іншу сторону – велика кількість відходів, що шкідливо впливають на природу, викликаючи забруднення навколишнього середовища. За даними Міністерства розвитку громад та територій України за 2019 рік в Україні утворилося 53 млн. м<sup>3</sup> побутових відходів, що становить понад 10 млн. т і лише 6,1% з них перероблено та утилізовано. Враховуючи, що в Україні за перше півріччя 2020 року обсяг виробництва лише виробів домашнього вжитку з пластмас, не враховуючи посуду та санітарно-технічних виробів, становив 4795,6 тис.т, а поліетиленових мішків та пакетів – 29,4 тис.т, то обсяг відходів ПЕ вражає, лише 10% з яких переробляється, решта – накопичується на полігонах чи сміттєзвалищах. Це призвело до того, що 1163 сміттєзвалища (19,2%) або перезавантажені, або не відповідають нормам екологічної безпеки. [4-6].

Метою статті є аналіз існуючих способів повторного використання та утилізації виробів з ПЕ та можливість їх запровадження в Україні.

**Виклад основного матеріалу.** Найпоширенішим за виробництвом і застосуванням пластиком є поліетилен. Обсяг виробів з ПЕ на світовому ринку становить до 48%, тоді як виробів з ПЕТ – 13% [7].

Поліетилен – це продукт полімеризації етилену  $(-CH_2-CH_2-)_n$ . В природі сполука майже не зустрічається, а в промисловості його отримують методами крекінгу високомолекулярних складових нафти, дегідрування етану та дегідратації етилового спирту [8]. Поліетилен – небіорозкладний пластик, і без застосування технологій розкладання лише при розпаді на фрагменти з низькою молекулярною масою, він може бути асимільований мікроорганізмами. У зв'язку з цим, розклад ПЕ триває щонайменше 200 років. Протягом цього часу використані вироби з поліетилену зберігаються на полігонах та виділяють шкідливі речовини, які потрапляють в ґрунт та ґрунтові води. Хімічні речовини, такі як бісфенол А, фталати і антипірени які додаються в ПЕ при його виробництві для надання необхідних властивостей, негативно впливають на здоров'я живих організмів, особливо на ендокринну систему. Деякі токсичні мономери спричиняють розвиток онкологічних хвороб та проблем репродуктивної системи [9].

Обсяг утворених пластикових відходів перевищує кількість утилізованих майже в 1,5 раз. До того ж, як показано на рис.1 за останні кілька років співвідношення утилізованих та утворених відходів значно зменшилося [5].



— - обсяг утворених відходів; --- - обсяг утилізованих відходів;

Рис. 1 – Обсяг утворених та утилізованих пластикових відходів протягом 2011-2019 рр.

Це вимагає пошуку нових дешевших та ефективніших способів утилізації пластикових відходів.

Біорозкладанню ПЕ можуть сприяти плісняві грибки *Penicillium simplicissimum*, які здатні за три місяці частково утилізувати поліетилен, попередньо оброблений азотною кислотою. Відносно швидко розкладають поліетилен бактерії *Nocardia asteroides*. Деякі бактерії, що мешкають у кишечнику південної комірної вогневки (*Plodia interpunctella*), здатні розкласти 100 мг поліетилену за вісім тижнів. Гусениці бджолиної вогневки (*Galleria mellonella*) можуть утилізувати поліетилен ще швидше [11].

Для зменшення негативного впливу використаного пластику, відходи переробляють. Переробка пластику – це процес збирання відходів пластмаси та їх переробка у корисні продукти. Існує кілька типів процесів переробки ПЕ. Це первинна, вторинна, третинна та четвертинна переробка.

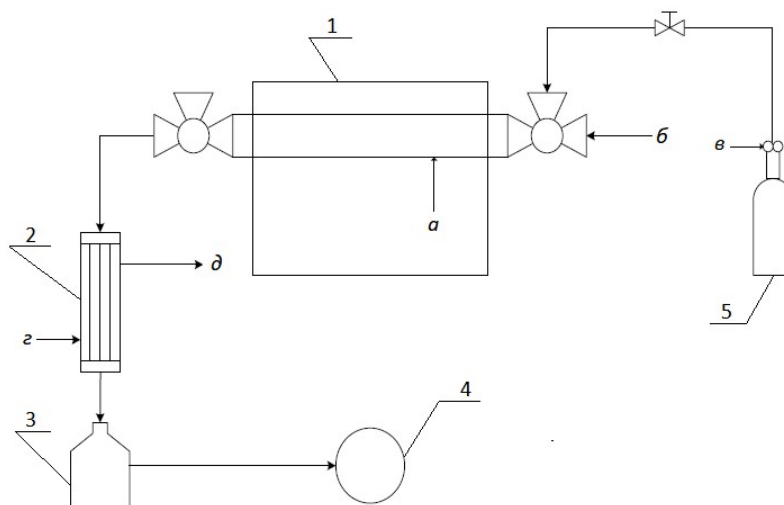
Первинна переробка відноситься до відновлення та повторного використання матеріалів без змін і, як правило, з тією ж метою. Це забезпечує простоту та низьку вартість, проте дозволяє переробляти лише чисті, незабруднені та однотипові відходи. Не всі вироби з ПЕ переробляються таким чином відповідно до вимог чистоти, а також існує обмеження кількості циклів для кожного виробу [8].

До вторинної переробки ПЕ належить термомеханічний рециклінг – виробництво гранул з відходів ПЕ. Через те, що структура і молекулярна маса полімеру задаються при його синтезі і надалі залишаються незмінними, технології гранулювання не дозволяють перетворювати один тип пластику на інший.

Багатошарові плівки, шитий поліетилен PEХ та відходи з високим ступенем деградації переробити у гранули важко, тому застосовують третинну переробку – рециркуляція - процес перетворення полімерів в мономери або їх часткової деполімеризації в олігомери шляхом хімічної реакції. Це досягається шляхом гідрування, гліколізу, газифікації, гідролізу, піролізу, метанолізу, хімічної деполімеризації, термічного

крекінгу, каталітичного крекінгу і риформінгу, фотодеградації, деградації ультразвуком, розкладання в мікрохвильовому реакторі полімеру. Отримані мономери можуть бути використані для нової полімеризації для відтворення вихідного або близького за структурою полімеру [11].

Піроліз – процес термічного розкладу полімеру при нагріванні органічних речовин до температури 300-900°C без доступу кисню [13]. Для ПЕ та ПП температура піролізу становить 450°C, для ПС нижча – 320°C. Для збільшення ефективності піролізу використовують різноманітні каталізatori, наприклад zeolite, Y-zeolite, ZSM-5, FCC і MCM-41. Процес піролізу складається з трьох стадій: ініціювання, поширення та завершення. На перших двох стадіях процесу піролізу отримують горючі гази, важкі парафіни та смоли. На третій стадії важкі вуглеводневі фракції розкладаються на більш легкі. Принципова схема піролізу зображена на рис.2. Система містить балон для продувки азотом та водоохолоджувальний конденсатор, що з'єднані з реактором електричної нагрівальної печі. Температура в системі вимірюється термопарами, що встановлені на виході продуктів піролізу та на стінці реактора. Перед початком процесу систему очищують газоподібним азотом. Гази, що охолоджуються в процесі піролізу, охолоджуються в конденсаторі після чого рідкі продукти та неконденсовані гази збираються окремо в накопичувачі рідини та газозбірнику відповідно.



1 – Електрична нагрівальна піч; 2 – конденсатор; 3 – накопичувач рідини; 4 – газозбірник;  
5 – балон для продувки азотом; а – реактор; б – подача пластику; в – регулятор; з – вхід води на охолодження;  
д – вихід охолодженої води

**Рис. 1 – Обсяг утворених та утилізованих пластикових відходів протягом 2011-2019 рр.**

Продукти піролізу залежать від ступеня розгалуження ПЕ, його молекулярної маси, температури та типу реактора, каталізатора, який використовується та відрізняються високою якістю і екологічною безпекою, оскільки сировина не містить сполук фосфору, сірки та азоту. Газоподібні продукти піролізу - це продукти олефінового ряду – етилен, пропілен та ін.; циклічні сполуки – бензол, толуол; іноді – водень та метан. До рідких належать аліфатичні вуглеводні. В основному продуктами піролізу з максимальним виходом дизельного палива є 18% неконденсованих газів, 82% рідких продуктів і менш ніж 1% чистого вуглецю. Промислові піролізні установки дають 40-70% газу та 30-60% піролізних масел. Частка газів в загальному випадку збільшується зі зростанням температури в реакторі [8,10].

Піроліз також може бути застосований для отримання високоякісних вуглецевих нанотрубок (ВНТ) із унікальними фізичними та хімічними властивостями. Ця техніка полягає у змішуванні пластмас із каталізатором в одному реакторі або пропусканні продуктів піролізу пластмас через реактор з каталізатором. ВНТ можна класифікувати залежно від їх графенових листів як одностінні ВНТ (SWCNT) та багатостінні ВНТ (MWCNT), які є безперервними циліндрами графенового листа з гексагональними одиницями, що складаються з 2-пов'язаних атомів вуглецю та кількох графенових листів відповідно. Відходи пластмас є

одними з джерел вуглецю, які дозволяють виробляти ВНГ. Таким чином можна вирішити як проблему відходів, так і отримати необхідний продукт [11].

Четвертинна переробка – рекуперация енергії, яка полягає у процесах відновлення вмісту енергії в поліетилені. Найбільш простим способом зменшення обсягу пластмасових відходів, який включає рекуперацию енергії є спалювання. Цей спосіб генерує значну енергію з поліетилену (питома теплота згоряння ПНЩ – 47 МДж/кг, ПВЩ – 46,7МДж/кг [14]), але він не є екологічно прийнятним через ризик для здоров'я від токсичних речовин, що виділяються. При нагріванні поліетилену можливе виділення в атмосферу летючих продуктів термоокислювальної деструкції. При термічній деструкції поліетилену в присутності повітря або кисню утворюється більше низькокиплячих сполук, ніж при термічній деструкції у вакуумі або в атмосфері інертного газу.

Під час деструкції на повітрі, в атмосфері кисню або в суміші, що складається з  $O_2$  і  $O_3$ , при 150-210°C показало, що утворюються гідроксильні, перекисні, карбонільні та ефірні групи. При нагріванні поліетилену при 430 °C відбувається дуже глибокий розпад на парафіни (65 - 67%) і олефіни (16 - 19%). Крім того, в продуктах розкладання містяться: окис вуглецю (до 12%), водень (до 10%), вуглекислий газ (до 1,6%). Це зумовлює найнижчу економічну ефективність спалювання порівняно з іншими процесами утилізації через значну вартість газоочисного обладнання [8,12].

Зменшення обсягів відходів та збереження природних ресурсів є метою впровадження циркулярної економіки, яка заснована на принципі 3-R: Reduce (скорочення використання ресурсів і надання переваги відновлюваним матеріалам), Reuse (максимально можлива ефективність використання продуктів), Recycle (відновлення побічних продуктів й відходів для їх повторного використання) [2]. Стабільний ріст та відсутність можливості переробки усіх відходів приводить до пошуку альтернативних методів використання використаного поліетилену. Ріноманіття та універсальність ПЕ при неправильному використанні становить загрозу для довкілля, що зобов'язує використовувати даний ресурс, слідуючи цілям сталого розвитку. Нові підходи до використання відходів ПЕ як альтернативних матеріалів для програм розвитку міст дозволить скоротити викиди газу і споживання викопного палива.

Одним з нових способів повторного використання поліетилену є використання поліетиленових пакетів для укріплення ґрунту в геотехнічних схемах підпірних стін, фундаментів, основ доріг, насипів, стабілізації укосів. В результаті включення смужок з поліетиленових пакетів в ґрунт збільшується опір ґрунту зсуву, несуча здатність і покращуються характеристики просідання ґрунту [15]. Успішне застосування такого способу може скоротити кількість пластикових відходів, які утилізуються на звалищах та полігонах, що матиме екологічну вигоду в результаті ефективнішого використання природних ресурсів і зменшення викидів вуглекислого газу. Додавання волокон поліетилену до бетону істотно вдосконалює матеріал, збільшуючи його показники в випробуваннях на розтяг-стиск, опору розтріскуванню, втомлюваності, стійкості та пластичності.

Інша сфера застосування використаного поліетилену – будівництво доріг [16]. Асфальт має здатність до руйнування при високих та розтріскування при низьких температурах У 2002 році інженери індійської компанії KK Plastic Waste Management Ltd запатентували технологію застосування пластикових відходів при асфальтуванні доріг. Компанія створила полімерну суміш з перероблених поліетиленових пакетів, стаканчиків та ПЕТ-пляшок, яка заміняє 8% бітуму складі асфальтобетонної суміші (вміст бітуму в звичайному асфальті 10-60%) і покращує характеристики дорожнього покриття. Термін експлуатації доріг, що побудовані на основі цього матеріалу, збільшений в 2 рази. Побудувавши 2 тис.км доріг KK Plastic Waste Management Ltd переробили 8 тис. тон пластикових відходів. Згодом дана технологія була вдосконалена шотландською компанією MacRebur. Вони випускають полімерні гранули та пластівці як високоефективні добавки для виробництва асфальту. Модифікація підвищує міцність покриття на 60% та збільшує термін служби дороги у 10 разів. Лідером виробництва пластикового асфальту є Канада. Асфальт за технологією компанії Green Mantra містить до 20% пластику.

Вуглекислий газ ( $CO_2$ ), що виділяється в результаті спалювання викопного палива, є однією з основних причин глобального потепління та зміни клімату. Уловлювання та зберігання  $CO_2$ , що утворюється під час спалювання на вугільних або газових електростанціях, є привабливим для зменшення викидів  $CO_2$  в атмосферу. Існують економічні та технічні процедури, яких потрібно дотримуватися для твердих адсорбентів, що використовуються для уловлювання  $CO_2$  до та після згоряння. Адсорбент повинен потрапити в газовий потік і залишити реактор при температурі приблизно 40°C і загальному тиску близько 30–45 бар. Кращий адсорбент повинен мати добру селективність щодо  $CO_2$ , щоб мати можливість адсорбувати його серед інших

компонентів в потоці газу, мати велику сорбційну здатність, щоб бути економічно вигідним і мати хорошу фізико-хімічну стабільність, а саме стійкість до вологи, тепла і кислих газів, таких як сірководень [11]. Поєднання високої пористості та хорошої хімічної стабільності можна знайти в мікропористих полімерах. Зважаючи на ці вимоги, було створено композиційний матеріал для адсорбції CO<sub>2</sub>.

Зменшенню обсягів відходів сприяють дематеріалізація, використання товару як послуги взамін традиційній моделі продажу, використання відходів одного виробництва як сировини для іншого [18]. В рамках Плану дій з циркулярної економіки в 2017 році в Україні була прийнята Національна стратегія поводження з відходами. Вона передбачає впровадження системного підходу до поводження з відходами, створення нових потужностей із переробки вторсировини, зменшення обсягу захоронення ТПВ [2]. Та вирішення проблеми утилізації відходів ПЕ потребує не лише впровадження стратегій і створення нових методів утилізації та повторного використання, а й відповідального ставлення кожної людини планети.

**Висновки.** Поліетилен – один із майже незамінних матеріалів у житті людини, тому пошуки нових способів його утилізації завжди будуть актуальними. Пластиковими виробами необхідно відповідально керувати протягом усього їхнього життєвого циклу, щоб максимально зменшити їхній вплив на навколишнє середовище. Повторне використання та переробка поліетилену, відновлення енергії – основні стратегії управління відходами з поліетилену. Найбільш бажана стратегія зменшення кількості відходів включає заходи зі зменшення кількості матеріалів, що використовуються у виробництві пластмасових виробів, продовження терміну служби продуктів шляхом їх повторного використання, щоб відкласти утилізацію, де це можливо. Запровадження технологій переробки поліетилену може набути поширення в Україні.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективним є впровадження нових та ефективних методів утилізації відходів пластмас в промисловості України та дослідження можливості отримання наноматеріалів із відходів ПЕ.

#### **Список використаної літератури**

1. National Research Council. Polymer Science and Engineering: The Shifting. Research Frontiers / Washington, DC: The National Academies Press, 1994. 108 p.
2. Д. Нечитайло. З чистого аркуша: як працює та чим вигідна циркулярна економіка / URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2020/09/2/664626/>
3. Применение полиэтилена. URL: <https://polymers.com.ua/> дата звернення: 05.11.2020
4. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік/ Міністерство розвитку громад та територій України. Офіційний веб-сайт Міністерства. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> дата звернення: 09.12.2020
5. Державна служба статистики України: <http://www.ukrstat.gov.ua/> дата звернення: 09.12.2020
6. А.С. Новосёлов. Управление отходами: методические указания для выполнения курсового проекта «Обустройство полигона твёрдых бытовых отходов» / сост. А.С. Новосёлов. – Вологда: ВоГТУ, 2013. – 48 с.
7. І.В. Гамова. Ринок полімерної упаковки / І. В. Гамова // Вісник Одеського національного університету. Серія : Економіка. - 2017. - Т. 22, Вип. 10. - С. 86-90.
8. Переработка полиэтилена: технология вторичного использования отходов URL: <https://recycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov>, дата звернення: 05.11.2020
9. В. Доскіч. Друге життя для поліетилену/ URL: <https://www.unian.ua/ecology/1709691-druge-jittya-dlya-polietilenu.html>, дата звернення: 05.11.2020
10. Feng Gao. Pyrolysis of waste plastics into fuels // A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical and Process. Engineering University of Cantenbery -2010. – 216 p.
11. Merina Paul Das, Santosh Kumar. An approach to low-density polyethylene biodegradation by *Bacillus amyloliquefaciens*/ URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-014-0205-1>, дата звернення: 05.11.2020
12. Mădălina Elena Grigore. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers, 2017 – 11 p.
13. О.М. Синюшкін, Ю.В. Князев. Методичні рекомендації до вивчення дисципліни «Технологія знешкодження і утилізація газових і твердих відходів у неорганічних виробництвах для студентів

- спеціальності 7.05130101 – «Хімічні технології неорганічних речовин» хіміко-технічного факультету / Уклад.: О.М.Синюшкін, Ю.В.Князев – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 84 с.
14. Питомая теплота згоряння речовин таблиця. Теплотворна здатність різних видів палива./ URL: <https://bykm.ru/uk/dokumenty-dou/udelnaya-teplota-sgoraniya-veshchestv-tablica-teplotvornaya/> , дата звернення: 05.11.2020
  15. Meltem Okan, Halil Murat Aydin, Murat Barsbay. Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review/ URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jctb.5778>, дата звернення: 05.11.2020
  16. Kalumba D., Chebet F.C.. Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement insandy soils / URL: [https://www.academia.edu/7878594/Utilisation\\_of\\_polyethylene\\_plastic\\_shopping\\_bags\\_waste\\_for\\_soil\\_improvement\\_in\\_sandy\\_soils](https://www.academia.edu/7878594/Utilisation_of_polyethylene_plastic_shopping_bags_waste_for_soil_improvement_in_sandy_soils), дата звернення: 05.11.2020
  17. Дорожное покрытие из пластика — качественные дороги и забота о природе/ URL: <https://rcycle.net/plastmassy/dorozhnoe-pokrytie-iz-plastika-kachestvennyye-dorogi-i-zabota-o-prirode>, дата звернення: 05.11.2020
  18. О.П. Хохотва. Збалансований розвиток – можливості й шляхи досягнення : підручник / О.П.Хохотва, Л.І.Бутченко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 256 с.
  19. Watkins, E., Romagnoli, V., Kirhensteine, I., Ruckley, F., Kreißig, J., Mitsios, A. and Pantzar, M., Support to the Circular Plastics Alliance in establishing a work plan to develop guidelines and standards on design-for-recycling of plastic products, Saveyn, H. and Garbarino, E. editor(s), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-25373-0, doi:10.2760/936397, JRC122453.
  20. Г. Тунберг. No One Is Too Small to Make a Difference[d] : [англ.]. — Лондон : Penguin Books, 2019,- 112 с.

Надійшла до редакції 28.10.2020

---

**Shilovich T. B., Omelchuk I. V.**

## **ANALYSIS OF PROBLEMS OF POLYETHYLENE UTILIZATION IN UKRAINE AND WAYS TO OVERCOME THEM IN THE WORLD**

*Polyethylene is the most widely produced and used plastic in the world and is an integral part of the urban lifestyle of a person. The high demand for PE is given to its mass use as a packaging material due to flexibility, heat and electrical insulation and barrier properties, chemical and thermal stability, ease of processing and, most importantly, accessibility and low cost. More than 35% of all PE produced is used to make the package. Other areas of its application are electronics, mechanical engineering, construction, light industry. Another side of scientific and technological progress is the problem of waste accumulation and its negative impact on the environment and human health. With the development of industry in Ukraine, the amount of waste is growing. Conversely, the amount of recycled, i.e. reused plastic articles, is reduced.*

*Polyethylene is an ethylene polymerization product and it is hardly naturally occurring. This is non-biodegradable plastic, the decay of which lasts at least 200 years, releasing harmful substances into the environment. To reduce the negative effect of the used polyethylene, it is disposed of by burial or by external exposure to physicochemical or biofactor. Some fungi and bacteria can contribute to the biodegradation of PE by releasing chemicals that can break down long chains of polymers.*

*The problem of plastic waste accumulation is related to the limited shelf life of many plastic products and the complexity and high cost of plastic recycling processes. Plastic recycling is the process of collecting plastic waste and processing it into useful products. There are several types of PE processing processes. This is primary, secondary, tertiary and quaternary processing. Primary processing - reuse of the product, as a rule, for the same purpose. Secondary processing - pellet production. Thermoset polymer cannot be recycled into granules, so they are depolymerized into oligomers by chemical reaction. This is tertiary processing. One of the methods of recycling the polymers is pyrolysis. This is the thermal scheduling process of the organic substances that the polymers consist of. For polyethylene, this temperature is about 450 C. To increase the efficiency of the process, for example, to accelerate it or reduce the temperature in the reactor, a variety of catalysts can be used.*

*Pyrolysis products depend on the degree of branching of PE, its molecular weight, temperature and type of reactor, catalyst, which is used and is characterized by high quality and environmental safety, since the feedstock does not*

contain phosphorus, sulfur and nitrogen compounds. The simplest example of recovery (quaternary processing) is the burning of PE. Incineration releases a significant amount of energy from polyethylene, the heat of combustion of which is about 47 MJ/kg. This method is environmentally dangerous because the thermal degradation of PE in the presence of oxygen releases cellular compounds that are dangerous to human health. The cleaning of the combustion gases is expensive, resulting in the lowest economical combustion efficiency among all recycling methods.

Waste reduction can be achieved by introducing a cyclical economy based on the principle of 3-R: Reduce (reducing the use of resources and providing the advantage of renewable materials), Reuse (maximum possible product efficiency), Recycle (recovery of by-products and waste for their reuse). The use of PE waste as alternative materials for urban development programs will reduce gas emissions and fossil fuel consumption. Dematerialization, the use of goods as a service instead of the traditional model of sale, the use of waste from one production as a raw material for another contribute to the reduction of waste volumes too.

An example is the use of PE waste to strengthen the soil in geotechnical schemes of retaining walls, foundations, road foundations, embankments, and slope stabilization. As a result of including strips of polyethylene bags in the soil, soil resistance to landslide increases, bearing capacity and soil subsidence characteristics are improved. Another area is the construction of roads where plastic waste is used to increase the life of roads. The life of roads built from plastic-modified asphalt is growing several times. Such a coating is more resistant to damage, reduces the cost of raw materials and industries, is much safer for the environment than ordinary asphalt. The use of plastic waste instead of specially made additives will help significantly improve the environmental situation in the country.

The best waste reduction strategy in Ukraine is measures to reduce the quantity of materials for the production of plastic products, extend the service life of products by reusing them in order to postpone disposal where possible.

**Keywords:** polyethylene, utilization, processing, recycling, pyrolysis

#### References

1. National Research Council. Polymer Science and Engineering: The Shifting. Research Frontiers / Washington, DC: The National Academies Press, 1994. 108 p.
2. Nechytailo D.(2020). "From scratch: how the circular economy works and what benefits", *Ekonomichna pravda*. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2020/09/2/664626/> (date of application: 13.12.2020)
3. "Use of polyethylene", *LCC Polymers*. URL: <https://polymers.com.ua/> (date of application: 05.11.2020)
4. Status of domestic waste management in Ukraine for 2019, *Ministry of Development of Towns and Territories of Ukraine*. Official website of the Ministry. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> (date of application: 9.12.2020)
5. On the socio-economic situation of Ukraine for January-June 2020/ State Statistics Service of Ukraine, *as edited by I.E. Werner*, Kiev, 2020 - 65 p. URL: [https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat\\_u/2020/dop/08/dop\\_062020.pdf](https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2020/dop/08/dop_062020.pdf) (date of application: 9.12.2020)
6. Novosjolov A.S. (2013). Waste management: methodological guidelines for the implementation of the course project "Arrangement of a landfill of solid household waste." A.S. Novosjolov. – Vologda: VOGTU- 48 p.
7. Hamova I.V.(2017). "Polymer Packaging Market". Bulletin of Odessa National University. Series: *Economics*. – Vol. 22 Issue 10. - p. 86-90.
8. Polyethylene Recycling: Waste Recycling Technology URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov> (date of application: 9.12.2020)
9. Doskich V.. Second life for polyethylene / URL: <https://www.unian.ua/ecology/1709691-druga-jittya-dlya-polietilenu.html>, (date of application: 05.11.2020)
10. Feng Gao. Pyrolysis of waste plastics into fuels // A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical and Process. Engineering University of Cantenbery -2010. – 216 p.
11. Merina Paul Das, Santosh Kumar. An approach to low-density polyethylene biodegradation by *Bacillus amyloliquefaciens*/ URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-014-0205-1>, (date of application: 05.11.2020)
12. Mădălina Elena Grigore (2017). "Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers", – 11 p.
13. Syniushkin O.M., Kniaziev Yu.V. (2010). "Methodological recommendations for the study of the discipline "Neutralization technology and disposal of gas and solid waste in inorganic industries for students of specialty 7.05130101 -"Chemical technologies of inorganic substances" of the Faculty of Chemistry and Technology" / Origin.: O.M.Syniushkin, Yu.V Kniaziev, Kyiv, KPI – 84 p.

14. Specific heat of combustion of substances, Table Calorific value of different fuels./ URL: <https://bykm.ru/uk/dokumenty-dou/udelnaya-teplota-sgoraniya-veshchestv-tablica-teplotvornaya/> (date of application: 05.11.2020)
  15. Meltem Okan, Halil Murat Aydin, Murat Barsbay. Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review/ URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jctb.5778>, (date of application: 05.11.2020)
  16. Kalumba D., Chebet F.C.. Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement insandy soils / URL: [https://www.academia.edu/7878594/Utilisation\\_of\\_polyethylene\\_plastic\\_shopping\\_bags\\_waste\\_for\\_soil\\_improvement\\_in\\_sandy\\_soils](https://www.academia.edu/7878594/Utilisation_of_polyethylene_plastic_shopping_bags_waste_for_soil_improvement_in_sandy_soils), (date of application: 05.11.2020)
  17. Дорожное покрытие из пластика — качественные дороги и забота о природе/ URL: <https://rcycle.net/plastmassy/dorozhnoe-pokrytie-iz-plastika-kachestvennye-dorogi-i-zabota-o-prirode>, дата звернення: 05.11.2020
  18. Khokhotva O.P.(2019). *Balanced Development - Opportunities and Ways to Achieve: Textbook*/A. P. Khokhotva, L.I. Butchenko. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Publishing house "Polytechnic". – 256 p.
  19. Watkins, E., Romagnoli, V., Kirhensteine, I., Ruckley, F., Kreißig, J., Mitsios, A. and Pantzar, M., (2020). “Support to the Circular Plastics” Alliance in establishing a work plan to develop guidelines and standards on design-for-recycling of plastic products, Saveyn, H. and Garbarino, E. editor(s), *Publications Office of the European Union, Luxembourg*, ISBN 978-92-76-25373-0, doi:10.2760/936397, JRC122453.
  20. Tunberg G.T. (2019). “No One Is Too Small to Make a Difference”[d]. London: *Penguin Books* –112 p.
-