Переробка сировини та ресурсозбереження

УДК [628.47+658.567]-036(048.83)

DOI: 10.33070/etars.2.2021.05

Мікульонюк І.О., докт. техн. наук, проф., orcid 0000-0001-8268-7229
**Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ**
просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

Стан та перспективи поводження з твердими полімерними відходами

Наведено основні дані щодо обсягів та структури твердих відходів у світі та в Україні. Показано необхідність вдосконалення способів поводження з твердими полімерними відходами як одними з найбільш небезпечних для довкілля, але перспективних з точки зору використання їхніх властивостей. Запропоновано розгорнуту класифікацію методів поводження з твердими полімерними відходами, та наведено критичний аналіз кожного з них. Особливу увагу приділено методам утилізації твердих полімерних відходів, зокрема рециклінгу, який дає можливість ефективно використовувати вторинну полімерну сировину безпосередньо за призначенням. Розглянуто особливості фізичних, хімічних, біологічних та комбінованих методів перероблення, зокрема спалювання, газифікації, піролізу, плазмового розкладання полімерних відходів, а також їх розкладання під дією сонячних променів та мікроорганізмів. Запропоновано основні способи вирішення в Україні проблеми поводження з твердими полімерними відходами. *Бібл. 83, рис. 3, табл. 3.*

Ключові слова: тверді відходи, полімери, забруднення довкілля, поводження з відходами, утилізація.

Однією з глобальних проблем початку третього тисячоліття є величезні обсяги полімерних відходів споживання й виробництва. Світове виробництво полімерів зростає експоненціально: від 2 млн т у 1950 р. до 381 млн т у 2015 р. [1] (за іншими оцінками, ці цифри становлять 2,3 млн т й 448 млн т відповідно [2]). У результаті на одного мешканця планети у 2015 р. було одержано від 75 кг [1] до 88 кг полімерів [2]. За оцінками експертів, загальний обсяг виробництва полімерів подвоїться вже у 2050 р. До кінця 2017 р. людство виготовило 9,2 Гт полімерів, що

еквівалентно масі 900 тис. Ейфелевих веж або 88 млн синіх китів, або 1,2 млрд слонів [3].

Світове виробництво полімерів й спалювання полімерних відходів призвело у 2017 р. до потрапляння в атмосферу близько 400 млн т CO₂, у тому числі 74 млн т з Європи, при цьому частка перероблюваних полімерних відходів становила всього 27,3 % [4].

Внаслідок тривалого (у більшості випадків) розкладання полімерних відходів у природних умовах вони не лише забруднюють навколишнє середовище, а й згубно впливають на живі орга-

нізми. І це стосується не лише відходів або їхніх фрагментів значних розмірів (на кшталт полімерних пакетів або пляшок з-під напоїв), а й так званого мікропластику, еквівалентний розмір частинок якого менше 4,75 мм [1] (доцільніше вважати мікропластик з частинками розміром від 1 мкм до 5 мм [5]). Якщо наприкінці другого тисячоліття основною проблемою вважалося забруднення полімерними відходами суходолу, то згодом стрімкими темпами почалося забруднення світового океану [6]. Вважається, що в океані опинилося від 32,115 до 180,558 тис. т (або 1–7 %) поліетилену, який було експортовано у 2017 р. з Європи [7].

Численні шокуючі фотознімки облупланих залишками поліамідних рибальських сіток або поліетиленовими плівками морських тварин просто вражають. При цьому заручниками полімерних відходів представники морської фауни стають не лише ззовні, а й зсередини: частинки мікропластику, які вони ковтають безпосередньо або опосередковано, коли живляться іншими істотами, забруднюють їхній організм. У результаті загибель морських тварин та риб істотно прискорюється [8]. Не меншої шкоди мікро- та наночастинки полімерів завдають людині [9].

Іншою проблемою більшості промислово розвинених країн є певні труднощі з сировиною для виробництва різноманітної продукції. Тому натеper істотно зростає роль вторинної сировини, у тому числі у промисловості перероблення полімерних матеріалів [10–12]. Підґрунтям цього явища є не лише певні труднощі із забезпеченням промисловості матеріальними ресурсами, але й наявність ефективних технологій перероблення промислових й побутових відходів [13].

В Україні (без урахування тимчасово окупованих територій, а також Автономної Республіки Крим разом з м. Севастополь) обсяги утворення твердих побутових відходів у 2016 р. становили 49 млн м³ (близько 11 млн т). Домінуючим способом поводження з побутовими відходами залишається їх вивезення та захоронення на полігонах та сміттєзвалищах. Було перероблено лише 5,8 % утворених побутових відходів, решту розміщено на полігонах та сміттєзвалищах. Крім побутових, у 2015 р. також було утворено 312 млн т промислових відходів [14]. Трохи згодом, у 2019 р., утворилося майже 53 млн м³ побутових відходів, або понад 10 млн т, які було захоронено на 6000 сміттєзвалищ та полігонів загальною площею майже 9000 га [15].

Масова частка полімерних матеріалів у загальному обсязі відходів доходить до 10–16 % [16–18], а термін їх розкладання у природних умовах може досягати 500 років [19].

Щорічно в Європі утворюється у середньому 25 млн т полімерних відходів. У 2014 р. 29,7 % з них було ефективно перероблено, 39,5 % піддано енергетичному утилізуванню, а решту 30,8 % було захоронено [20].

Станом на 2015 р. у Російській Федерації було утилізовано 101.594,512 т та знешкоджено 2447,925 т полімерних відходів (при утворенні 1067.762,133 т). У структурі полімерних відходів поліетилен (ПЕ) становив 34 %, поліетилентерефталат (ПЕТФ) — 20 %, ламінований папір — 17 %, полівінілхлорид (ПВХ) — 14 %, полістирол (ПС) — 8 %, поліпропілен (ПП) — 7 %. При цьому найбільшим рівнем збору й переробки характеризуються відходи з ПЕ — 20 %, ПВХ — 10 %, ПС — 12 %, ПП — 17 %, ПЕТФ — 12 %, а відходи з ламінованого паперу майже взагалі не переробляються [21].

Тому раціональне поводження з полімерними відходами перетворюється на одну з основних соціально-економічних та технічних проблем розвитку сучасного виробництва [22].

Мета досліджень

Мета роботи полягає у критичному аналізі стану й перспектив поводження з твердими полімерними відходами.

Основні операції поводження з твердими полімерними відходами

Поводження з твердими полімерними відходами — це дії, спрямовані на запобігання утворенню зазначених відходів, їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізування, видалення, знешкоджування та захоронювання [23].

Основні операції поводження з твердими полімерними відходами наведені нижче [23, 24].

1. Збирання відходів. Відходи збирають за допомогою їх вилучення з місць (об'єктів) утворення, сортування (за потреби) за заданими ознаками на однорідні складники, зберігання у спеціалізованих місцях (об'єктах) до забезпечення оброблення, перероблення, утилізування або видалення. Збирають та заготовлюють відходи за видами, марками, класами (категоріями)

небезпеки (зокрема токсичністю) для подальшого визначання найбільш оптимальних напрямів поводження з ними [12]. Змішування відходів, якщо це не передбачено технологічним регламентом, не допустиме.

2. Зберігання відходів. Зберігання відходів як їх тимчасове (до двох років) розміщення на території підприємств, установ, організацій (до їх утилізування або видалення). Зберігання відходів може мати такий характер:

- технологічно обумовлене, тобто зберігання у виробничих приміщеннях (цехах, дільницях, допоміжних спорудах при них тощо), що пов'язане з їх первинним збиранням та накопичуванням;

- проміжне (перед остаточним видаленням чи утилізацією), тобто зберігання на промислових площадках, у стаціонарних та нестаціонарних складських приміщеннях, під тимчасовим накриттям тощо.

3. Транспортування відходів. Транспортують відходи у непошкоджену пакованні, використовуючи транспортні засоби, призначені для відходів відповідного класу небезпеки.

4. Оброблення та перероблення відходів. При обробленні відходів застосовують фізичні, хімічні чи біологічні методи перетворювання (зокрема знешкоджування, кондиціювання, іммобілізування) для потреби підготовки їх до наступного безпечного перевезення, перероблення, утилізування чи видалення. Переробляють відходи для отримування з них матеріалів, призначених для використання у тих чи інших цілях, тобто утилізації. Обробляти та переробляти промислові відходи можна у місцях їх утворення (на підприємстві — утворювачі відходів), збирання, заготівлі, зберігання, утилізування або видалення, а також на спеціалізованих об'єктах.

Для оброблення та перероблення відходів можна використовувати широкий спектр механічних, гідромеханічних, тепломасообмінних, фізико-хімічних, біологічних та інших процесів. Під час вибору й адаптації зазначених процесів та технічних засобів їх забезпечення враховують граничні й номінальні значення показників, що змінюються у разі кондиціювання та знешкоджування, а також періодичність та обсяги утворення відходів. Для досягнення кінцевого результату оброблення чи перероблення промислових відходів в окремих випадках зазначені операції можуть проходити у декілька стадій, за допомогою сполучення різних процесів. Це обумов-

лено тим, що відходи є здебільшого полікомпонентними системами та для кожного компонента можна застосовувати спеціальні методи.

5. Утилізування відходів. Відходи утилізують для отримання з них тих чи інших матеріалів, а також енергії внаслідок їх економічно обґрунтованого та безпечного для здоров'я людей перероблення чи прямого використання або спалювання на базі наявних чи спеціально створених виробничих потужностей та технологічних процесів. Утилізація спрямована на повну або часткову заміну традиційних сировини, матеріалів та палива відходами, на вилучення з них цінних компонентів, на застосування відходів як шихтових матеріалів, напівфабрикатів тощо.

6. Видалення (усування) відходів. Видалення відходів — це операції, що не призводять до їхньої утилізації. Видалення спрямоване на знищення відходів або їх захоронення.

У сучасній політиці поводження з полімерними відходами розрізняють п'ятиступеневий ієрархічний порядок поводження з ними [25]: попередження виникнення; повторне використання; використання як вторинних матеріальних ресурсів; рекуперація енергії; остаточне розміщення.

З урахуванням світового досвіду поводження з полімерними відходами можна запропонувати розгорнуту класифікацію операцій поводження з твердими полімерними відходами (рис.1).

Попередження виникнення відходів

Основними способами попередження виникнення відходів є:

- 1) максимальне використання вихідних сировини й матеріалів без утворення відходів виробництва або з їх мінімізацією; прикладом може бути раціональне розкрюювання листового або плівкового матеріалу для вакуумформування продукції;

- 2) запобігання утворенню відходів; прикладом може бути «їстівна» упаковка харчових продуктів або заміна полімерних матеріалів для виготовлення продукції іншими матеріалами;

- 3) скорочення утворення відходів та зниження класу їхньої небезпеки у джерелах їх утворення; прикладом може бути використання обрізі пінополістирольних теплоізоляційних панелей, плит та листів для улаштування «засипної» теплоізоляції.

Зрозуміло, що попередження виникнення відходів у разі виготовлення полімерної продукції

Рис.1. Основні операції поводження з полімерними відходами.

Fig. 1. Basic operations of polymer waste management (handling).

у більшості випадків лише відтермінує процес видалення відповідних відходів, але не вирішує проблему в цілому.

Повторне використання відходів

Повторне використання — це процес повернення використаної продукції у корисний оборот. Навіть без додаткового оброблення у корисний оборот неодноразово (та без втрати спожив-

чих властивостей) можна повертати різноманітну полімерну тару.

Утилізування відходів

Полімерні відходи піддаються утилізації за трьома напрямками:

- 1) матеріальний (полімерно-сировинний);
- 2) сировинний;
- 3) енергетичний,

або за чотирма групами методів:

- 1) використання для виготовлення аналогічної продукції (тобто використання як первинної полімерної сировини);
- 2) використання для виготовлення іншої продукції, зазвичай зі зниженими експлуатаційними властивостями (тобто використання як вторинної полімерної сировини; рециклінг);
- 3) перероблення на хімічну сировину;
- 4) спалювання для одержання здебільшого теплової енергії.

Підготовка до проведення фізичних методів перероблення

Підготовка полімерних відходів до проведення фізичних методів перероблення полягає в їх фізичному (рідше хімічному чи біологічному) перетворюванні для їх підготовки до подальшого перероблення [26].

Вторинна полімерна сировина — це сировина, що складається з полімерних відходів виробництва та споживання, які призначені для повторного використання замість первинних сировини чи енергетичних ресурсів.

За принципом утворення вторинна полімерна сировина в Україні поділяється на три категорії: відходи виробництва; відходи споживання; змішані відходи виробництва й споживання [27].

Також вторинну полімерну сировину поділяють (табл.1):

- а) на класи — за характером процесів формування (відходи термопластичних полімерів та відходи термореактивних полімерів);
- б) на види — за вихідними полімерами (відходи поліолефінові, полістирольні, полівінілхлоридні, поліакрилатні, поліамідні, поліформальдегідні, полікарбонатні, поліефірні — термопласти, а також відходи амінопластів, фенопластів, склопластиків — реактопласти);
- в) на групи — за характеристикою полімерних відходів (поворотні й безповоротні відходи).

Відходи виробництва — це залишки сировини, матеріалів, напівфабрикатів, що утворилися під час виробництва продукції або виконання робіт та втратили цілком або частково вихідні споживчі властивості [28].

Відходи споживання — вироби та матеріали, що втратили свої споживчі властивості внаслідок фізичного або морального зносу [28].

Поворотні полімерні відходи — відходи виробництва й споживання, які після подрібнення можливо використовувати у тому самому виробництві як вторинний полімерний матеріал [27].

Безповоротні полімерні відходи — це відходи виробництва й споживання, які внаслідок часткової чи цілковитої втрати своїх властивостей не можуть бути повернуті для використання у процесі виробництва основної продукції або для технологічних потреб та потребують додаткових операцій з очищення, розділення, відмивання, модифікації та інших з метою одержання з них вторинних полімерних матеріалів [27].

Вторинну полімерну сировину потрібно відрізняти від вторинного полімерного матеріалу — полімерного матеріалу, отриманого в результаті оброблення вторинної полімерної сировини та призначеного для застосування замість первинного полімерного матеріалу під час виготовлення продукції.

Вторинний полімерний матеріал використовують у складі композицій з первинним полімером, полімер-полімерних композицій, а також як самостійну полімерну сировину [29]. Крім того, його можна використовувати у композиціях на основі іншого, крім полімерного, зв'язуючого, наприклад, асфальтобітумних будівельних композицій [27, 30, 31]. Додавання у бетон замість мінерального наповнювача полімерних відходів (до 10 %) еквівалентним діаметром до 10 мм підвищує ударну міцність бетону на 7 % [32]. Вторинний полімерний матеріал може бути додано до бетону у вигляді частинок, пластівців або волокон [33]. Дуже ефективним можуть бути будівельні конструкції, виготовлені з полімервмісного бетону, у сейсмонезбезпечних зонах [34].

Армування цементного будівельного розчину поліамідними волокнами, одержаними в результаті утилізування рибальських сіток, збільшує його міцність на розрив на 35 %, ударну в'язкість — на 1300 % (що можна пояснити високими пружно-еластичними властивостями поліаміду) [35].

Взагалі будівництво — це одна з основних та перспективних галузей промисловості утилізування полімерних відходів через використання їх у складі будівельних розчинів та бетонів, як заміника деревини у складі облицювальних, оздоблювальних та ізоляційних матеріалів, а також під час будівництва дорожніх покриттів [36].

Таблиця 1. Класифікація вторинної полімерної сировини [12]

Категорія полімерної сировини	Клас полімерної сировини	Вид полімерної сировини	Поворотні полімерні відходи	Неповоротні полімерні відходи
Відходи виробництва	термопластичні	поліолефіни, полістироли, полівінілхлориди, поліформальдегіди, полікарбонати, поліефіри, поліакрилати, поліаміди	чисті витоки з сопла, облої, ливники, виштампування, обрізь, стружка, некондиційна продукція, прогінні маси термопластів одного виду, у тому числі під час переходу з одного кольору на інший	нагари, термодеструктований матеріал, прогінні маси під час переходу з одного виду сировини на інший, забруднені розсипи гранул, залишки сировини, які повністю або частково втратили початкові властивості та не відповідають нормативним документам
Відходи споживання	термопластичні	поліолефіни, полістироли, полівінілхлориди, поліформальдегіди, полікарбонати, поліефіри, поліакрилати, поліаміди	–	вироби культурно-побутового призначення: канцелярські, галантерейні, сантехнічні товари, електроприлади, дитячі іграшки, корпусні деталі телерадіоапаратури, тара промислового та господарського призначення (ящики, бочки, каністри, банки та ін.)
Відходи виробництва	термореактивні	фенопласти, амінопласти, склопластики	–	виштампування, обрізь, стружка, облої, ливники, нагари, витоки з форм, просипки матеріалу, некондиційна продукція
Відходи споживання	термореактивні	фенопласти, амінопласти, склопластики	–	вироби культурно-побутового призначення (футляри, скриньки, склянки, канцелярські вироби, підставки, шахи, кульки, доміно, дитячі іграшки, посуд тощо), деталі побутових електроприладів та електроприладів (вилки, розетки, вимикачі тощо), фотоприладдя, тара та ін.
Змішані відходи виробництва й споживання	різні класи	різні види	–	вироби культурно-побутового призначення (дитячі іграшки, електроприлади, радіотовари тощо), змішані розсипи гранул, прогінні маси термопластів під час переходу з одного виду матеріалу на інший

Вторинний полімерний матеріал може бути підданий цілеспрямованій зміні хімічних та технологічних властивостей, у результаті чого одержують модифікований вторинний полімерний матеріал.

Основними процесами підготовки полімерних відходів до проведення фізичних методів перероблення є руйнування (дроблення й подрібнення), сортування (розділення за класами й видами), фракціонування (розділення за розміром частинок), а також згрудкування (укрупнення частинок).

Руйнування полімерних відходів здійснюють для одержання частинок потрібних розмірів та форми з метою зменшення об'єму й реалізації подальших стадій перероблення відходів.

Різноманітність форм, розмірів та фізичних властивостей матеріалів відходів (плівки, пляшки, каністри, контейнери та ін.) обумовлює й відповідні вимоги до подрібнювального обладнання [37]. При цьому вирішальними властивос-

тями полімерів та пластмас є твердість, еластичність, а також їх термічна й механічна чутливість [38, 39].

Полімерні та еластомерні матеріали за своїми властивостями й механізмом руйнування суттєво відрізняються від низькомолекулярних сполук, оскільки значна частка полімерів та еластомерів має пружні властивості. Руйнування полімерних відходів здебільшого здійснюють роздавлюванням, зсувом, стиранням, ударом, різанням, струганням, розпилюванням (рідше розколюванням, зазвичай після або під час криогенного охолодження), а також їх комбінацією, наприклад, струганням з одночасним різанням або роздавлюванням із зсувом й стиранням.

Розрізняють такі основні методи руйнування полімерних відходів: механічне; криомеханічне (за криогенних температур); термомеханічне (за температури 80–100 °C [40, 41]); електромеханічне (пропусканням електричного струму крізь компоненти полімерних відходів); акустомеханіч-

не (накладання на відходи акустичних коливань); а також комбінації зазначених методів.

При цьому одними з найбільш важко перероблюваних видів полімерних відходів є тонкі полімерні плівки різного призначення та одноразові полімерні пакувальні матеріали, частка яких у країнах Європейського Союзу становить 60 % [3].

Сортування полімерних відходів здійснюють для їх розділення за видом матеріалу. Призначення цієї стадії — максимальне виділення із суміші матеріалу з певними властивостями.

Попереднє поділення полімерних відходів споживання за зовнішніми ознаками: класами, габаритами, формою й кольорами — здійснюється на приймальних пунктах. За кольором відходи поділяють на 3 групи: темні кольори (чорний, коричневий, темно-коричневий); синьо-зелені (синій, зелений, блакитний, сірий, фіолетовий); інші кольори (червоний, оранжевий, білий, кремовий та ін.). Дрібні полімерні відходи споживання збирають у ящики, бочки, мішки, а

крупні збирають у контейнери або пакують.

На практиці застосовують такі методи ідентифікації полімерів:

1) для об'ємних відходів — ідентифікація за наявним маркуванням (кодом перероблення; англ. «recycling code»; рис. 2, табл. 2); сортування за оптичними властивостями (візуальний контроль); магнітна сепарація;

2) для подрібнених матеріалів — за густиною; змочуваністю (флотація); електричними властивостями; магнітними властивостями; вибірковою розчинністю [42].

Рис. 2. Приклад коду перероблення полімеру.

Fig. 2. Example of polymer Recycling code.

Таблиця 2. Знаки коду перероблення для різних полімерів

Знак	ISO 1043 (97/129/EC)	ГОСТ 2406-94 [43]	Найменування полімеру	Приклади продукції
	1 PET	ПЕТФ	поліетилентерфталат (лавсан)	поліестер, пляшки для напоїв
	2 PEHD (HDPE)	ПЭВП (ПЭНД, ПНД)	поліетилен високої густини (поліетилен низького тиску)	пластикові пляшки, пакети, сміттєві відра
	3 PVC	ПВХ	полівінілхлорид	віконні рами, пляшки для хімічних продуктів, покриття для підлоги, ізоляція (електротехніка) електричних проводів
	4 PELD (LDPE)	ПЭНП (ПВД, ПЭВД)	поліетилен низької густини (поліетилен високого тиску)	пакети, відра, труби, кришки
	5 PP	ПП	поліпропілен	автомобільні бампери, внутрішня обробка автомобілів, корпусу електроінструмента, упаковка з-під шоколадок, макаронів, пластикові стаканчики
	6 PS	ПС	полістирол	іграшки, одноразовий посуд, квіткові горщики, відеокасети, валізи, одноразові стаканчики
	7 O (OTHER)		інші полімери	поліуретан, полікарбонат, поліаміди, поліакрилонітрил та ін., біопластики
	9 ABS		АБС-пластик	корпуси моніторів, телевізорів та електроінструменту, кавоварки, стільникові телефони, комп'ютерний пластик, роздруковані на 3D-принтері компоненти, які не є біопластиками, такими як PLA

Фракціонування (розділення за розміром частинок) здійснюють для розділення подрібненої сировини за розміром й формою частинок, яке найчастіше реалізують на нерухомих та рухомих ситах різної форми (плоских, барабанних та ін.), а також за допомогою повітряного потоку (метод ґрунтується на різній швидкості руху в струмені повітря подрібнених частинок залежно від розмірів, форми й маси).

Згрудкування (укрупнення частинок) полімерних відходів є заключною стадією їх підготовки до проведення фізичних методів перероблення. Призначення цієї стадії — одержання з подрібнених, відсортованих, очищених й висушених відходів матеріалу, придатного для подальшого застосування як сировини для полімерпереробного обладнання.

Під час агломерації матеріал частково розплавляється, у результаті чого утворюються частинки неправильної форми, але певного розмірного діапазону. При цьому зазвичай розрізняють два основні методи агломерування: агломерацію під тиском та термічну агломерацію.

У першому випадку матеріал, що зазнає агломерування, в умовах тертя й зсувного деформування між ротором й перфорованим корпусом агломератора частково оплавляється. Неоднорідні (за структурою) стренги матеріалу, відформовані перфорацією корпусу, розрізають обертовим ножом на циліндричні частинки. У такий спосіб одержують гранули, брикети й таблетки.

Термічну агломерацію застосовують здебільшого для попередньо подрібнених плівок. Матеріал швидко нагрівають до температури плавлення й після цього швидко охолоджують. Для цього здійснюють так зване жорстке, або ударне», охолодження безпосереднім додаванням води у розігрітий до стану напіврозплаву полімерний матеріал, який внаслідок термічних напружень руйнується на частинки різноманітних форм й розмірів. Більші агломерати після цього додатково руйнують.

Найпоширенішим методом заключної стадії рециклінгу полімерних відходів є гранулювання за допомогою екструзійного обладнання. Розрізняють гарячий та холодний методи гранулювання. У першому випадку розплав проходить крізь екструзійну головку й відразу ріжеться на гранули, які далі у гарячому стані транспортуються потоком повітря або води, одночасно при

цьому охолоджуючись. У разі холодного гранулювання відформовані стренги, піддані попередньому охолодженню у водній ванні, проходять через тягнучий пристрій та потім у холодному стані ріжуться на гранули.

У типовій технологічній лінії виробництва грануляту з термопластичних відходів (рис.3) вихідна сировина надходить на приймальний стіл 1, з неї видаляють домішки, а полімерну складову стрічковим транспортером 3 подають у подрібнювач 4. Подрібнена сировина шнековим транспортером подається на гарячу мийку, а потім послідовно на фрикційну та флотаційну мийку. Після промивання й видалення основної вологи подрібнена сировина сушиться й подається в екструдер 14, що формує стренги, які після охолодження подрібнюються та у вигляді гранул потрапляють у бункер-нагромаджувач 17. Наведена схема може бути змінена залежно від складу та стану вихідної сировини.

Полімерні відходи (найчастіше еластомерні) можуть бути піддані регенеруванню, тобто такому перероблянню, що полягає у відновлюванні корисних властивостей вихідного матеріалу для повторного цільового використання отриманого продукту (регенерату) [23].

Як бачимо, технологія одержання грануляту з термопластичного полімеру достатньо складна. Тому нерідко вартість вторинного полімеру перевищує вартість первинного [44].

Основні проблеми для такої схеми виникають під час сортування відходів. Однак їх можна уникнути, забезпечивши прямий контакт переробників вторинної сировини з виробниками: заводами з виробництва пластмас, фармацевтичними підприємствами, торговельними організаціями тощо [45].

Якщо вторинна сировина надходитиме безпосередньо з таких підприємств, то технологічна схема істотно спрощується, оскільки стають зайвими майже всі стадії до подрібнювання сировини. Саме цим пояснюється досить великий рівень утилізації використання відходів виробництва: співвідношення рівнів використання полімерних відходів виробництва та споживання становить приблизно 9 : 1 [46].

Відносно невисокий рівень використання полімерних відходів споживання у багатьох країнах світу, значно нижчий за рівень використання полімерних відходів виробництва, можна пояс-

Рис. 3. Схема технологічної лінії виробництва грануляту з термопластичного полімеру: 1 — приймальний стіл; 2 — бункер для домішок; 3 — стрічковий транспортер; 4 — подрібнювач; 5, 7, 10, 12 — шнекові транспортери; 6 — гаряча мийка; 8 — фрикційна мийка; 9 — флотажна мийка; 11 — промивальний пристрій; 13 — сушарка; 14 — екструдер; 15 — охолодний пристрій; 16 — гранулятор; 17 — бункер-нагромаджувач.

Fig. 3. Scheme of the technological line for the production of granules from thermoplastic polymer: 1 — receiving table; 2 — hopper for impurities; 3 — belt conveyor; 4 — grinder; 5, 7, 10, 12 — screw conveyors; 6 — hot washing; 8 — friction washing; 9 — flotation washing; 11 — flushing device; 13 — dryer; 14 — extruder; 15 — cooling device; 16 — granulator; 17 — storage hopper.

нити різноманіттям видів відходів споживання, значним діапазоном їхніх властивостей, забрудненістю, комбінуванням з іншими матеріалами, внаслідок чого переробленню мають піддаватися суміші полімерів невизначеного складу, а також суміші полімерів з іншими матеріалами (папером, текстилем, гумою, металом тощо).

Крім того, використання полімервмісних відходів як вторинної сировини для виробництва нових виробів стримується розробленням та впровадженням широкого спектру полімерів, пластмас та матеріалів на їх основі з передбачуваними властивостями.

Крім безпосереднього формування вторинних полімерних матеріалів з одержанням нової полімерної продукції, зазначені матеріали використовують в іншій спосіб, зокрема як наповнювач композиційних матеріалів з неpolімерною матрицею [47]. Тим не менше, дослідники постійно пропонують нові, часто інноваційні, способи використання полімерних відходів. Наприклад, запропонована часткова або повна заміна кварцового піску в будівельних розчинах на основі цементу фрагментами використаних пляшок з ПЕТФ [48], одержання високоякісних волокон

для текстильної промисловості [49]. Новим застосуванням полімерних відходів стає виготовлення з них витратних матеріалів (полімерних ниток) для 3D-друку [50].

Відходи реактопластів необхідно подрібнювати на частинки розміром не більш 0,2 мм й пакувати у мішки або спеціальні контейнери, марковані етикеткою із зазначенням підприємства-виробника, виду виходів, маси й дати виготовлення [27]. Подрібнені відходи амінопластів та фенопластів рекомендується використовувати як додаток до первинної сировини (не більш 10 %) на підприємствах, які виробляють тару або другорядні деталі. Відходи перероблення та споживання рекомендується відправляти шляхобудівельним організаціям як наповнювач під асфальтобітумні покриття.

Відходи термопластів подрібнюють окремо за видами й кольорами матеріалу до розміру частинок не більше 5 мм. Подрібнені відходи сепарують, щоб вилучити металеві включення. Забруднені відходи рекомендується промивати проточною водою або розчином миючих засобів. Вторинну полімерну сировину треба сушити для виведення вологи відповідно до вимог,

які існують щодо вихідного матеріалу. Для поліпшення властивостей відходів термопластів рекомендується модифікувати їх уведенням різноманітних додатків: пластифікаторів, стабілізаторів тощо.

Змішані полімерні відходи поділяють за класами. Змішані подрібнені відходи реактопластів рекомендується відправляти шляхобудівельним організаціям як наповнювач під асфальтобетонні покриття. Відходи термопластів поділяють за видами поетапно, виділяючи один або кілька видів полімерів, після чого кожний вид відходів термопластів переробляють як зазначено вище. Змішані полімерні відходи, які важко поділити, сплави полімерів, прогінні маси, що зваляються під час переходу з одного матеріалу на інший, та термодеструктовані маси слід спалювати з метою одержання теплової енергії.

Якщо ще донедавна велику увагу приділяли розробленню методів попереднього оброблення полімервмісних відходів, які підвищували якість вторинної сировини, з максимальним наближенням її до первинної сировини за технологіями очищення, розділення, агломерації та гранулювання, то натеper впроваджуються технології перероблення сумішей відходів полімерних та інших матеріалів без їх попереднього оброблення. При цьому перероблення змішаних й забруднених полімерних відходів розплавлюванням полімерів без їх попереднього розділення за видами здійснюється здебільшого на екструзійному обладнанні або обладнанні для лиття під тиском, у якому відбувається повна пластикація й гомогенізація полімерів, а також на обладнанні для прямого термоформування або пресування подрібнених відходів, у якому зазвичай має місце неповна пластикація полімерів [13, 51].

Фізичні (фізико-механічні) методи утилізування відходів

Під час реалізації фізичних методів змінюються лише форма, розміри, агрегатний стан й деякі інші властивості матеріалу відходів за умови збереження його якісного хімічного складу.

Найбільш поширеними фізичними методами утилізування полімерних відходів є їх екструзія, лиття під тиском, пресування, а також деякі інші методи формування [39, 52, 53].

У Російській Федерації основний обсяг вторинних полімерних матеріалів у 2015 р. було ви-

користано для виготовлення пластмасової тари та упаковки (38 %), деталей для побутової техніки (22 %), а також будівельної продукції (труби, покрівельні матеріали та ін.) (18 %) [21].

Для аналізу процесів перероблення вторинних матеріалів варто скористатися широкими можливостями математичного моделювання, при цьому потрібні властивості перероблюваних композиційних матеріалів можна визначити залежно від їхнього якісного й кількісного складу [54, 55].

Хімічні методи утилізування відходів

Під час реалізації хімічних методів змінюються фізичні властивості та якісний хімічний склад, причому взаємодія речовин здійснюється у стехіометричних співвідношеннях.

Основними хімічними методами утилізування полімерних відходів є спалювання, газифікація, піроліз та плазмохімічні технології [56]. Хімічними методами утилізування можна розкласти більшість великотоннажних полімерів з одержанням різноманітних цінних хімічних сполук [57–59].

Спалювання є одним з найбільш поширених та ефективних методів утилізування полімерних відходів, непридатних для перероблення через свій склад, неправильне збирання та зберігання або неможливості чи недоцільності повторного перероблення (наприклад, через попереднє багаторазове перероблення та втрату полімером первинних властивостей). У цьому разі полімерні відходи використовують як котельно-пічне паливо.

Існує кілька основних способів спалювання полімерних відходів: кусковий — у щільному шарі, дрібнозернистий — у «киплячому» (псевдозрідженому) шарі, а також в обертових печах.

Газифікація полімерних відходів — це процес їх перетворення на горючі гази під час високо-температурного (1000–2000 °C) нагрівання з окисником (кисень, повітря, водяна пара, CO₂ або їх суміші). У результаті газифікації з матеріалу (навіть несортованого й забрудненого) одержують синтетичний газ, який може бути використаний для синтезу нових полімерів, а також для одержання теплової та електричної енергії.

Існує кілька основних способів проведення процесу газифікації полімерних відходів: на нерухомих й рухомих колосниках, кусковий — у щільному шарі, дрібнозернистий — у «киплячому» (псевдозрідженому) шарі, а також пилоподібний — у факелі.

Піроліз полімерних відходів — це процес їх термічного розкладання у безкисневому середовищі або за низького вмісту кисню. Розрізняють піроліз низькотемпературний (до 500 °С), середньотемпературний (від 500 до 800 °С) та висококо-температурний (понад 800 °С) [21]. Вихід продуктів піролізу для деяких полімерів наведено у табл.3 [60].

З олив та воску виділяють бензол, толуол, ксилол, стирол, нафталін та ін. Одержувані гази, які складаються в основному з вуглеводнів, використовують як паливо для піролізу, що значно зменшує енергоємність процесу.

З огляду на високі енергетичні й матеріальні показники сучасних технологій піролізу вважається за необхідне збільшити частку твердих муніципальних відходів (у тому числі й полімерних відходів), яку піддають піролізу, та мінімізувати їх захоронення [61–63].

Змішані полімерні відходи, які важко розділити, а також сплави полімерів, прогінні маси, які з'являються під час переходу з одного матеріалу на інший, та термодеструктовані маси звичайно спалюють з метою одержання теплової енергії. Цей процес є достатньо ефективним, оскільки теплота згоряння поліпропілену, поліетилену й полістиролу складає близько 46 МДж/кг, теплота згоряння мазуту — 44 МДж/кг.

Плазмохімічні технології утилізування полімерних відходів — це процес їх термічного розкладання у низькотемпературній плазмі (за температури понад 1000 °С) у присутності кисню, повітря, водяної пари, діоксиду вуглецю. У результаті розкладання полімерних відходів одержують водень, ацетилен, етилен, ароматичні й поліарома-

тичні вуглеводні, технічний вуглець [64].

Крім зазначених хімічних методів, застосовують гідроліз (взаємодія полімерів з водою у кислому, лужному або нейтральному середовищі), гліколіз (різновид гідролізу з використанням етиленгліколю), сольволіз (взаємодія полімерів з різноманітними розчинниками), метаноліз (взаємодія полімерів з метанолом).

Біологічні методи утилізування відходів

Під час реалізації біохімічних методів утилізування відходів відбуваються їхні хімічні перетворення за участю мікроорганізмів, грибів та водоростей.

Одним з найбільш перспективних методів з точки зору захисту навколишнього середовища від твердих відходів є використання біорозкладаних полімерів (БРП) — полімерних матеріалів з регульованим терміном експлуатації, які самочинно руйнуються в результаті природних мікробіологічних та хімічних процесів.

Одним з поширених БРП є полімолочна кислота (PLA) — прозорий полімер, одержаний у результаті перероблення кукурудзи [65] або глюкози й розкладаваний до небезпечних продуктів. Зовні PLA нагадує полістирол, проте вона характеризується набагато нижчими фізико-механічними властивостями (ударною в'язкістю, термічною стійкістю та бар'єрними властивостями). Зазвичай PLA випускається у вигляді гранул та використовується для виготовлення полімерних плівок, волокон, контейнерів та пляшок.

Окрім полімолочної кислоти, для виготовлення полімерних плівок застосовуються такі БРП, як полібутілен-адипат-терефталат (PBAT) та полікапролактон (PCL) [66].

У США розроблена технологія біологічно розкладаваних полімерних плівок, призначених для захисту посівів від проростання бур'янів. Такі плівки, виготовлені із суміші полімерів й крохмалю, під дією теплоти й во-логи повністю розкладаються протягом одного сезону [67].

Останніми роками асортимент та обсяги БРП значно зростають, тому не без підстав

Таблиця 3. Вихід продуктів під час піролізу полімерів за температури 550 °С, % [60]

Продукт піролізу	Поліетилен високої густини	Поліетилен низької густини	Поліпропілен	Полістирол	Полівінілхлорид	Поліетилентерфталат
Олива	36,8	17,8	31,5	59,1	22,1	23,5
Віск	29,9	35,4	38,3	12,4	0	15,9
Кокс	0	0	0	0	13,5	12,8
Гази	11,4	21,4	6,5	0,7	3,9	49,1
H ₂	0,31	0,23	0,24	0,01	0,20	0,06
Етилен	3,01	5,33	1,48	0,09	0,51	1,27
Пропілен	2,26	4,80	1,08	0,02	0,54	1,60
Бутен	2,34	6,41	1,95	0,02	0,42	0
CO ₂	0	0	0	0	0	24,28
CO	0	0	0	0	0	21,49
HCl	0	0	0	0	31,7	0

вважається, що саме активне збирання традиційних відходів та використання біорозкладаваних полімерів захистять навколишнє середовище від глобального забруднення. Разом з біорозкладаваними поступово впроваджуються також фоторозкладавані полімери (ФРП), які піддаються деструкції під впливом сонячного випромінювання [68].

Біорозкладані полімери — відносно новий клас полімерних матеріалів, які дійсно стоять на службі навколишнього середовища, адже після використання БРП під час компостування вони добре розкладаються до діоксиду вуглецю, води й біомаси — гумусу. Проте це стосується «чистих» БРП, а не «умовно» біорозкладаних полімерів з використанням традиційних синтетичних полімерів (поліолефінів, полівінілхлориду та ін.), наповнених біорозкладаними компонентами, наприклад, кукурудзяним або картопляним крохмалем [69]. Під час дії мікроорганізмів на такі «умовні» БРП розкладається лише біорозкладана складова, що сприяє розпаданню відходів на окремі мікрочастинки синтетичних полімерів, які, як і мікрочастинки відповідних полімерів, у природних умовах розкладатимуться достатньо тривалий час. Таким чином, у результаті застосування «умовно» біорозкладаних полімерів можуть утворюватися значні обсяги мікро- та нанопластиків, які, як було зазначено раніше, чинять істотну шкоду тваринному й рослинному світові.

Набагато кращі результати досягаються у разі розкладання дійсно біорозкладаного полімеру, наприклад, поліактиду — біорозкладаного, біосумісного, термопластичного аліфатичного поліефіру, мономером якого є молочна кислота, а сировиною для виробництва є щорічно поновлювані ресурси, зокрема кукурудза [70].

Певною проблемою у разі застосування продукції з БРП й ФРП може бути передчасна втрата нею споживчих властивостей, навіть до передчасного руйнування, що абсолютно неприпустимо, зокрема у разі використання БРП й ФРП у складі пакувань продуктів харчування.

Також потрібно зауважити, що не усі біополімерні матеріали (полімерні матеріали, одержані з таких відновлюваних джерел біомаси, як рослини жири та олії, кукурудзяний крохмаль, соломка, тирса, перероблені харчові відходи тощо [71]) є біорозкладаними. Зокрема, такий полімер як поліамід 11, який використовується для виго-

товлення гнучких труб та шлангів, захисних оболонок електричних кабелів, спортивного взуття, не є біорозкладаним [72]).

Комбіновані методи утилізування відходів

Під час реалізації фізико-хімічних методів відбуваються взаємопов'язані фізичні й хімічні перетворення, причому хімічна взаємодія речовин здійснюється у нестехіометричних співвідношеннях [13].

Окремі полімерні відходи під час утилізації можуть піддаватися дії декількох чинників різної природи (найчастіше не одночасної, а послідовної дії), у результаті мають місце комбіновані методи стилізування полімерних відходів. Отже комбіновані методи є сукупністю методів різних груп, один з яких може бути домінуючим.

Найбільш доцільним з методів утилізації полімерних відходів є їх використання як вторинної сировини. У цьому разі майже повністю використовуються властивості полімерів саме з точки зору їх призначення. Передусім це стосується відходів термопластичних полімерних матеріалів.

Видалення відходів

Методи видалення відходів можна поділити на дві основні групи [13].

1. Спалювання, яке полягає у здійсненні технологічних заходів, що призводять до окиснювання органічних речовин спалюванням для перетворення відходів у безпечнішу форму й відвернення їх накопичування, а також отримування енергії. Спалювання супроводжується виділенням теплової енергії, яка неповоротно втрачається й не використовується.

У сучасній несприятливій епідеміологічній ситуації можливе зростання одноразових полімерних предметів вжитку й пакувань, тому проблема їх ефективного знешкодження стає дуже актуальною [73–76].

Серед способів спалювання дуже ефективною є плазмова технологія, за якої небезпечні відходи (зокрема медичні, наприклад, полімерні інструменти з інфекційних відділень лікарень) спалюються в електродугових печах за температури 1300–4000 °C у присутності водяної пари. Ступінь розкладання відходів близький до повного, що робить його найбільш ефективною та

екологічно безпечною технологією. Через високу енергоємність відходів (0,5–20 кВт.год/кг [77]) вона використовується для видалення лише спеціальних відходів.

2. Захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення у спеціально відведених місцях чи на об'єктах таким чином, щоб довгостроковий шкідливий вплив відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини не перевищував установлених нормативів.

Перед захороненням відходи можуть бути піддані знешкоджуванню, тобто обробленню, що полягає у здійсненні механічних, фізичних, хімічних чи біологічних процесів, спрямованих на змінення й переведення небезпечних складників відходів у безпечні форми.

Найдешевшим та найрозповсюдженим (але й найбільш нераціональним) натеper способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах та сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках [78].

Як уже було зазначено, станом на 2019 р. в Україні створено 6000 офіційних сміттєзвалищ та полігонів загальною площею майже 9000 га, понад 99 % яких не відповідають європейським вимогам [15]. Наявність полігонів та звалищ, а також відсутність контролю за ними призводить до скорочення земель сільськогосподарського призначення, забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження шкідливих комах та гризунів тощо. Підземне захоронення відходів є більш раціональним, проте воно також не виключає забруднення ґрунтових вод.

Зрозуміло, що повністю відмовитися від облаштування сміттєзвалищ, полігонів та могильників натеper неможливо, проте сучасні технології можуть істотно знизити шкідливий вплив відходів, у тому числі й полімерних, на навколишнє середовище [79].

Щоб розв'язати зазначені проблеми, в усьому світі вводиться контрольоване захоронення відходів, що полягає в укладанні та пресуванні відходів у тонкі шари з періодичним укриванням цих шарів ґрунтом або іншим інертним матеріалом. Проте захоронення відходів пов'язано з безповоротними втратами потенційно відновлюваних матеріалів, тому все більше уваги приділяється методам утилізації [80, 81].

З огляду на порушену проблему, можна з упевненістю стверджувати, що треба якнайшвидше впроваджувати в наше життя принцип 3R (Reuse, Reduce, Recycle — повторне використан-

ня, скорочення й перероблення) поводження з твердими полімерними відходами [82]. Цей підхід можна рекомендувати й для відходів з інших матеріалів, зокрема гумових, поводження з якими має свої особливості [83].

Висновки

Проблема поводження з твердими полімерними відходами є однією з пріоритетних для більшості країн світу. При цьому від зазначених відходів потерпає не лише суходіл, а й світовий океан, причому надзвичайно стрімкими темпами.

Переймаючись серйозністю проблеми, у США та країнах Західної Європи постійно розробляються, впроваджуються та вдосконалюються достатньо ефективні системи збирання, сортування й перероблення полімерних відходів. Завдяки створенню ресурсо- та енергоефективних процесів та обладнання відповідні технології часто є не тільки не збитковими, а й навіть високорентабельними.

На початку третього тисячоліття Україна переживає вкрай непрості часи, спричинені як внутрішніми, так і зовнішніми викликами. Натеper держава не має можливості виділити відповідні кошти для вирішення проблеми відходів взагалі й твердих полімерних відходів зокрема, проте зараз можна запропонувати такі основні способи її розв'язання:

- розроблення та впровадження системи заохочень для підприємств, які займаються утилізацією та видаленням полімерних відходів, а також розробленням відповідних інноваційних технологій та зразків обладнання;

- налагодження розумних взаємовигідних зв'язків між джерелами відходів, розробниками технологій та організаціями системи збирання, сортування, оброблення й перероблення полімерних відходів;

- виховання сучасного споживача товарів та послуг, який би розумів необхідність створення та ефективного запровадження комплексної системи утилізації відходів як необхідної умови забезпечення здоров'я громадян та безпеки навколишнього природного середовища.

Також одним з практичних напрямків утилізування твердих полімерних відходів може стати їх застосування у складі композиційних матеріалів з прогнозованими експлуатаційними властивостями, розробленню яких істотно сприятиме математичне моделювання.

Список літератури

1. Ritchie H., Roser M. Plastic Pollution. Our World in Data. 2018. — URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#>
2. Parker L. The world's plastic pollution crisis explained. 2019. — URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution>
3. Earth 2020: An Insider's Guide to a Rapidly Changing Planet. Ed. P.Tortell. Cambridge : Open Book Publishers. 2020. 274 p. — <https://doi.org/10.11647/OBP.0193>
4. Baran B. Plastic waste as a challenge for sustainable development and circularity in the European Union. *Ekonomia i Prawo. [Economics and Law]*. 2020. Vol. 19, № 1. P. 7–20. doi: 10.12775/EiP.2020.001
5. Lau W.W.Y., Shiran Y., Bailey R.M., Cook E., Stuchtey M.R., Koskella J., Velis C.A., Godfrey L., Boucher J., Murphy M.B., Thompson R.C., Jankowska E., Castillo A.C., Pilditch T.D., Dixon B., Koerselman L., Kosior E., Favoino E., Gutberlet J., Baulch S., Atreya M.E., Fischer D., He K.K., Petit M.M., Sumaila U.R., Neil E., Bernhofen M.V., Lawrence K., Palardy J.E. Supplementary Materials for “Evaluating Scenarios Toward Zero Plastic Pollution. *Science*. 2020. Vol. 369 (6510). P. 1455–1461. — <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>. 2020. Vol. 175. p. — <http://science.sciencemag.org/content/suppl/2020/07/22/science.aba9475.DC1>
6. Le Guern C. When the mermaids cry: the great plastic tide. 2019. — URL: <https://plastic-pollution.org/>
7. Bishop G., Styles D., Lens P.N.L. Recycling of European plastic is a pathway for plastic debris in the ocean. *Environment International*. 2020. Vol. 142. Article 105893. 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105893>
8. Galloway T. S., Cole M., Lewis C. *Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. Nature Ecology & Evolution*. 2017, Vol. 1, № 5. Article 0116. 8 p. — <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
9. Revel M., Chvétel A., Mouneyrac C. Micro(nano)plastics: A threat to human health? *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018. Vol. 1. P. 17–23. — <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>
10. La Mantia F. P. Recycling of Plastic Materials. Toronto–Scarborough: ChemTec Publishing, 1993. 189 p.
11. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ : НТУУ «КПІ», 2006. 184 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062>
12. Мікульонюк І.О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 264 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259>
13. Мікульонюк І.О., Рябцев Г.Л. Основні методи і шляхи використання полімервмісних відходів. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2001. № 2. С. 135–147.
14. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р., № 820-р. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
15. Міністерство розвитку громад та територій України: Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік. — URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti-zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymi-vi/>
16. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Part B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364. P. 1985–1998. doi: 10.1098/rstb.2008.0205
17. Balasubramani R., Muthunayanan V., Arumugam K., Periakaruppan R., Singh A., Chang S.W., Chandran T., Singh G.S., Muniraj S. Treatment of Waste. In: Waste Valorisation: Waste Streams in a Circular Economy / Editors: Carol Sze Ki Lin, Guneet Kaur, Chong Li, Xiaofeng Yang. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2021. Ch. 3. P. 33–49. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119502753.ch3>
18. Bajracharya R. M., Manalo A. C., Karunasena W., Lau K. Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon. *Waste Management*. 2016. Vol. 48. P. 72–80. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.017>
19. Rajmohan K. V. S., Ramya C., Viswanathan M. R., Varjani S. Plastic pollutants: Waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2019. Vol. 12. P. 72–84. — <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>
20. Ragaert K., Delva L., Geemb van K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 2017. Vol. 69. P. 24–58. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
21. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)). Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 15-2016. Москва : Бюро НДТ, 2016. 198 с.
22. Plastic waste and recycling. Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions. Ed. T. M. Letcher. London: Elsevier Inc. 2020. 686 p. — URL: https://www.researchgate.net/profile/Mohanraj-handran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf

23. ДСТУ 4462.0.01:2005. Охорона природи. Поводження з відходами. Терміни та визначення понять. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 15 с.
24. ДСТУ 4462.3.01:2006. Охорона природи. Поводження з відходами. Порядок здійснення операцій. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 27 с.
25. ГОСТ Р 56828.31–2017. Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Иерархический порядок обращения с отходами. Москва : Стандартинформ, 2017. 24 с.
26. Mikulionok I.O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011. Vol. 83, № 6. P. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371
27. ДСТУ 2731–94. Сировина полімерна вторинна. Порядок збирання, зберігання і перероблення відходів. Київ : Держстандарт України, 1994. 13 с.
28. ДСТУ 2102–92. Ресурси матеріальні вторинні. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1992. 12 с.
29. Mikulyonok I.O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, № 11–12. P. 658–661. doi: 10.1007/s10556-013-9676-x
30. Huang Y., Bird R.N., Heidrich O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 52, № 1. P. 58–73. doi: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002
31. Tang Z., Li W., Tam V.W.Y., Xue C. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling*: 2020. Vol. 6. Article 100036. 22 p. — <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>
32. Dave S., Bhogayata A., Arora N. Impact Resistance of Geopolymer Concrete Containing Recycled Plastic Aggregates. *ICRISET2017: International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology*. 2017. Vol. 1. P. 137–143. — <https://doi.org/10.29007/nwsh>
33. Silva da D.J., Wiebeck H. Current options for characterizing, sorting, and recycling polymeric waste. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*. 2020. Vol. 36, № 4. P. 284–303. — <https://doi.org/10.1177/1477760620918603>
34. Dinesh A., Kumar R.P., Abijith S.R. Experimental Investigation on Bubble Deck Concrete Using Plastic Waste. In: *Lecture Notes in Civil Engineering, Recent Developments in Waste Management*, A. S. Kalamdhad (ed.). 2020. Vol. 57. P. 195–204. — https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_14
35. Spadea S., Farina I., Carrafiello A., Fraternali F. Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 80. P. 200–209. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>
36. Awoyera P.O., Adesina A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 12. Article e00330. 11 p. — <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
37. Мікульйонік І.О. Обладнання для механічного руйнування полімер- та еластомервмісних відходів. *Вісник КНУТД: Напрямок «Хімія та хімічні технології»*. 2003. № 1. С. 131–134.
38. Мікульйонік І.О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
39. Мікульйонік І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
40. Mikulionok I.O. Structural Implementation of the Process of Elasto-Deformation Shredding of Rubber-Containing Wastes (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, № 9–10. P. 604–608. doi: 10.1007/s10556-016-0093-9
41. Микулёнок И.О., Лукач Ю.Е. Особенности конструктивного исполнения роторных измельчителей для резино- и полимерсодержащих отходов (Обзор). *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007. № 3. С. 69–72.
42. Singh N., Hui D., Singh R., Ahuja I.P.S., Feo L., Fraternali F. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future Applications. *Composites. Part B*. 2017. Vol. 115. P. 409–422. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
43. ДСТУ 2406–94. Пластмаси, полімери і синтетичні смоли. Хімічні назви. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994. 27 с.
44. Recycling today. The potential of polypropylene. — URL: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-recycling-potential-of-polypropylene/>
45. Horodytska O., Valdys F.J., Fullana A. Plastic flexible films waste management — A state of art review. *Waste Management*. 2018. Vol. 77. P. 413–425. doi: 10.1016/j.wasman.2018.04.023
46. Вторичное использование полимерных материалов / Под ред. Е.Г.Любешкиной. Москва : Химия, 1989. 192 с.
47. Микулёнок И.О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей. *Пластические массы*. 2012. № 9. С. 29–38.
48. Marzouk O.Y., Dheilly R.M., Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*. 2007. Vol. 27, № 2. P. 310–318. doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.012
49. Tshifularo C.A., Patnaik A. Recycling of plastics into textile raw materials and products. In: *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2020. P. 311–326. — <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00013-X>
50. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Warchoł J., Moustakas K., Chojnacka K., Witek-

- Krowiak A. 3D printing filament as a second life of waste plastics – A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 12321–12333. — <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>
51. Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*. 2009. Vol. 29. P. 2625–2643. doi: 10.1016/j.wasman.2009.06.004
52. Mikulionok I.O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, № 1–2. P. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6
53. Mikulionok I.O. Screw extruder mixing and dispersing units. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, № 1–2. P. 103–109. doi: 10.1007/s10556-013-9711-y
54. Микулёнок И.О. Определение реологических свойств термопластичных композиционных материалов. *Пластические массы*. 2011. № 7. С. 26–30.
55. Mikulionok I.O. Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials. *International Polymer Science and Technology*. 2013. Vol. 40, № 9. P. 23–28. — <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>
56. Brems A., baeyens J., Dewil R. Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. *Thermal Science*. 2012. Vol. 16, № 1. P. 669–685. doi: 10.2298/tsci120111121b
57. Rahimi A., Garca J.M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*. 2017. Vol. 1, N 6. Article 0046. 11 p. doi: 10.1038/s41570-017-0046
58. Thiounn T., Smith R.C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58. P. 1347–1364. doi: 10.1002/pol.20190261
59. Baena-Gonzlez J., Santamaria-Echart A., Aguirre J.L., Gonzlez S. Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil. *Waste Management*. 2020. Vol. 118. P. 139–149. — <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.035>
60. Ресурсосберегающие технологии : Экспресс-информация. Москва : ВИНТИ, 1999. № 4. С.11–13.
61. Lu J.-S., Chang Y., Poon C.-S., Lee D.-J. Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 312. Article 123615. 14 p. — <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
62. Li Q., Faramarzi A., Zhang S., Wang Y., Hu X., Gholizadeh M. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 226. Article 113525. 30 p. — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525>
63. Larrain M., Passel van S., Thomassen G., Kresovic U., Alderweireldt N., Moerman E., Billen P. Economic performance of pyrolysis of mixed plastic waste: Open-loop versus closed-loop recycling. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 270. Article 122442. 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122442>
64. Латышенко К.П., Гарелина С.А. Плазмохимический реактор по переработке полимерных отходов в водород и другую ликвидную продукцию. *Известия МИТУ «МАМИ». Сер. «Химическое машиностроение и инженерная экология»*. 2014. Т. 3, № 1. С. 10–17.
65. Corn Plastic to the Rescue. — URL: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/corn-plastic-to-the-rescue-126404720/>
66. Scaffaro R., Maio A., Sutura F., Gulino E.F., Morreale M. Degradation and Recycling of Films Based on Biodegradable Polymers: A Short Review. *Polymers*. 2019. Vol. 11, № 4. Article 651. 20 p. doi: 10.3390/polym11040651
67. Использование материальных ресурсов за рубежом : Реферативный сборник. Москва : ВИНТИ, 1991. Вып. 11. С. 57.
68. Ресурсосберегающие технологии : Экспресс-информация. Москва : ВИНТИ, 1999. № 17. С.19–23.
69. Гуль В.Е., Рыженкова И.П. Экологические аспекты вторичного использования амортизованных упаковок из полимерных материалов. *Тара и упаковка*. 1997. № 1. С. 40–43.
70. Kishk M.W., Karam H.J., Al-Qassimi M., Al-Rowaih A.A., Al-Wadi M.H., Al-Salem S.M. Study of commercial thermoplastic biodegradable polyester resin as a solid waste mitigation route using ASTM D 5988-18. *WIT Transactions on Ecology and the Environment. Conference: WASTE MANAGEMENT 2020*, Madrid, Spain. 2020. Vol. 247. P. 115–123. doi: 10.2495/WM200111
71. Chua H., Yu P.H.F., Ma C.K. Accumulation of Biopolymers in Activated Sludge Biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1999. Vol. 77–79. № 1–3. P. 389–399. doi: 10.1385/abab:78:1:3:389
72. Herzog B., Kohan M.I., Mestemacher S.A., Pagilagan R.U., Redmond K. Polyamides. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. P. 1–36. — https://doi.org/10.1002/14356007.a21_179.pub3
73. Sharma H.B., Vanapalli K.R., Cheela VR S., Ranjan V.P., Jaglan A.K., Dubey B., Goel S., Bhattacharya J. Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation & Recycling*. 2020. Vol. 162. Article 105052. 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>
74. Kulkarni B.N., Anantharama V. Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 743. Article 140693. 37 p. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>
75. Клемель J.J., Fan Y.V., Tan R.R., Jiang P. Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 127.

Article 109883. 7 p. — <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>

76. Parashar N., Hait S. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 759. Article 144274. 15 p. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>

77. Шарина И.А., Перепечко Л.Н., Анышаков А.С. Перспективы использования плазменной технологии для переработки/уничтожения техногенных отходов. *ЭКО*. 2016. № 12. С. 28–35.

78. Касимов А.М., Семенов В.Т., Александров А.Н., Коваленко А.М. Твердые бытовые отходы. Проблемы и решения. Технологии, оборудование. Харьков : ХНАГХ, 2006. 301 с.

79. Nanda S., Berruti F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2021. Vol. 19. P. 1433–1456. — <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>

80. Klemeš J.J., Fan Y.V., Jiang P. Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint. *En-*

ergy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021. Vol. 43, № 13. P. 1549–1565. — <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1801906>

81. Vollmer I., Jenks M.J.F., Roelands M.C.P., White R.J., Harmelen van T., de Wild P., Laan van der G.P., Meirer F., Keurentjes J.T.F., Weckhuysen B.M. Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020. Vol. 59. P. 15402–15423. doi: 10.1002/anie.201915651

82. Abukasim S.M., Zuhria F., Saing Z. Alternative management of plastic waste. *Journal of Physics: Conference Series. 1st Borobudur International Symposium on Applied Science and Engineering (BIS-ASE)*. 2019. Vol. 1517. Article 012041. 7 p. doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012041

83. Мікульонюк І.О. Основні методи використання гумовмісних відходів. *Хімічна промисловість України*. 2001. № 5. С. 53–58.

Надійшла до редакції 21.04.2021

Микулёнок И.О., *техн. наук, проф., orcid 0000-0001-8268-7229*
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

Состояние и перспективы обращения с твёрдыми полимерными отходами

Приведены основные данные по объёму и структуре твёрдых отходов в мире и в Украине. Показана необходимость совершенствования способов обращения с твёрдыми полимерными отходами как одними из самых опасных для окружающей среды, но перспективных с точки зрения использования их свойств. Предложена развернутая классификация методов обращения с твёрдыми полимерными отходами, и приведен критический анализ каждого из них. Особое внимание уделено методам утилизации твёрдых полимерных отходов, в частности, рециклингу, который позволяет эффективно использовать вторичное полимерное сырьё непосредственно по назначению. Рассмотрены особенности физических, химических, биологических и комбинированных методов переработки, в частности, сжигания, газификации, пиролиза, плазменного разложения полимерных отходов, а также их разложение под действием солнечных лучей и микроорганизмов. Предложены основные способы решения в Украине проблемы обращения с твёрдыми полимерными отходами. *Библ. 83, рис. 3, табл. 3.*

Ключевые слова: твёрдые отходы, полимеры, загрязнение окружающей среды, обращение с отходами, утилизация.

Mikulionok I.O., Doctor of Technical Sciences, Professor,
orcid 0000-0001-8268-7229

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

A State of Art and Prospects of Plastic Solid Waste Management

Basic data on the volume and structure of solid waste in the world and Ukraine are presented. The need to improve the ways of handling plastic solid waste as one of the most dangerous for the environment and promising from the point of view of using their properties is shown. A detailed classification of methods for handling plastic solid waste is proposed and a critical analysis of each of them is given. Particular attention is paid to the methods of disposal of plastic solid waste, in particular, recycling, which makes it possible to effectively use secondary plastic raw materials directly for their intended purpose. The features of physical, chemical, biological and combined processing methods are also considered, in particular combustion, gasification, pyrolysis, plasma decomposition of plastic solid waste, as well as their decomposition under the influence of sunlight and microorganisms. The main ways of solving the problem of plastic solid waste in Ukraine are proposed. *Bibl. 83, Fig. 3, Tab. 3.*

Key words: solid waste, plastic, environmental pollution, waste management, recycling.

References

1. Ritchie H., Roser M. (2018). Plastic Pollution. *Our World in Data*. — URL: <https://our-worldindata.org/plastic-pollution#> (Accessed April 13, 2021)
2. Parker L. (2019). The world's plastic pollution crisis explained. — URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution> (Accessed April 13, 2021)
3. Earth 2020: An Insider's Guide to a Rapidly Changing Planet (2020). Tortell P. (ed.). Cambridge : Open Book Publishers, 274 p. — <https://doi.org/10.11647/OBP.0193>
4. Baran B. (2020). Plastic waste as a challenge for sustainable development and circularity in the European Union. *Ekonomia i Prawo. [Economics and Law]*, 19 (1), pp. 7–20. doi: 10.12775/EiP.2020.001
5. Lau W.W.Y., Shiran Y., Bailey R.M., Cook E., Stuchtey M.R., Koskella J., Velis C.A., Godfrey L., Boucher J., Murphy M.B., Thompson R.C., Jankowska E., Castillo A.C., Pilditch T.D., Dixon B., Koerselman L., Kosior E., Favoino E., Gutberlet J., Baulch S., Atreya M.E., Fischer D., He K.K., Petit M.M., Sumaila U.R., Neil E., Bernhofen M.V., Lawrence K., Palardy J.E. Supplementary Materials for “Evaluating Scenarios Toward Zero Plastic Pollution. *Science*. 2020. Vol. 369 (6510). P. 1455–1461. — <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>. 2020. Vol. 175. p. — <http://science.sciencemag.org>
6. Le Guern C. (2019). When the mermaids cry: the great plastic tide. — URL: <https://plastic-pollution.org/> (Accessed April 13, 2021)
7. Bishop G., Styles D., Lens P.N.L. Recycling of European plastic is a pathway for plastic debris in the ocean. *Environment International*. 2020. Vol. 142. Article 105893. 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105893>
8. Galloway T. S., Cole M., Lewis C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1 (5), Article 0116, 8 p. — <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
9. Revel M., Chbétel A., Mouneyrac C. (2018). Micro(nano)plastics: A threat to human health? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Vol. 1, pp. 17–23. — <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>
10. La Mantia F. P. (1993). Recycling of Plastic Materials. Toronto–Scarborough: ChemTec Publishing, 189 p.
11. Mikulionok I.O., Radchenko L.B. (2006). Pererobka vtorynnoi syrovyny ekstruziieiu. [Processing of secondary raw materials by extrusion]. Kyiv: NTUU «KPI», 184 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062> (Ukr.)
12. Mikulionok I.O. (2009). Oblasnannia i protsessy pererobky termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny. [Processes and the equipment of processing of thermoplastics with use of secondary

raw materials]. Kyiv: NTUU «KPI». 264 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259> (Ukr.)

13. Mikulionok I.O., Riabtsev G.L. (2001). Osnovni metody i shlykhy vykorystannia polimervmisnykh vidkhodiv [Basic methods and ways of using polymer-containing waste]. *Naukovi visti NTUU «KPI»*. No. 2, pp. 135–147. (Ukr.)

14. Pro skhvalennia Natsionalnoi strategii upravlinnia vadkhodamy v Ukraini do 2030 roku : Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 08.11.2017. [On approval of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030: Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 8, 2017], No. 820-r. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (Accessed April 13, 2021) (Ukr.)

15. Ministerstvo rozvytku gromad ta terytorii Ukrainy: Stan sfery povodzhennia z pobutovymi vadkhodamy v Ukraini za 2019 rik. [Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine: The state of the sphere of household waste management in Ukraine in 2019]. — URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teritory/stan-sfery-povodzhennia-z-pobutovymi-vi/> (Accessed April 13, 2021) (Ukr.)

16. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Part B: Biological Sciences*, 364, pp. 1985–1998. doi: 10.1098/rstb.2008.0205

17. Balasubramani R., Muthunarayanan V., Arumugam K., Periakaruppan R., Singh A., Chang S.W., Chandran T., Singh G.S., Muniraj S. (2021). Treatment of Waste. In: *Waste Valorisation: Waste Streams in a Circular Economy* / Editors: Carol Sze Ki Lin, Guneet Kaur, Chong Li, Xiaofeng Yang. New York: John Wiley & Sons Ltd. Ch. 3. pp. 33–49. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119502753.ch3>

18. Bajracharya R. M., Manalo A. C., Karunasena W., Lau K. (2016). Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon. *Waste Management*, 48, pp. 72–80. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.017>

19. Rajmohan K. V. S., Ramya C., Viswanathan M. R., Varjani S. (2019). Plastic pollutants: Waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, pp. 72–84. — <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>

20. Ragaert K., Delva L., Geemb van K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, pp. 24–58. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

21. Utilizatsiya i obezvezhivaniye otkhodov (krome obezvezhivaniya termicheskimi sposobom (szhiganiye otkhodov). Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 15-2016.

[Recycling and disposal of waste (except for thermal treatment (waste incineration)). Information and technical guide to the best available technologies ITS 15-2016]. Moscow: Biuro NDT, 2016. 198 p. (Rus.)

22. Plastic waste and recycling. Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions / ed. T.M. Letcher (2020). London: Elsevier Inc., 686 p. — URL: https://www.researchgate.net/profile/Mohanraj-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf

23. DSTU 4462.0.01:2005. Okhorona pryrody. Povodzhennia z vidkhodamy. Terminy ta vyznachennia poniat. [Environment protection. Wastes management (handling). Terms and concepts definitions]. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukrainy, 2007. 15 p. (Ukr.)

24. DSTU 4462.3.01:2006. Okhorona pryrody. Povodzhennia z vidkhodamy. Poriadok zdiisnennia operatsii. [Environment protection. Wastes management (handling). Order of operations realization]. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukrainy, 2008. 27 p. (Ukr.)

25. GOST R 56828.31–2017. Nailuchsgie dostupnyye tekhnologii. Resursosberezheniye. Iyerarkhiicheskii poryadok obrashcheniya s otkhodami. [Best available techniques. Resources saving. The hierarchical order of waste treatment]. Moscow: Standartinform, 2017. 24 p. (Rus.)

26. Mikulionok I.O. (2011). Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 83 (6), pp. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371

27. DSTU 2731–94. Syrovyna polimerna vtorynna. Poriadok zbyrannia, zberigannia i pereroblennia vidkhodiv. [Secondary polymeric raw material. Procedure for waste collection, storage and processing]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1994. 13 p. (Ukr.)

28. DSTU 2102–92. Resursy materialni vtorynni. Terminy ta vyznachennia. [Secondary material resources. Terms and definitions]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1992. 12 p. (Ukr.)

29. Mikulyonok I.O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, 48 (11–12), pp. 658–661. doi: 10.1007/s10556-013-9676-x

30. Huang Y., Bird R.N., Heidrich O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (1), pp. 58–73. doi: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002

31. Tang Z., Li W., Tam V.W.Y., Xue C. (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling*, 6, Article 100036, 22 p. — <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>

32. Dave S., Bhogayata A., Arora N. (2017). Impact Resistance of Geopolymer Concrete Containing Recycled Plastic Aggregates. *ICRISET2017: International*

Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology, 1, pp. 137–143. doi: <https://doi.org/10.29007/nwsh>

33. Silva da D.J., Wiebeck H. (2020). Current options for characterizing, sorting, and recycling polymeric waste. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 36 (4). pp. 284–303. — <https://doi.org/10.1177/1477760620918603>

34. Dinesh A., Kumar R.P., Abijith S.R. (2020). Experimental Investigation on Bubble Deck Concrete Using Plastic Waste. In: *Lecture Notes in Civil Engineering, Recent Developments in Waste Management*, A. S. Kalamdhad (ed.). 57, pp. 195–204. — https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_14

35. Spadea S., Farina I., Carrafiello A., Fraternali F. (2015). Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80, pp. 200–209. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>

36. Awoyera P.O., Adesina A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12, Article e00330, 11 p. — <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>

37. Mikulionok I.O. (2003). Obladnannia dlia mekhanichnogo ruinuvannia polimer- ta elastomermisnykh vidkhodiv. [Equipment for mechanical destruction of polymer- and elastomer-containing waste]. *Visnyk KNUiTD: Napriamok «Khimia ta khimichni tekhnologii»*, No. 1, pp. 131–134. (Ukr.)

38. Mikulionok I.O. (2015). Tekhnologichni osnovy pererobleniia polimeriv, plastmas i gumovykh sumishei. [Technological bases of processing of polymers, plastics and rubber mixtures]. Kyiv: NTUU «KPI». 312 p. (Ukr.)

39. Mikulionok I.O. (2020). Tekhnologichni osnovy pererobleniia polimernykh materialov. [Technological bases of processing of polymeric materials]. Kyiv: KPI im. Igora Sikorskoho. 292 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (Ukr.)

40. Mikulionok I.O. (2016). Structural Implementation of the Process of Elasto-Deformation Shredding of Rubber-Containing Wastes (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (9–10), pp. 604–608. doi: [10.1007/s10556-016-0093-9](https://doi.org/10.1007/s10556-016-0093-9)

41. Mikulionok I.O., Lukach Yu.Ye. (2007). Osobennosti konstruktivnogo ispolneniya rotornykh izmelchiteley dlya rezino- i polimersoderzhashchikh otkhodov (Obzor). [Features of design of rotary grinders for rubber and polymer-containing waste (Review)]. *Ecotekhnologii i Resursovoberezeniye*, No. 3, pp. 69–72. (Rus.)

42. 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*, 115, pp. 409–422. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>

43. DSTU 2406–94. Plastmasy, polimery i syntetichni smoly. Khimichni nazvy. Terminy ta

vyznachennia. [Plastics, polymers and synthetic resins. Chemical names. Terms and definitions]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1994. 27 p. (Ukr.)

44. Recycling today. The potential of polypropylene. — URL: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-recycling-potential-of-polypropylene/> (Accessed April 13, 2021)

45. Horodytska O., Valdīs F.J., Fullana A. (2018). Plastic flexible films waste management — A state of art review. *Waste Management*, 77, pp. 413–425. doi: [10.1016/j.wasman.2018.04.023](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.023)

46. Vnjhschnoye ispolzovaniye polimernykh materialov. [Recycling of polymeric materials]. Ed. Ye. G. Lyubeshkina. Moscow : Khimiya, 1989. 192 p. (Rus.)

47. Mikulionok I.O. (2012). Klassifikatsiya termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley. [Classification of thermoplastic composites and their fillers]. *Plasnicheskiye massy*, No. 9, pp. 29–38. (Rus.)

48. Marzouk O.Y., Dheilily R.M., Queneudec M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management*, 27 (2), pp. 310–318. doi: [10.1016/j.wasman.2006.03.012](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012)

49. Tshifularo C.A., Patnaik A. (2020). Recycling of plastics into textile raw materials and products. In: *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles*. Amsterdam: Elsevier Ltd, pp. 311–326. — <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00013-X>

50. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Warchoł J., Moustakas K., Chojnacka K., Witek-Krowiak A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics — A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp. 12321–12333. — <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>

51. Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29, pp. 2625–2643. doi: [10.1016/j.wasman.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004)

52. Mikulionok I.O. (2015). Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (1–2), pp. 14–19. doi: [10.1007/s10556-015-9990-6](https://doi.org/10.1007/s10556-015-9990-6)

53. Mikulionok I.O. (2013). Screw extruder mixing and dispersing units. *Chemical and Petroleum Engineering*, 49 (1–2), pp. 103–109. doi: [10.1007/s10556-013-9711-y](https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y)

54. Mikulionok I.O. (2011). Opredeleniye reologicheskikh svoystv termoplastichnykh kompozitsionnykh materialov. [Determination of the rheological properties of thermoplastic composite materials]. *Plasnicheskiye massy*, No. 7, pp. 26–30. (Rus.)

55. Mikulionok I.O. (2013). Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials. *International Polymer Science and Technology*, 40 (9), pp. 23–28. doi: <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>

56. Brems A., baeyens J., Dewil R. (2012). Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. *Thermal Science*, 16 (1). pp. 669–685. doi: 10.2298/tsci20111121b
57. Rahimi A., Garcha J.M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1 (6), Article 0046, 11 p. doi: 10.1038/s41570-017-0046
58. Thiounn T., Smith R.C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58, pp. 1347–1364. doi: 10.1002/pol.20190261
59. Baena-González J., Santamaria-Echart A., Aguirre J.L., González S. (2020). Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil. *Waste Management*, 118, pp. 139–149. — <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.035>
60. Resursosberegayushchiye tekhnologii : Ekspres-informatsiya. [Resource-saving technologies : Express information]. Moscow: VINITI, 1999. No. 4, pp.11–13. (Rus.)
61. Lu J.-S., Chang Y., Poon C.-S., Lee D.-J. (2020). Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*, 312, Article 123615, 14 p. — <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
62. Li Q., Faramarzi A., Zhang S., Wang Y., Hu X., Gholizadeh M. (2020). Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 226, Article 113525. 30 p. — <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525>
63. Larrain M., Passel van S., Thomassen G., Kresovic U., Alderweireldt N., Moerman E., Billen P. (2020). Economic performance of pyrolysis of mixed plastic waste: Open-loop versus closed-loop recycling. *Journal of Cleaner Production*, 270, Article 122442. 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122442>
64. Latyshenko K.P., Garelina S.A. (2014). Plazmohimicheskiy reaktor po pererabotke polimernykh otkhodov x xodorod i druguyu likhidnyuyu produktsiyu. [Plasma-chemical reactor for the processing of polymer waste into hydrogen and other liquid products]. *Izvestiya NGTU «MAMI». Ser. «Khimicheskoye mashinostroyeniye i snzhenernaya ekologiya»*, 3 (1), pp. 10–17. (Rus.)
65. Corn Plastic to the Rescue. — URL: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/corn-plastic-to-the-rescue-126404720/> (Accessed April 13, 2021)
66. Scaffaro R., Maio A., Sutura F., Gulino E.F., Morreale M. (2019). Degradation and Recycling of Films Based on Biodegradable Polymers: A Short Review. *Polymers*, 11 (4). Article 651, 20 p. doi:10.3390/polym11040651
67. Ispolzovaniye materialnykh resursov za rubezhom: Referativnyy sbornik. [Use of material resources abroad: Abstract collection]. Moscow: VINITI, 1991. Lss. 11, p. 57. (Rus.)
68. Resursosberegayushchiye tekhnologii : Ekspres-informatsiya. [Resource-saving technologies: express information]. Moscow: VINITI, 1999. No. 17, pp.19–23. (Rus.)
69. Gul V.E., Ryzhenkova I.P. (1997). Ekologicheskiye aspekty vtorichnogo ispolzovaniya amortizovannykh upakovok iz polimernykh materialov. [Environmental aspects of recycling depreciated plastic packaging]. *Tara i upakovka*, No. 1, pp. 40–43. (Rus.)
70. Kishk M.W., Karam H.J., Al-Qassimi M., Al-Rowaih A.A., Al-Wadi M.H., Al-Salem S.M. (2020). Study of commercial thermoplastic biodegradable polyester resin as a solid waste mitigation route using ASTM D 5988-18. *WIT Transactions on Ecology and the Environment. Conference: WASTE MANAGEMENT 2020*, Madrid, Spain, 247, pp. 115–123. doi: 10.2495/WM200111
71. Chua H., Yu P.H.F., Ma C.K. (1999). Accumulation of Biopolymers in Activated Sludge Biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 77–79 (1–3), pp. 389–399. doi: 10.1385/abab:78:1-3:389
72. Herzog B., Kohan M.I., Mestemacher S.A., Pagilagan R.U., Redmond K. (2013). Polyamides. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 1–36. — https://doi.org/10.1002/14356007.a21_179.pub3
73. Sharma H.B., Vanapalli K.R., Cheela VR S., Ranjan V.P., Jaglan A.K., Dubey B., Goel S., Bhattacharya J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation & Recycling*, 162, Article 105052, 12 p. — <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>
74. Kulkarni B.N., Anantharama V. (2020). Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 743, Article 140693, 37 p. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>
75. Клемель J.J., Fan Y.V., Tan R.R., Jiang P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, Article 109883. 7 p. — <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>
76. Parashar N., Hait S. (2021). Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? *Science of the Total Environment*, 759, Article 144274, 15 p. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>
77. Sharina I.A., Perepechko L.N., Anshakov A.S. (2016). Perspektivy ispolzovaniya plazmennoy tekhnologii dlya pererabotki/unichtozheniya tehnogennykh otkhodov. [Prospects for the use of plasma technology for processing/destruction of industrial waste]. *EKO*, No. 12, pp. 28–35. (Rus.)
78. Kasimov A.M., Semyenov V.T., Aleksandrov A.N.,

Kovalenko A.M. (2006). Tvyerdyye bytovyye otkhody. Problemy i resheniya. Tekhnologii, oborudovaniye. [Municipal solid waste. Problems and solutions. Technologies, equipment]. Kharkov: KhNAGKh, 301 p. (Rus.)

79. Nanda S., Berruti F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, pp. 1433–1456. — <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>

80. Klemeš J.J., Fan Y.V., Jiang P. (2021). Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43 (13), pp. 1549–1565. — <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1801906>

81. Vollmer I., Jenks M.J.F., Roelands M.C.P.,

White R.J., Harmelen van T., de Wild P., Laan van der G.P., Meirer F., Keurentjes J.T.F., Weckhuysen B.M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59, pp. 15402–15423. doi: 10.1002/anie.201915651

82. Abukasim S.M., Zuhria F., Saing Z. 2019. Alternative management of plastic waste. *Journal of Physics: Conference Series. 1st Borobudur International Symposium on Applied Science and Engineering (BIS-ASE)*, 1517, Article 012041, 7 p. doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012041

83. Mikulionok I.O. (2001). Osnovni metody vukorystannia gumovmisnykh vidkhodiv. [Basic methods of using rubber-containing waste]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*. No. 5, pp. 53–58. (Ukr.)

Received April 21, 2021

UDK 619:614.44

DOI: 10.33070/etars.2.2021.06

**Seryogin O.O.¹, Doctor of Technical Sciences,
Vasylenko O.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Frank J. Riedel², Helmut Aigner²**

¹National University of Food Technologies, Kyiv

68, Volodymyrska, 01033 Kiev, Ukraine, e-mail: seryoginoo@ukr.net

²Ingenieurplanungsgruppe GmbH, München

27, Christoph-Rapparini-Bogen, 80639 München, Germany, e-mail: Intereng.riedel@t-online.de

Technological Complex for Processing of Solid Household and Treatment Facilities Waste with Biogas Obtaining

A concept has been developed for processing of biologically active sludge from municipal wastewater treatment plants in combination with the organic fraction of municipal solid waste using the BioTech Process. The complex, which makes it possible to implement the proposed concept, does not require additional land plots, and classified secondary raw materials, biogas and high-quality biofertilizers suitable for use in the agricultural industry are the products of its activity. The proposed concept will allow solving several problems at once due to the construction of a waste recycling plant on the territory of the filtration zone of the existing water treatment facilities. The new processing plant will be used not only for processing and sorting of solid waste, but also for treating sludge from wastewater treatment plants, together with organic waste obtained from solid waste in the BioTech Process to obtain biogas and biofertilizers, the so-called compost. The new recycling plant will be environmentally friendly and, among other benefits, will be able to process of municipal solid waste with preliminary sorting and separation of recyclable materials. *Bibl. 9, Fig. 1.*

Key words: biogas, municipal solid waste, sewage treatment, recycling, compost.