

І. О. Мікульонок

ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕР-, СКЛО- І МЕТАЛОВМІСНИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ



І. О. Мікульонюк

**ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕР-, СКЛО-
І МЕТАЛОВМІСНИМИ
ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ**

Монографія

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

УДК 628.4.032:502.174-049.2
М59

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
(Протокол № 3 від 14.02.2022 р.)*

Рецензенти: *Д. М. Корінчук*, д-р техн. наук, с.н.с.,
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України
Є. І. Збиковський, д-р техн. наук, проф.,
А. А. Топоров, канд. техн. наук, доц.,
Донецький національний технічний університет

Мікульонок І. О.

М59 Поводження з полімер-, скло- і металовмісними побутовими відходами [Електронний ресурс] : монографія / І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 112 с.: іл. Бібліогр.: с. 86–110.

У монографії розглянуто сучасний стан та перспективи поводження з полімер-, скло- і металовмісними твердими побутовими відходами. Показано досвід застосування системи збору, сортування, перероблення, утилізування та видалення зазначених відходів як в Україні, так і за її межами. Особливу увагу приділено таким видам твердих побутових відходів як ПЕТ-пляшки, пневматичні шини, електричне та електронне обладнання (зокрема освітлювальні лампи, електричні акумулятори та гальванічні елементи, дисплеї телевізійної та комп'ютерної техніки).

Для фахівців хімічної інженерії та промислової екології, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних та екологічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 628.4.032:502.174-049.2

© І. О. Мікульонок, 2022

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІХФ), 2022

ВСТУП

Стрімке збільшення населення планети, а також підвищення його життєвого рівня є передумовою не лише збільшення номенклатури та обсягів найрізноманітнішої продукції й нових матеріалів, а й утворення відповідних відходів після втрати цією продукцією й цими матеріалами споживчих властивостей.

При цьому найбільші проблеми спричинює поводження з відходами споживання, а серед них – твердими побутовими відходами (ТПО), які з одного боку є одним з джерел забруднення довкілля, а з іншого – можуть бути джерелом вторинної сировини, ефективне використання якої істотно знижує техногенний тиск на навколишнє середовище.

Зазвичай ТПО поділяють на такі класи [1]:

- біорозкладні відходи: харчові та кухонні відходи, рослинні відходи, папір;
- матеріали, що підлягають переробленню: папір, картон, скло, пляшки й банки, жерстяні банки, алюмінієві банки, алюмінієва фольга, метали, деякі пластмаси, текстиль, одяг, шини, акумулятори;
- інертні відходи: будівельні відходи, бруд, каміння, сміття;
- електричні та електронні відходи – електроприлади, лампочки, пральні машини, телевізори, комп'ютери, екрани, мобільні телефони, будильники, годинники тощо;
- композитні відходи: відходи одягу, картонні коробки з продуктами та напоями, відходи пластику, такі як іграшки та пластикові садові меблі;
- небезпечні відходи, включаючи більшість фарб, хімікатів, пневматичних шин, батареї, лампочки, електроприлади, люмінесцентні лампи, аерозольні баллончики, добрива;
- токсичні відходи, включаючи пестициди, гербіциди та фунгіциди;
- біомедичні відходи, прострочені фармацевтичні препарати тощо.

Склад ТПО не є однаковим у просторі і в часі. Він залежить від життєвого рівня населення, природних умов, типу населених пунктів, рівня розвитку базових галузей економіки й багатьох інших чинників. Проте одними з основних складових ТПО на початку третього тисячоліття традиційно залишаються полімерні матеріали, скло, метали й папір, які часто присутні у відходах не в чистому вигляді, а в складних комбінаціях один з одним та з іншими матеріалами, що істотно ускладнює поводження з ними.

В Україні (без урахування тимчасово окупованих територій, а також Автономної Республіки Крим) обсяги утворення твердих побутових відходів у 2016 році становили 49 млн м³ (близько 11 млн т з яких лише 5,8 % було перероблено, а решту – розміщено на полігонах та сміттєзвалищах [2]. Через три роки – у 2019 році, утворилося майже 53 млн м³ побутових відходів, більшу частку яких було захоронено на 6000 сміттєзвалищ і полігонах

загальною площею майже 9000 га [3]. (Для порівняння у США обсяг твердих побутових відходів приблизно в двадцяті, а в Росії – в шесті рази більший, ніж в Україні [4].)

Як бачимо, рівень раціонального поводження з твердими побутовими відходами в нашій країні залишається достатньо низьким, тому питання ефективного поводження з ТПО є актуальними не лише в наш час але й залишатиметься таким ще тривалий час.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БРП – біорозкладаний полімер;
ГТВ – гумотехнічний виріб;
КЛЛ – компактна люмінесцентна лампа;
ПВХ – полівінілхлорид;
ПЕ – поліетилен;
ПЕТ, ПЕТФ – поліетилентерефталат;
ПП – поліпропілен;
ПС – полістирол;
ТПО – тверді побутові відходи;
ФРП – фоторозкладуваний полімер;
ASR – alkali-silica reaction;
MSW – municipal solid waste;
WEEE – Waste electrical and electronic equipment.

1. ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ

1.1. Загальні тенденції утворення полімерних відходів

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 році до 381 млн т у 2015 році [5] (за іншими оцінками ці цифри становлять 2,3 млн т і 448 млн т, відповідно [6]). У результаті на одного мешканця планети 2015 року було одержано від 75 [5] до 88 кг полімерів [6], а за оцінками експертів загальний обсяг виробництва полімерів подвоїться вже у 2050 р. До кінця 2017 року людство виготовили 9,2 Гт полімерів, що еквівалентно масі 900000 Ейфелевих веж, або 88 млн синіх китів, або 1,2 млрд слонів [7].

Світове виробництво полімерів і спалювання полімерних відходів призвело у 2017 році 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 % [8].

Внаслідок тривалого (у більшості випадках) розкладання полімерних відходів у природних умовах вони не лише забруднюють навколишнє середовище, а й згубно впливають на живі організми. 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 [5] (доцільніше вважати мікропластик з частинками розміром від 1 мкм до 5 мм [9]). Якщо наприкінці другого тисячоліття основною проблемою вважалося забруднення полімерними відходами суходолу, то згодом стрімкими темпами почалося забруднення світового океану [10]. Вважається, що від 32,115 до 180,558 тис. т (або 1–7 %) поліетилену, який було експортовано 2017 року з Європи, опинилося в океані [11].

Численні шокуючі фотознімки обплутаних 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 і риб істотно прискорюється [12]. Не меншої шкоди мікро- і наночастинки полімерів завдають і людині [13].

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 в промисловості перероблення полімерних матеріалів [14–16]. Підґрунтям цього явища є не лише певні труднощі із забезпеченням промисловості

матеріальними ресурсами, але й наявність ефективних технологій перероблення промислових і побутових відходів [17].

В Україні (без урахування тимчасово окупованих територій, а також Автономної Республіки Крим разом з м. Севастополь) обсяги утворення твердих побутових відходів у 2016 році 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 році також було утворено 312 млн т промислових відходів [2]. Трохи згодом, у 2019 році, утворилося майже 53 млн м³ побутових відходів, або понад 10 млн т, які було захоронено на 6000 сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9000 га [3].

Масова частка полімерних матеріалів у загальному обсязі відходів доходить до 10–16 % [18–20], а термін їх розкладання в природних умовах може досягати 500 років [21].

Щорічно в Європі утворюється в середньому 25 млн т полімерних відходів, при цьому 2014 року 29,7 % з них було ефективно перероблено, 39,5 % піддано енергетичному утилізуванню, а решта – 30,8 % було захоронено [22].

Станом на 2015 рік у Російській Федерації було утилізовано 101594,512 т і знешкоджено 2447,925 т полімерних відходів (при утворенні 1067762,133 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 і переробки характеризуються відходи з ПЕ – 20 %, ПВХ – 10 %, ПС – 12 %, ПП – 17 %, ПЕТФ – на 12 %, а відходи з ламінованого паперу майже взагалі не переробляються [23].

Тому раціональне поводження з полімерними відходами перетворюється на одну з основних соціально-економічних і технічних проблем розвитку сучасного виробництва [24].

1.2. Основні операції поводження з твердими полімерними відходами

Поводження з твердими полімерними відходами (англ. municipal solid waste – MSW) – це дії, спрямовані на запобігання утворенню зазначених відходів, їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізуванню, видалення, знешкоджування та захоронювання [25].

Основними операціями поводження з твердими полімерними відходами є такі [25, 26]:

1) Збирання відходів.

Відходи збирають за допомогою їх вилучання з місць (об'єктів) утворення, сортування (за потреби) за заданими ознаками на однорідні

складники, зберігання в спеціалізованих місцях (об'єктах) до забезпечення оброблення, перероблення, утилізування або видалення. Збирають і заготовлюють відходи за видами, марками, класами (категоріями) небезпеки (зокрема токсичністю) для подальшого визначання найбільш оптимальних напрямків поводження з ними [16]. 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 стилізування 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 і накопичуванням;

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

3) Транспортування відходів.

Транспортують відходи в непошкодженому пакуванні, використовуючи транспортні засоби, призначені для відходів відповідного класу небезпеки.

4) Оброблення та перероблення відходів.

Обробляють відходи їх фізичним, хімічним чи біологічним перетворюванням (зокрема знешкоджуванням, кондиціюванням, іммобілізуванням), для потреби готування їх до наступного безпечного перевезення, перероблення, утилізування чи видалення.

Переробляють відходи для отримування з них матеріалів, призначених для використання в тих чи інших цілях, тобто утилізації.

Обробляти та переробляти промислові відходи можна в місцях їх утворювання (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 та адаптації зазначених процесів, а також технічних засобів їх забезпечення враховують граничні й номінальні значення показників, що змінюються в разі кондиціювання і знешкоджування, а також періодичність та обсяги утворювання відходів. Для досягнення кінцевого результату оброблення чи перероблення промислових відходів в окремих випадках зазначені операції можуть проходити декілька стадій, за допомогою сполучення різних процесів. Це обумовлено тим, що відходи є здебільшого полікомпонентними системами і для кожного компонента можна застосовувати спеціальні методи.

5) Утилізування відходів.

Відходи утилізують для отримання з них тих чи інших матеріалів, а також енергії, за допомогою їх економічно обґрунтованого, безпечного для здоров'я людей перероблення чи прямого використання або спалюванням на базі наявних чи спеціально створюваних виробничих потужностей і технологічних процесів. Утилізація спрямована на повну або часткову заміну традиційних сировини, матеріалів і палива відходами; вилучення з них цінних компонентів; 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 [27]: попередження виникнення; повторне використання; використання як вторинних матеріальних ресурсів; рекуперація енергії; остаточне розміщення (рис. 1.1).

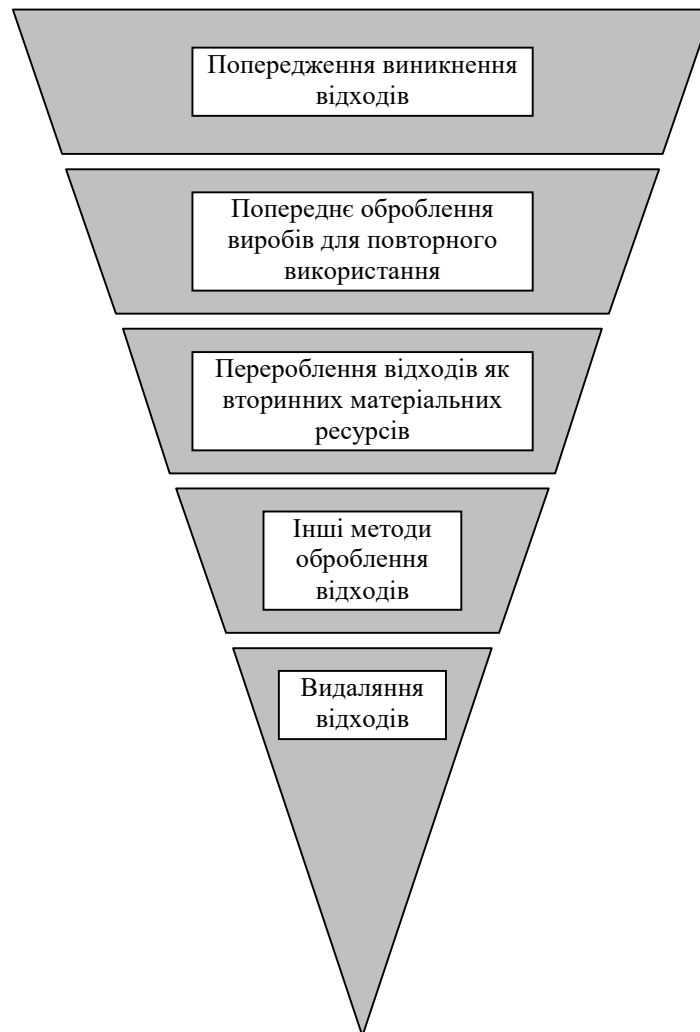


Рис. 1.1. Узагальнений ієрархічний порядок поводження з відходами

З урахуванням світового досвіду поводження з полімерними відходами можна запропонувати розгорнуту класифікацію операцій поводження з твердими полімерними відходами (рис. 1.2).

1.3. Попередження виникнення полімерних відходів

Основними шляхами попередження виникнення відходів є:

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

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

3) скорочення утворення відходів і зниження класу небезпеки відходів у джерелах їх утворення; прикладом може бути використання обрізі пінополістирольних теплоізоляційних панелей, плит і листів для улаштування «засипної» теплоізоляції [28].

Зрозуміло, що попередження виникнення відходів у разі виготовлення полімерної продукції в більшості випадках лише відтерміновує процес видалення відповідних відходів, але не вирішує проблему в цілому.

1.4. Повторне використання полімерних відходів

Повторне використання – це процес повернення використаної продукції в корисний оборот.

Навіть без додаткового оброблення в корисний оборот неодноразово (і без втрати споживчих властивостей) можна повертати різноманітну полімерну тару.

1.5. Утилізування полімерних відходів

1.5.1. Загальні відомості про утилізування полімерних 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.

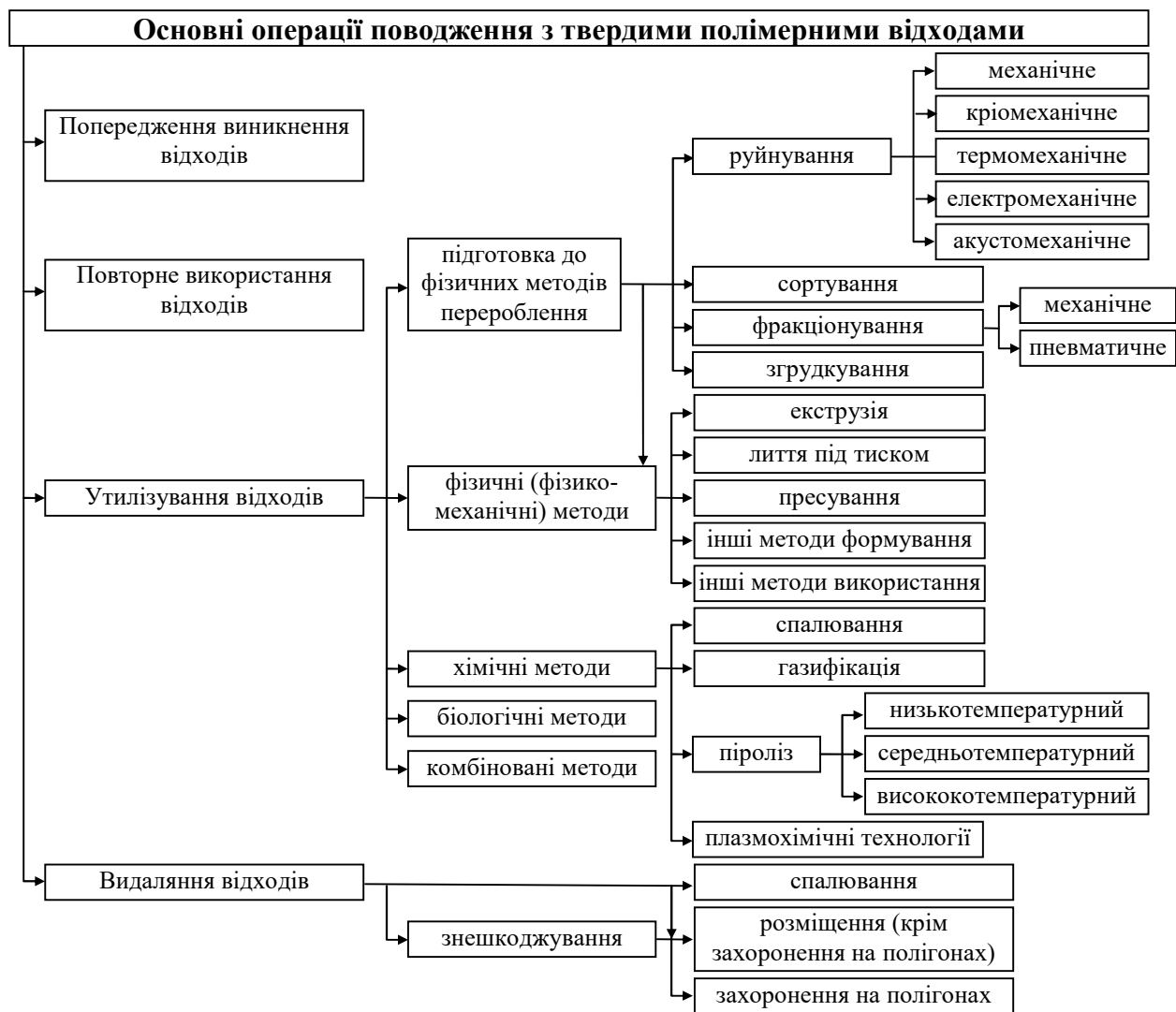


Рис. 1.2. Основні операції поводження з полімерними відходами

1.5.2. Підготовка до проведення фізичних методів перероблення полімерних відходів

Підготовка полімерних відходів до проведення фізичних методів перероблення полягає в їх фізичному (рідше хімічному чи біологічному) перетворюванні для їх підготування до наступного перероблення [29].

Вторинна полімерна сировина – це сировина, що складається з полімерних відходів виробництва і 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, а також змішані відходи виробництва й споживання [30].

Також вторинну полімерну сировину поділяють (табл. 1):

- на класи – за характером процесів формування (відходи термопластичних полімерів і відходи термореактивних полімерів);

– на види – за вихідними полімерами (відходи поліолефінові, полістирольні, полівінілхлоридні, поліакрилатні, поліамідні, поліформальдегідні, полікарбонатні, поліефірні – термопласти, а також відходи амінопластів, фенопластів, склопластиків – реактопласти);

– на групи – за характеристикою полімерних відходів (поворотні й безповоротні відходи).

Таблиця 1.1. Класифікація вторинної полімерної сировини [16]

Категорія полімерної сировини	Клас полімерної сировини	Вид полімерної сировини	Група полімерних відходів	
			поворотні відходи	неповоротні відходи
Відходи виробництва	термопластичні	поліолефіни, полістироли, полівінілхлориди, поліформальдегіди, полікарбонати, поліефіри, поліакрилати, поліаміди	чисті витоки з сопла, облой, ивники, виштампування, обрізь, стружка, некондиційна продукція, прогінні маси термопластів одного виду, у тому числі і 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 і 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 і господарського призначення (ящики, бочки, каністри, банки і т. ін.)
Відходи виробництва	термореактивні	фенопласти, амінопласти, склопластики	–	виштампування, обрізь, стружка, облой, 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 електропристроїв та електроприладів (вилки, розетки, вимикачі тощо), фотоприладдя, тара і т. ін.
Змішані відходи виробництва і 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

Відходи виробництва – залишки сировини, матеріалів, напівфабрикатів, що утворилися під час виробництва продукції або виконання робіт і втратили цілком або частково вихідні споживчі властивості [31].

Відходи споживання – вироби та матеріали, що втратили свої споживчі властивості внаслідок фізичного або морального зносу [32].

Поворотні полімерні відходи – відходи виробництва й споживання, які після подрібнення можливо використовувати в тому ж виробництві як вторинний полімерний матеріал [30].

Безповоротні полімерні відходи – відходи виробництва й споживання, які внаслідок часткової чи цілковитої втрати своїх властивостей не можуть бути повернуті для використання в процесі виробництва основної продукції або для технологічних потреб і потребують додаткових операцій з очищення, розділення, відмивання, модифікації і т. ін. з метою одержання з них вторинних полімерних матеріалів [30].

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

Вторинний полімерний матеріал використовують у складі композицій з первинним полімером, полімер-полімерних композиціях, а також як самостійну полімерну сировину [32]. Крім того, його можна використовувати і в композиціях на основі іншого, крім полімерного, зв'язуючого, наприклад, асфальтобітумних будівельних композиціях [30, 33, 34]. Показано, що додавання в бетон замість мінерального наповнювача полімерних відходів (до 10 %) еквівалентним діаметром до 10 мм підвищує ударну міцність бетону на 7 % [35]. Вторинний полімерний матеріал може бути додано в бетон у вигляді частинок, пластівців або волокон [36]. Дуже ефективним можуть бути будівельні конструкції, виготовлені з полімервмісного бетону, у сейсмонезбезпечних зонах [37].

Армування цементного будівельного розчину поліамідними волокнами, одержаними в результаті утилізування рибальських сіток, збільшує його міцність на розрив на 35 %, а ударну в'язкість – на 1300 % (що можна пояснити високими пружно-еластичними властивостями поліаміду) [38].

Взагалі будівництво – одна з основних і перспективних галузей промисловості утилізування полімерних відходів їх використанням у складі будівельних розчинів і бетонів, як заміника деревини у складі облицювальних, оздоблювальних та ізоляційних матеріалів, а також під час будівництва дорожніх покриттів [39].

Вторинний полімерний матеріал може бути підданий цілеспрямованій зміні хімічних та/або 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 і форми з метою зменшення об'єму й реалізації подальших стадій перероблення відходів.

Різноманітність форми, розмірів і фізичних властивостей матеріалів відходів (плівки, пляшки, каністри, контейнери та ін.), обумовлює й відповідні вимоги до подрібнювального обладнання [40]. При цьому вирішальними властивостями полімерів і пластмас є твердість, еластичність, а також їх термічна й механічна чутливість [41, 42].

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 кріогенного охолодження), а також їх комбінацією, наприклад, струганням з одночасним різанням або роздавлюванням із зсувом і стиранням.

Розрізняють такі основні методи руйнування полімерних відходів: механічне, кріомеханічне (за кріогенних температур), термомеханічне (за температури 80...100 °C [43, 44]), електромеханічне (пропусканням електричного струму крізь компоненти полімерних відходів), акустомеханічне (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 % [7].

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 три групи: темних кольорів (чорний, коричневий, темно-коричневий), синьо-зелених (синій, зелений, блакитний, сірий, фіолетовий) та інших кольорів (червоний, оранжевий, білий, кремовий та ін.). Дрібні полімерні відходи споживання збирають у ящики, бочки, мішки, а крупні – збирають у контейнери або пактують.

На практиці застосовують такі методи ідентифікації полімерів:

1) для об'ємних відходів – ідентифікація за наявним маркуванням (кодом перероблення; англ. «recycling code»; табл. 1.2; рис. 1.3); сортування за оптичними властивостями (візуальний контроль); магнітна сепарація;

2) для подрібнених матеріалів – за густиною; змочуваністю (флотація); електричними властивостями; магнітними властивостями; вибірковою розчинністю [45].

Таблиця 1.2. Знаки коду перероблення для різних полімерів

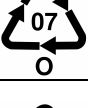
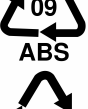
Знак	Ідентифікатор полімеру		Найменування полімеру	Приклади продукції
	ISO 1043 (97/129/ЄС)	ГОСТ 2406–94 [46]		
	1 PET	ПЕТФ	Поліетилентерефталат (лавсан)	Поліестер, пляшки для напоїв
	2 PEHD (HDPE)	ПЭВП (ПЭНД, ПНД)	Поліетилен високої густини (поліетилен низького тиску)	Пластикові пляшки, пакети, сміттєві 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



Рис. 1.3. Приклад коду перероблення полімеру.

Фракціонування (розділення за розміром частинок) здійснюють для розділення подрібненого сировини за розміром й формою частинок, яке найчастіше реалізують на нерухомих і 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 і 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 і термічну агломерацію.

У першому випадку матеріал, що зазнає агломерування, в умовах тертя й зсувного деформування між ротором і 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 в розігрітий до стану напіврозплаву полімерний матеріал, який внаслідок термічних напружень руйнується на частинки різноманітних форми й розмірів. Більші агломерати після цього додатково руйнують.

Найпоширенішим методом заключної стадії рециклінгу полімерних відходів є гранулювання за допомогою екструзійного обладнання. Розрізняють гарячий і холодний методи гранулювання. У першому випадку розплав, який проходить крізь екструзійну головку й відразу ріжеться на гранули, які далі в гарячому стані транспортуються потоком повітря або води, одночасно при цьому охолоджуючись. У разі ж холодного гранулювання відформовані стренги, піддані попередньому охолодженню у водній ванні,

проходять через тягнучий пристрій і потім у холодному стані ріжуться на гранули. Для підготовки розплаву при цьому крім традиційних одночерв'ячних екструдерів також можуть бути застосовані такі універсальні з точки зору перероблюваної сировини екструдери як двочерв'ячні й дискові [47, 48].

У типовій технологічній лінії виробництва грануляту з термопластичних відходів (рис. 1.4) вихідна сировина надходить на приймальний стіл 1, з якої 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 флотаційна мийку. Після промивання й видалення основної вологи подрібнена сировина сушиться і подається в екструдер 14, що формує стренги, які після охолодження подрібнюються і у вигляді гранул потрапляють у бункер-нагромаджувач 17. Залежно від складу і стану вихідної сировини наведена схема може бути змінена.

Також 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) [25].

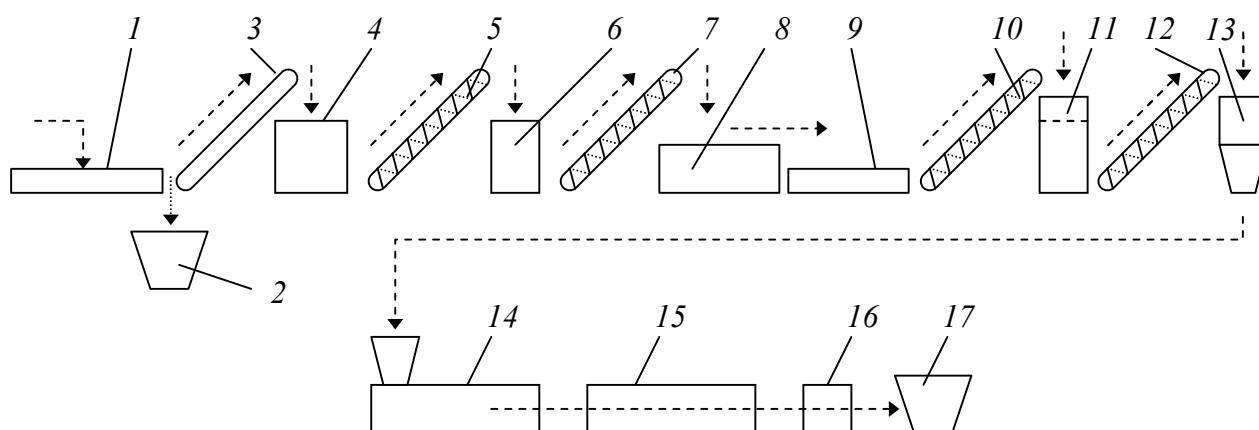


Рис. 1.4. Схема технологічної лінії виробництва грануляту з термопластичного полімеру:
1 – приймальний стіл; 2 – бункер для домішок; 3 – стрічковий транспортер; 4 – подрібнювач;
5, 7, 10, 12 – шнекові транспортери; 6 – гаряча мийка; 8 – фрикційна мийка; 9 – флотаційна
мийка; 11 – промивальний пристрій; 13 – сушарка; 14 – екструдер; 15 – охолодний пристрій;
16 – гранулятор; 17 – бункер-нагромаджувач.

Як бачимо, технологія одержання грануляту з термопластичного полімеру достатньо складна. Тому нерідко вартість вторинного полімеру перевищує вартість первинного [49].

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 [50].

Якщо вторинна сировина надходитиме безпосередньо з таких підприємств, то технологічна схема істотно спрощується, оскільки стають зайвими майже всі стадії до подрібнювання сировини. Саме цим і пояснюється досить великий рівень утилізації використання відходів виробництва: співвідношення рівнів використання полімерних відходів виробництва і споживання становить приблизно 9:1 [51].

Відносно невисокий рівень використання полімерних відходів споживання в багатьох країнах світу значно нижчий за рівень використання полімерних відходів виробництва можна пояснити 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 широким розробленням і впровадженням широкого спектру полімерів, пластмас і матеріалів на їх основі з передбачуваними властивостями.

Крім безпосереднього формування вторинних полімерних матеріалів з одержанням нової полімерної продукції, зазначені матеріали використовують і в інший спосіб, зокрема як наповнювач композиційних матеріалів з неpolімерною матрицею [52, 53]. Тим не менше, дослідники постійно пропонують нові, часто інноваційні, шляхи використання полімерних відходів. Наприклад, запропоновано часткова або повна заміна кварцового піску в будівельних розчинах на основі цементу фрагментами використаних пляшок з ПЕТФ [54], одержання високоякісних волокон для текстильної промисловості [55]. Новим застосуванням полімерних відходів стає виготовлення з них витратних матеріалів (полімерних ниток) для 3D-друку [56].

Відходи реактопластів переробляють у такому порядку [30].

Відходи реактопластів необхідно подрібнювати на частинки розміром не більше як 0,2 мм і пакувати в мішки або спеціальні контейнери, марковані етикеткою із зазначенням підприємства-виробника, виду виходів, їхньої маси й дати виготовлення.

Подрібнені відходи амінопластів і фенопластів рекомендується використовувати як додаток до первинної сировини (не більш як 10 %) на підприємствах, які випускають тару або другорядні деталі.

Відходи перероблення та споживання рекомендується відправляти шляхобудівельним організаціям як наповнювач під асфальтобітумні покриття.

Відходи термопластів переробляють у такому порядку.

Відходи термопластів подрібнюють окрема за видами й кольорами матеріалу розміром частинок не більш як 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 переробляють у такому порядку.

Змішані полімерні відходи поділяють за класами.

Змішані подрібнені відходи реактопластів рекомендується відправляти шляхобудівельним організаціям як наповнювач під асфальтобітумні 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, 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 його до первинної сировини шляхом очищення, розділення, агломерації та(або) гранулювання, то натеper впроваджуються технології перероблення сумішей відходів полімерних та інших матеріалів без їх попереднього оброблення. При цьому перероблення змішаних і забруднених полімерних відходів розплавлюванням полімерів без їх попереднього розділення за видами здійснюється здебільшого на екструзійному обладнанні або обладнанні для лиття під тиском, в якому відбувається повна пластикація й гомогенізація полімерів, а також на обладнанні для прямого термоформування або пресування подрібнених відходів, в якому зазвичай має місце неповна пластикація полімерів [17, 57].

1.5.3. Фізичні (фізико-механічні) методи утилізування полімерних відходів

Під час реалізації фізичних методів змінюються лише форма, розміри, агрегатний стан і 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 [42, 58, 59].

У Російській Федерації основний обсяг вторинних полімерних матеріалів у 2015 році було використано для виготовлення пластмасової тари та упаковки (38 %), деталей для побутової техніки (22 %), а також будівельної продукції (труби, покрівельні матеріали та ін.) (18%) [23].

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 [60, 61].

1.5.4. Хімічні методи утилізування полімерних відходів

Під час реалізації хімічних методів змінюються як фізичні властивості, так і якісний хімічний склад, причому взаємодія речовин здійснюється в стехіометричних співвідношеннях.

Основними хімічними методами утилізування полімерних відходів є спалювання, газифікація, піроліз і плазмохімічні технології [62]. Хімічними методами стилізування можна розкласти більшість великотоннажних полімерів з одержанням різноманітних цінних хімічних сполук [63–65].

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: кускового – у щільному шарі, дрібнозернистого – у «киплячому» (псевдозрідженому) шарі, а також в обертових печах.

Газифікація полімерних відходів – це процес їх перетворення на горючі гази під час високотемпературного (1000–2000 °C) нагрівання з окисником (кисень, повітря, водяна пара, CO₂ або їх суміш).

У результаті газифікації з матеріалу (навіть несортowanego й забрудненого) одержують синтетичний газ, який може бути використаний для синтезу нових полімерів, а також одержання теплової та електричної енергії.

Існує кілька основних способів проведення процесу газифікації полімерних відходів: на нерухомих і рухомих колосниках, кускового – у щільному шарі, дрібнозернистого – у «киплячому» (псевдозрідженому) шарі, а також пилоподібного – у факелі.

Полімерні відходи можна спалювати в доменній печі для виробництва чавуну у чушках, к яуї залізнa руду відновлюють до чавуну внаслідок реакції з монооксидом вуглецю та воднем. За температури доменної печі полімери миттєво газифікуються, сприяючи передусім процесу відновлення й лише незначною мірою підвищуючи температуру реакції [66].

Піроліз полімерних відходів – це процес їх термічного розкладання в безкисневому середовищі або за низького вмісту кисню. Розрізняють піроліз (низькотемпературний (до 500 °С), середньотемпературний (понад 500 °С до 800 °С) і високотемпературний (понад 800 °С) [23].

Вихід продуктів піролізу для деяких полімерів наведено в табл. 1.3 [67].

З олив і воску виділяють бензол, толуол, ксилол, стирол, нафталін та ін., а 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, і мінімізувати їх захоронення [67–70].

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

Таблиця 1.3. Вихід продуктів під час піролізу полімерів за температури 550 °С, % [67]

Продукт піролізу	Полімер					
	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	0,0	15,9
Кокс	0	0	0	0	13,5	12,8
HCl	0	0	0	0	31,7	0
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	0,00
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

Плазмохімічні технології утилізування полімерних відходів – це процес їх термічного розкладання в 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 поліароматичні вуглеводні, технічний вуглець [71].

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

1.5.5. Біологічні методи утилізування полімерних відходів

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

Одним з найбільш перспективних шляхів 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 і хімічних процесів.

Одним з поширених БРП є полімолочна кислота (PLA) – прозорий полімер, одержаний у результаті перероблення кукурудзи [72] або глюкози й розкладаваний до небезпечних продуктів. Зовні PLA нагадує полістирол, проте він характеризується набагато нижчими фізико-механічними властивостями (ударною в'язкістю, термічною стійкістю і бар'єрними властивостями). Зазвичай PLA випускаються у вигляді гранул і використовуються для виготовлення полімерних плівок, волокон, контейнерів і пляшок.

Окрім полімолочної кислоти для виготовлення полімерних плівок застосовуються такі БРП як полібутілен-адіпат-терефталат (PBAT) і полікапролактон (PCL) [73].

У США розроблено технологію біологічно розкладаваних полімерних плівок, призначених для захисту посівів від проростання бур'янів. Такі плівки, виготовлені з суміші полімерів і крохмалю, під дією теплоти й вологи повністю розкладаються протягом одного сезону [74].

Останніми роками асортимент та обсяги БРП значно зростають, тому не без підстав вважається, що саме активне збирання традиційних відходів і використання біорозкладаваних полімерів захистять навколишнє середовище від глобального забруднення. Разом з біорозкладаваними поступово впроваджуються також і фоторозкладавані полімери (ФРП), які піддаються деструкції під впливом сонячного випромінювання [75].

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 двооксиду вуглецю, води й біомаси-гумусу. Проте це стосується «чистих» БРП, а не «умовно» біорозкладані полімери з використанням традиційних синтетичних полімерів (поліолефінів, полівінілхлориду та ін.), наповнених

біорозкладаними компонентами, наприклад, кукурудзяним або картопляним крохмалем [76]. 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- і нанопластиків, які, як уже було зазначено раніше, чинять істотну шкоду тваринному й рослинному світові.

Набагато кращі результати досягаються в разі розкладання дійсно біорозкладаного полімеру, наприклад, поліактиду – біорозкладаного, біосумісного, термопластичного аліфатичного полієфіру, мономером якого є молочна кислота, а сировиною для виробництва – щорічно поновлювані ресурси, зокрема кукурудза [77].

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

Також потрібно зауважити, що не всі біополімерні матеріали (полімерні матеріали, одержані з відновлюваних джерел біомаси, таких як рослинні жири та олії, кукурудзяний крохмаль, солома, тирса, перероблений харчові відходи тощо [78]) є біорозкладаними. Зокрема такий полімер як поліамід 11, який використовується для виготовлення гнучких труб і шлангів, захисних оболонки електричних кабелів, спортивного взуття, не є біорозкладаним [79]).

1.5.6. Комбіновані методи утилізування полімерних відходів

Під час реалізації фізико-хімічних методів відбуваються взаємопов'язані фізичні й хімічні перетворення, причому хімічна взаємодія речовин здійснюється в нестехіометричних співвідношеннях [17].

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 утилізування полімерних відходів. Отже комбіновані методи є сукупністю методів різних груп, один з яких може бути домінуючим.

Найбільш доцільнішим 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.

1.6. Видалення полімерних відходів

Методи видалення відходів можна поділити на дві основні групи [17]:

а) спалювання, яке полягає в здійсненні технологічних заходів, які призводять до окиснювання органічних речовин спалюванням для перетворення відходів у безпечнішу форму й відвернення їх накопичування та/або 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 [80–83].

Серед способів спалювання дуже ефективним є плазмова технологія, за якої небезпечні відходи (зокрема медичні, наприклад, полімерні інструменти з інфекційних відділень лікарень) спалюються в електродугових печах за температури 1300–4000 °С у присутності водяної пари. Ступінь розкладання відходів близька до повної, що робить її найбільш ефективною та екологічно безпечною. Однак через високу енергоємність (0,5–20 кВт·год/(кг відходів) [84]) ця технологія використовується для видалення лише спеціальних відходів;

б) захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення в 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 піддані обробленню, яке полягає в здійсненні механічних, фізичних, хімічних чи біологічних процесів, спрямованих на змінення й переведення небезпечних складників відходів у безпечні форми.

Найдешевшим і найрозповсюдженим (але й найбільш нераціональним) натеper способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах і сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках [85].

Як уже було зазначено, станом на 2019 рік в Україні створено 6000 офіційних сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9000 га, понад 99 % яких не відповідають європейським вимогам [3]. Наявність полігонів і звалищ, а також відсутність контролю за ними призводить до скорочення земель сільськогосподарського призначення, забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження шкідливих комах і гризунів тощо. Підземне захоронення відходів є більш раціональним, проте воно також не виключає забруднення грантових вод.

Зрозуміло, що повністю відмовитися від облаштування сміттєзвалищ, полігонів і могильників натеper неможливо, проте сучасні технології можуть істотно знизити шкідливий вплив відходів, у тому числі й полімерних, на

навколишнє середовище [86].

Щоб розв'язати зазначені проблеми, в усьому світі вводиться контрольоване захоронення відходів, яке 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 [87, 88].

З огляду на порушену проблему, можна з упевненістю стверджувати, що треба якнайшвидше впроваджувати в наше життя принцип 3R (Reuse, Reduce, Recycle – повторне використання, скорочення й перероблення) поводження з твердими полімерними відходами [89]. Цей підхід можна рекомендувати і для відходів з інших матеріалів, зокрема гумових, поводження з якими має свої особливості [90].

1.7. Висновки до розділу 1

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 ресурсоенергоефективних 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. Натепер держава не має можливості виділити відповідні кошти для вирішення проблеми відходів взагалі й твердих полімерних відходів зокрема, проте зараз можна запропонувати такі основні шляхи її розв'язання:

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

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

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

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

2. ПОВОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАНИМИ ПЕТ-ПЛЯШКАМИ

2.1. Загальні тенденції утворення відходів ПЕТ-пляшок

Одним з найбільш поширених видів тари для фасування рідких продуктів є полімерні пляшки. Вони зручні у виробництві, поводженні на лініях розливу й під час транспортування в них готового продукту, оскільки їхня маса на порядок менша, ніж скляних пляшок, і, крім того, на відміну від скляної тари вони не б'ються. Полімерні пляшки зазвичай використовуються для зберігання різних рідин: води, в тому числі газованої, безалкогольних і слабоалкогольних напоїв, моторних мастил, рослинних олій, молочних продуктів, ліків і косметичних засобів [91–93].

Незважаючи на те, що для виготовлення полімерних пляшок використовуються різні матеріали, а саме поліетилен високої й низької густини, поліпропілен, полівінілхлорид і полістирол, найбільшого поширення для цього набув поліетилентерефталат (ПЕТ, ПЕТФ), який належить до групи аліфатичних-ароматичних поліефірів.

Серед поліефірів ПЕТ є найбільш розповсюдженим полімером, при цьому щорічний випуск ПЕТ сягає майже 70 млн т [94]. У свою чергу частка ПЕТ у світовому обсязі виробництва полімерів становить 8 % (станом на 2017 рік), при цьому 30 % загального обсягу синтезованого ПЕТ витрачається на виготовлення пляшок [95, 96].

ПЕТ характеризується високими фізико-механічними властивостями та низькою гігроскопічністю в широкому діапазоні температур (від мінус 40 до 60 °C). Він має високу хімічну стійкість до впливу кислот, лугів, солей, спиртів, парафінів, мінеральних масел, бензину, жирів та ефірів. Проте ПЕТ має й істотний недолік – відносно низькі бар'єрні властивості, адже він пропускає ультрафіолетові промені й кисень всередину ПЕТ-пляшки та вуглекислоту назовні, що погіршує якість і скорочує термін зберігання рідкої продукції [41, 42, 97].

З огляду на свою популярність у споживачів полімерні пляшки одночасно спричиняють і проблему поводження з ними після їх використання [98]. Так, 2016 року щосекунди у світі виготовляли 20 000 ПЕТ-пляшок, при цьому лише менше половини спожитих пляшок було зібрано для вторинної переробки й тільки 7 % з них було перероблено на нові пляшки (вважається, що 2021 року кількість виготовлених ПЕТ-пляшок досягне 583,3 млрд, при тому, що 2004 року було виготовлено майже вдвічі менше – 300 млрд ПЕТ-пляшок). Більша ж частина спожитих пляшок потрапляє на звалища або в океан. У Світовий океан щорічно потрапляє від 5 до 13 млн тонн полімерних відходів, значну частку якого становлять ПЕТ-пляшки, при цьому за прогнозами до 2050 року маса полімерних матеріалів в океані перевищить масу риби, що мешкає в ньому [99, 100].

Навіть у промислово розвинених країнах світу ситуація з переробленням використаних ПЕТ-пляшок різна. Одна з найкращих систем поводження з ПЕТ-відходами організована у Фінляндії, де 2018 року було перероблено 90 % ПЕТ-пляшок, у той час як у США перероблюється лише 19,5 % ПЕТ-пляшок, при цьому варто зазначити, що ПЕТ серед полімерних відходів є найбільш перероблюваним [95].

Наприкінці 2018 року загальна маса первинних полімерних відходів досягла 6900 млн т, з яких 800 млн т припадає на ПЕТ [95]. Крім того, 2016 року 87,4 % бутильованої води в Європі було продано саме в ПЕТ-пляшках [101]. Саме тому раціональне поводження з використаними ПЕТ-пляшками є одним з нагальних питань поводження з твердими відходами споживання в цілому [88, 102, 103].

2.2. Основні операції поводження з використаними ПЕТ-пляшками

2.2.1. Загальні відомості про утилізування ПЕТ-пляшок

Поводження з використаними ПЕТ-пляшками, як одним з видів твердих полімерних відходів – це дії, спрямовані на запобігання утворенню зазначених відходів, їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізування, видалення, знешкодження та захоронювання [25].

Основна частка ПЕТ-сировини, призначеної для подальшого перероблення – це збирання власне використаних і зазвичай забруднених пляшок. Цей процес здійснюється здебільшого спеціалізованими заготівельними організаціями через приймальні пункти вторинної сировини, систему роздільного збирання твердих побутових відходів по великих населених пунктах, а також шляхом розрізненого збору у місцях утворення [104].

Збирання ПЕТ-пляшок через мережі приймальних пунктів зазвичай є економічно малоефективним, адже низька заготівельна вартість пляшок не стимулює населення до регулярної здачі вторинної сировини. Хоча такі пляшки є більш чистими, проте вони є й дорожчими. Як засвідчує світовий досвід, більш ефективним є збирання використаних пляшок через систему роздільного збирання з подальшим сортуванням.

Ідентифікація пляшок як одного з видів об'ємних відходів зазвичай не спричинює труднощів, адже майже всі пляшки з-під напоїв виготовлені з ПЕТ, а на ПЕТ-пляшках з-під інших рідин нанесено спеціальне маркування – знак рециклінгу з цифрою «1» (рис. 2.1; напевно з огляду на значну частку ПЕТ-пляшок у загальній масі полімерних відходів споживання код перероблення полімеру під номером один надано саме поліетилен-терефталату [98]).



Рис. 2.1. Код перероблення поліетилентерефталату

Для відокремлення ПЕТ-пляшок від решти відходів зазвичай застосовують ручне розділення суміші твердих відходів, яке ґрунтується на різниці зовнішніх ознак розділюваних матеріалів [105], проте розроблено метод сортування відходів, що рухаються на конвеєрній стрічці, який ґрунтується на поляризаційному аналізі, при цьому точність ідентифікації ПЕТ-пляшок становить 92,06 % [106].

Сортують ПЕТ-пляшки зазвичай за кольором: пляшки прозорі або безбарвні, пляшки синього й зеленого кольорів, а також пляшки інших кольорів (без розділення на окремі кольори). При цьому поява на ринку товарів ПЕТ-пляшок нових кольорів (наприклад, бурштинове забарвлення пляшок з-під пива) істотно ускладнює процес їх сортування.

Для зручності транспортування та тимчасового зберігання зібрані й відсортовані пляшки зазвичай пресують у тюки на гідравлічних або механічних пакетувальних пресах (тюки для фіксації розмірів і форми піддають обв'язуванню стреп-стрічкою, у свою чергу часто виготовленою з перероблених ПЕТ-пляшок). Пляшки, закриті кришками, гірше стискаються, тому виникає потреба знімати з них кришки чи проколювати пляшки, наприклад, скориставшись спеціальними перфораторами, робочими органами яких зазвичай є два паралельні горизонтально розташовані валки, які обертаються один назустріч одному та споряджені численними шипами.

Спакетовані ПЕТ-пляшки далі спрямовують на перероблення або утилізування.

Переробляють ПЕТ-пляшки для отримання з них продукції, в якій максимально використано властивості поліетилентерфталату. Утилізують же ПЕТ-пляшки для отримання з них тих чи інших матеріалів, а також енергії, за допомогою їх економічно обґрунтованого, безпечного для здоров'я людей перероблення чи прямого використання або спалюванням. Утилізація ПЕТ-пляшок спрямована на повну або часткову заміну традиційних сировини, матеріалів і палива відходами.

ПЕТ-пляшки, які не можуть бути піддані переробленню або утилізуванню, піддають видаленню, тобто операціям, що не призводять до їхньої утилізації. Видалення ПЕТ-пляшок спрямоване передусім на їх захоронення.

2.2.2. Повторне використання ПЕТ-пляшок

Повторне використання – це процес повернення використаної продукції в корисний оборот.

У деяких випадках ПЕТ-пляшки навіть без додаткового оброблення можна неодноразово повертати в корисний оборот (майже без втрати споживчих властивостей). Зазвичай це стосується їх застосування як полімерної тари для нехарчових продуктів.

Підраховано, що одноразове повторне використання однієї ПЕТ-пляшки місткістю 500 мл дає змогу заощадити близько 1 МДж порівняно з її переробленням. При цьому буде заощаджено 74 % енергії, а викиди CO₂ зменшено на 182 % [107].

2.2.3. Використання ПЕТ-пляшок або їхніх фрагментів не за призначенням

Використані ПЕТ-пляшки або їхні частини (зокрема нижні частини стінки з днищем) часто застосовують у приватних домогосподарствах для вирощування розсади або облаштування крапельного поливу рослин, як мініпарники, вертикальні грядки для рослин, огорожі, пастки для комах, присадибні доріжки, годівниці для птахів тощо [108].

Обґрунтовано можливість застосування використаних ПЕТ-пляшок, заповнених кварцовим піском, золою або іншим хімічно нейтральним сипким матеріалом, замість традиційної цегли за умови розташування пляшок поперек кладки та їх скріплення між собою будівельним розчином [109]. Показано, що пропонуваній будівельний матеріал має кращі міцнісні властивості, ніж цегла.

Для країн з низьким життєвим рівнем населення запропоновано з ПЕТ-пляшок будувати цілі будинки, при цьому доведено прийнятність умов проживання в них як з точки зору міцності житла, так і рівня температури й вологості в його приміщеннях [110].

Подрібнені фрагменти ПЕТ-пляшок застосовують як ефективну дешеву насадку біофільтрів для очищення побутових стічних вод [111].

Використані ПЕТ-пляшки запропоновано використовувати як портативний фільтр на основі нанокомпозиту «магнетит–вуглець» для отримання питної води із води, забрудненої різноманітними неорганічними та органічними сполуками й речовинами [112]. Таке технічне рішення дуже актуальне для місцевостей з дефіцитом питної води.

Проте використання ПЕТ-пляшок не за призначенням не вирішує проблему їх утилізування або видалення, а лише відтерміновує ці процеси.

2.2.4. Утилізування використаних ПЕТ-пляшок

2.2.4.1. Загальні відомості про утилізування використаних ПЕТ-пляшок

Як і будь-які полімерні відходи, використані ПЕТ-пляшки піддаються утилізації за трьома напрямками [98]: матеріальний (полімерно-сировинний), сировинний та енергетичний або за чотирма групами методів: використання для виготовлення аналогічної продукції (тобто використання як первинної полімерної сировини); використання для виготовлення іншої продукції, зазвичай зі зниженими експлуатаційними властивостями (тобто використання як вторинної полімерної сировини; рециклінг); перероблення на хімічну сировину, а також спалювання для одержання здебільшого теплової енергії.

2.2.4.2. Підготовка до проведення фізичних методів перероблення

Підготовка використаних ПЕТ-пляшок до проведення фізичних методів перероблення полягає в їх фізичному (рідше хімічному чи біологічному) перетворюванні для їх підготовки до наступного перероблення [98].

Одним із заходів підготовки ПЕТ-пляшок до проведення фізичних методів перероблення є одержання з них грануляту.

Технологічна лінія одержання грануляту з використаних ПЕТ-пляшок зазвичай містить послідовно розташовані стіл для приймання пресованих тюків з ПЕТ-пляшками, сортувальний стрічковий конвеєр, попередній подрібнювач, шредер (остаточний подрібнювач), флотаційну мийку, сепаратор-віддільник сторонніх домішок, фінішну мийку, сушарку, конвеєр, гранулятор, затарювач (наприклад, біг-бегів) [113]. Ця лінія мало чим відрізняється від типової технологічної лінії виробництва грануляту з термопластичних полімерів [29, 98].

Також у технології рециклінгу ПЕТ-пляшок поширені лінії з одержання ПЕТ-пластівців, які згодом переробляють на іншу продукцію безпосередньо або на гранулят. Залежно від якісного й кількісного складу домішок вихідної сировини зазвичай застосовуються такі етапи процесу одержання пластівців з ПЕТ-пляшок:

- розтарювання тюка з відпрацьованими пляшками;
- ручне видалення відходів з інших полімерів (передусім з ПВХ), полімерної плівки, паперу, скла, камення та металу, сортування відібраних ПЕТ-пляшок за кольором та типорозміром;
- попередня фрикційна мийка без руйнування (різання) ПЕТ-пляшок;
- попереднє руйнування (різання) ПЕТ-пляшок;
- остаточне видалення каміння, скла та металу;
- повітряна сепарація для видалення плівки, паперу та етикеток;
- подрібнення (сухе та/або вологе);

- видалення сторонніх полімерів низької густини;
- гаряча мийка з поверхнево-активними речовинами;
- промивання подрібнених і промитих пластівців водою;
- сушіння пластівців;
- повітряна сепарація висушених пластівців;
- автоматичне сортування пластівців;
- контроль якості пластівців;
- затарювання готових пластівців у «біг-бегі» або іншу тару.

Стадії очищення й мийки ПЕТ-пляшок або їхніх фрагментів дуже відповідальні, адже такі широко поширені органічні домішки в ПЕТ-відходах як полівінілхлорид, поліолефіни, поліактид, полівілацетат, целюлоза й папір, різноманітні клеї, барвники, цукор та білки під час вторинного перероблення можуть бути піддані термомеханічній та іншим видам деструкції, внаслідок чого істотно погіршується якість одержуваної з вторинного ПЕТ продукції (передусім через значне зниження молекулярної маси ПЕТ).

Цікаво, що саме на стадії мийки й сепарації ПЕТ-пляшок відбуваються чималі технологічні втрати та утворюються супутні відходи, які можуть досягати 25–35 % від маси вхідної сировини. До цих втрат належать бруд, сторонні включення, пляшки нестандартних кольорів та інших полімерів, кришки, етикетки, залишки рідини тощо. Частина з них, зокрема пляшки нестандартних кольорів та інших полімерів, кришки та етикетки, можуть бути також перероблені [104].

Однією зі стадій підготовки до повторного перероблення ПЕТ-пляшок фізико-механічними методами є відокремлення від них етикеток [114]. Нескладна на перший погляд операція насправді спричинює певні труднощі, оскільки потрібно не лише ідентифікувати наявність етикетки на пляшці, а й ефективно її відділити, адже різними виробниками застосовуються й різні методи фіксації етикеток на ПЕТ-пляшках.

2.2.4.3. Фізичні (фізико-механічні) методи утилізування ПЕТ-пляшок

Під час реалізації фізичних методів змінюються лише форма, розміри, агрегатний стан і 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 [16, 32, 41, 42, 58].

Наприклад, у Російській Федерації функціонує низка підприємств, які переробляють використані ПЕТ-пляшки безпосередньо на «нові» ПЕТ-пляшки «другої свіжості», на сировину для виробництва геотекстилю та інших текстильних волокон, а також стреп-стрічки (поліестерова стрічка для

обв'язування різноманітної продукції в металургії, машинобудуванні, деревообробній промисловості й будівництві) [23]. Виробництво поліестерової стреп-стрічки (інша назва – «стрепінг-стрічка») у Росії складає близько 1200 тонн на рік, при цьому її міцність становить 450–600 МПа, вона має високі еластичність та відносне подовження, широкий температурний діапазон експлуатації (від мінус 30 до 90 °С), вчетверо меншу ніж у сталі густину, не кородує й повністю піддається переробленню, а також характеризується безпечністю в поводженні з нею.

Достатньо цікавими можуть бути результати дослідження щодо емісії парникових газів і споживання води для виробників пляшок з первинного, вторинного, а також біорозкладаваного ПЕТ [115]. Однозначного висновку щодо ефективності використання вторинного й біорозкладаваного ПЕТ для виробництва ПЕТ-пляшок зробити не можна, адже, незважаючи на зниження в цьому разі емісії парникових газів (до 82 і 56 %, відповідно), споживання води під час виготовлення пляшок з первинного ПЕТ менше, що вкрай актуально для країн з дефіцитом питної води.

Також вторинний ПЕТ переробляють на листи, з яких формують жорстку упаковку (лотки) для фруктів і яєць.

До «чисто механічного» методу перероблення ПЕТ-пляшок можна віднести пропозицію, яка полягає в нарізанні з циліндричної частини стінки пляшок стренги (нитки), використовуваної для перероблення в 3D принтері [116]. Запропонована технологія достатньо цікава, проте вона передбачає використання недеформованих циліндричних пляшок, при цьому у відходи потрапляють днища й горловини пляшок, які згодом також потрібно переробляти, але вже в інший спосіб.

Також запропоновано 3D друк з живленням екструдера 3D принтера не стренгою, а ПЕТ-пластівцями, що істотно спрощує технологію 3D друку, проте живлення екструдера дискретною полімерною сировиною може призвести до погіршення фізико-механічних властивостей екструдату [117].

Відомо, що фізико-механічне перероблення вторинного ПЕТ, зокрема екструзією, спричинює певне погіршення експлуатаційних властивостей екструдату [15, 114, 118]. Тому для забезпечення фізико-механічних властивостей продукції, одержуваної екструзією, вторинний ПЕТ запропоновано додавати до первинного в масовому співвідношенні 30:70 [119, 120].

Дуже поширене перероблення вторинного ПЕТ на волокно для використання в текстильній промисловості [121]. При цьому текстильні волокна, одержані з використаних ПЕТ-пляшок, використовують безпосередньо, а також у різному кількісному поєднанні з волокнами, одержаними з первинного ПЕТ, та іншими волокнами, наприклад, бавовняним [122]. Показано, що волокна з вторинного ПЕТ мають менші значення відносного подовження та міцності під час розтягу, проте зазначені показники

можуть бути дещо поліпшені за рахунок різноманітних технологічних заходів.

Волокно з вторинного ПЕТ застосовують для одержання тканин, призначених для виготовлення чохлів для автомобільних сидінь. Ґрунтовні дослідження підтвердили високі фізико-механічні властивості виготовлених чохлів [123].

Розроблено технологію перетворення використаних ПЕТ-пляшок на полімерну стрічку або стренгу для їх застосування у виробництві різноманітної продукції: плетених меблів і господарських сумок, покрівельних матеріалів, біжутерії, ворсу для щіток тощо [124].

Досліджено можливість перероблення ПЕТ-пляшок на ефективні ультрафільтраційні мембрани для розділення різних рідких сумішей, одним з компонентів яких є вода [125].

Крім перетворення вторинної ПЕТ-сировини на нову полімерну продукцію, зазначену сировину можна використовувати й разом з іншими компонентами для одержання композиційних матеріалів з потрібними властивостями [52, 126].

Одним зі споживачів вторинного ПЕТ є будівництво.

Вторинний гранульований ПЕТ у кількості до 5 % використовують замість кварцового піску у складі самоущільнюваного бетону [127].

Показано, що часткова заміна в бетоні кварцового піску частинками ПЕТ-пляшок не лише дещо вирішує проблему утилізування ПЕТ-відходів, а й знижує густину бетону та підвищує його пластичність та механічну оброблюваність [128]. При цьому додавання до бетону фрагментів ПЕТ-пляшок у кількості до 1 % (за мас.) майже не впливає на міцність і пористість бетону, проте дає змогу частково утилізувати ПЕТ-відходи [129].

Бетон, армований одержаним з ПЕТ-пляшок волокном, має поліпшені, порівняно з традиційним бетоном, фізико-механічні властивості: його міцність під час стискання збільшується на 3,6–9,0 %, міцність на розрив – на 11,8–20,3 %, міцність під час зсуву – на 7–15 %, а модуль пружності під час розтягу – на 16,9–21,5 % [130].

Армування цементного будівельного розчину ПЕТ-пластівцями, одержаними в результаті подрібнення за допомогою шредера ПЕТ-пляшок (масове співвідношення в розчині «кварцовий пісок – ПЕТ-пластівці» становить 3:1), забезпечує його міцність до 30 МПа впродовж трьох годин, що становить 90 % від нормованого значення, якого він набуває за 7 діб [131].

Для підвищення адгезії між бетонною матрицею та армувальними ПЕТ-волокнами їх поверхню обробляють гідроксидом натрію з наступним нанесенням силанового агента (сполук кремнію з воднем) [132].

Додавання до асфальтобетону від 2 до 4 % (за мас.) ПЕТ-крихти, одержаної в результаті подрібнення ПЕТ-пляшок, підвищує експлуатаційні властивості дорожнього покриття [133].

Фрагменти ПЕТ-пляшок додають у бутадієн-стирольний каучук для застосування одержаного матеріалу в дорожньому будівництві, зокрема для улаштування «поліцейських, що лежать» [134].

У Китаї відпрацьовано технологію одержання ковдр, на 100 % виготовлених з перероблених ПЕТ-пляшок [135].

Особливу проблему спричиняють ПЕТ-пляшки, які з тих чи інших причин потрапляють у Світовий океан. Доведено, що навіть за умови багаторічного впливу морської води, сонячних променів тощо, вилучені з океану ПЕТ-пляшки можуть бути перероблені на нову продукцію (зрозуміло, що з дещо гіршими експлуатаційними властивостями, порівняно з первинним ПЕТ) [136].

Розроблено інноваційну технологію одержання продукції з композиції двох нерозчинних один в одному вторинних полімерів (одержаного з пляшок з-під кока-коли ПЕТ, а також поліетилену низької густини). Зазначені полімери змішуються між собою в черв'ячному екструдері [32, 137], одержувана композиція гранулюється, після чого одержані гранули переробляються екструзією, литтям під тиском або пресуванням [58, 59]. Підкреслено, що вторинне перероблення не вирішує проблеми забруднення навколишнього середовища, а лише відтерміновує цей процес, оскільки після закінчення терміну служби одержаного композиційного матеріалу він знову перетворюється на полімерні відходи.

Для визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесів перероблення вторинної ПЕТ-сировини на різноманітну продукцію доцільно застосовувати широкі можливості математичного моделювання, яке передбачає наявність даних щодо реологічних і теплофізичних властивостей перероблюваних композиційних матеріалів [60, 61].

Однією з причин, що стримують широке використання ПЕТ-пляшок як вторинної сировини для виробництва нової продукції, є розроблення та впровадження широкого спектру полімерів, пластмас і матеріалів на їх основі з прогнозованими високими експлуатаційними властивостями.

2.2.4.4. Хімічні методи утилізування ПЕТ-пляшок

Під час реалізації хімічних методів змінюються як фізичні властивості, так і якісний хімічний склад, причому взаємодія речовин здійснюється в стехіометричних співвідношеннях.

Досліджено такі хімічні методи перероблення ПЕТ як гідроліз, метаноліз, гліколіз, аміноліз та амоноліз, у результаті проходження яких ПЕТ розкладається з утворенням нових хімічних сполук [138–141].

За допомогою метанолізу ПЕТ-пляшки перетворюють на два основних продукти реакції: диметилтерефталат та етиленгліколь. Наступне розділення продуктів реакції дистиляцією разом з кристалізацією дає змогу позбутися

небажаних домішок з одержуваних мономерів, потрібних для наступної полімеризації [142].

Розроблено метод хімічної деполімеризації ПЕТ-пляшок з перетворенням полімеру на етиленгліколь і терефталеву кислоту [143]. При цьому вихід продуктів у результаті деполімеризації ПЕТ впродовж 20 хв становить 95 % (за мас.). Одержаний етиленгліколь може бути використаний у виробництві як безпосередньо ПЕТ, так і поліуретанів, целофану та інших полімерів, а також у виробництві компонентів автомобільних антифризів і гальмівних рідин як один з їхніх основних компонентів. Терефталева кислота передусім використовується для одержання насичених полієфірів, зокрема ПЕТ.

Технологію деполімеризації ПЕТ з одержанням терефталевої кислоти як основного продукту розглянуто в [144–147], при цьому вихід терефталевої кислоти в результаті деполімеризації ПЕТ впродовж 25 хв становить 92 % (за мас.) [146].

Хімічним переробленням використаних ПЕТ-пляшок одержують високоякісні алкідні смоли, які застосовують як плівкоутворювальну основу (лаки) для емалевих фарб [148]. Також розроблено технології виробництва фарб на основі епоксидної смоли, одержаної у результаті гліколізу ПЕТ-пляшок [149], та акрилових фарб [150].

Також запропоновано процес одержання вуглецевих наноструктурних матеріалів, зокрема фулеренів і вуглецевих нанотрубок, шляхом термічного розкладання ПЕТ-пляшок [151]. Основна перевага зазначеного процесу – достатньо просте одержання вуглецевих наноматеріалів з відходів ПЕТ без використання розчинників. У такий спосіб можна одержувати функціоналізовані магнітні фулерени й застосовувати їх як сорбційний матеріал, який характеризується високою селективністю та адсорбційною здатністю, а також може бути застосовано для видалення антибіотиків із забруднених ними середовищ [152].

Іншими хімічними методами утилізування ПЕТ-пляшок є спалювання, газифікація, піроліз і плазмохімічні технології, у результаті проведення яких одержують різноманітні хімічні сполуки [98].

Спалювання є одним з найбільш поширених та ефективних методів утилізування ПЕТ-пляшок, непридатних для перероблення через значну забрудненість та/або небезпеку для людини та інших живих організмів (наприклад, ПЕТ-пляшки з інфекційних відділень закладів охорони здоров'я). У цьому разі ПЕТ-пляшки використовують як котельно-пічне паливо [98].

Досліджено фізико-хімічні властивості вимитих використаних ПЕТ-пляшок як палива для одержання теплової енергії [153]. Показано, що теплотвірна здатність зазначених відходів становить 13,2 МДж/кг (приблизно половину від теплотвірної здатності високоякісного кам'яного вугілля (24,50–

40,92 МДж/кг)), а елементний склад продуктів згоряння (С, Н, N, S, О) аналогічний елементному складу продуктів згоряння біомаси. Тому підсушені ПЕТ-відходи можуть бути рекомендовано для спалювання в обертових печах цементної промисловості (аналогічно спалюванню зношених автомобільних шин [154]) або для змішування з іншими видами палива для одержання сумішевого палива з потрібними властивостями.

Газифікації зазвичай піддають забруднені ПЕТ-пляшки, які через наявність на них стійких сторонніх речовин недоцільно піддавати очищенню для подальшого рециклінгу. У результаті газифікації під дією високої температури та окисника (кисень, повітря, водяна пара, CO_2 або їх суміш) ПЕТ перетворюється на горючі гази. Також утворюються рідка й тверда фаза, зокрема гудрон і напівкокс, які також можуть бути використані як паливо. Показано, що найбільший вихід синтез-газу (виходячи зі співвідношення H_2/CO) досягається за температури 800 °С [155].

Також ПЕТ-пляшки піддають піролізу – процесу їх термічного розкладання в безкисневому середовищі або за низького вмісту кисню.

Рідше ПЕТ-пляшки піддають плазмохімічним технологіям, тобто процесу їх термічного розкладання в низькотемпературній плазмі (за температури понад 1000 °С) у присутності кисню, повітря, водяної пари, діоксиду вуглецю [98].

2.2.4.5. Біологічні методи утилізування ПЕТ-пляшок

Під час реалізації біохімічних методів утилізування відходів проходять їх хімічні перетворення за участю мікроорганізмів і рідше – грибів і водоростей.

2020 року французькими вченими було відкрито високоефективний, оптимізований фермент, який перевершує всі ПЕТ-гідролази, забезпечуючи за 10 год щонайменше 90 % деполімеризацію ПЕТ, перетворюючи його на мономери [94].

Показано, що на процес біологічного розкладання ПЕТ впливають характеристики полімеру й характер його попереднього оброблення зокрема молекулярна маса (спостерігається істотне зниження швидкості розкладання зі збільшенням молекулярної маси полімеру), функціональні групи, наявність пластифікатору, кристалічність, температура плавлення, наявність різноманітних добавок. Також істотно впливає вид розкладаваного об'єкта: гранули, порошок, плівка, волокна тощо. Крім того, впливають і умови проходження процесу, а саме температура й вологість [156].

Японські вчені виділили бактерію *Ideonella sakaiensis* 201-F6, що має два ферменти, які можуть розщеплювати ПЕТ на дрібні фрагменти, які бактерія може перетравити. Колонія зазначених бактерій може розкласти пластикову плівку приблизно за шість тижнів [157].

2.2.4.6. Комбіновані методи утилізування ПЕТ-пляшок

Під час реалізації комбінованих, зокрема фізико-хімічних, методів відбуваються взаємопов'язані фізичні й хімічні перетворення, причому хімічна взаємодія речовин здійснюється в нестехіометричних співвідношеннях.

Окремі полімерні відходи, у тому числі й несортвані, які містять і ПЕТ-пляшки, під час утилізації можуть піддаватися дії декількох чинників різної природи (найчастіше не одночасної, а послідовної дії), у результаті мають місце комбіновані методи утилізування полімерних відходів. Отже комбіновані методи є сукупністю методів різних груп, один з яких може бути домінуючим [98].

2.2.5. Видаляння ПЕТ-пляшок

Методи видалення ПЕТ-відходів, у тому числі й ПЕТ-пляшок, як і полімерних відходів у цілому, можна поділити на дві основні групи [98]:

а) спалювання, яке полягає в здійсненні технологічних заходів, що призводять до окиснювання органічних речовин спалюванням для перетворення відходів у безпечнішу форму й відвернення їх накопичування та/або отримування енергії; спалювання супроводжується виділенням теплової енергії, яка неповоротно втрачається й не використовується.

б) захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення в 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.

На превеликий жаль найдешевшим і найбільш розповсюдженим натеper способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах і сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках. Проте наявність полігонів і звалищ, а також відсутність контролю за ними призводить до скорочення земель сільськогосподарського призначення, забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження шкідливих комах і гризунів тощо. Підземне захоронення відходів є більш раціональним, проте воно також не виключає забруднення грантових вод. Станом на 2019 рік в Україні створено 6000 офіційних сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9000 га, понад 99 % яких не відповідають європейським вимогам [3].

Щоб розв'язати зазначені проблеми, в усьому світі вводиться контрольоване захоронення відходів, яке 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.

Практична реалізація питання перероблення використаних ПЕТ-пляшок залежить від багатьох чинників. Як свідчить ще донедавна успішна практика утилізації використаних ПЕТ-пляшок, реалізована на депозитній системі фірмою RePlanet (Каліфорнія, США), ефективне поводження з відходами тари цього типу надзвичайно примхливе. Адже через стрімке здешевлення природного газу та збільшення соціальних витрат зазначена фірма в серпні 2019 року закрила останні 284 центри з прийому ПЕТ-пляшок та звільнила 750 працівників. Стрімке збільшення витрат на переробку ПЕТ-пляшок призвело до перевищення вартості вторинного ПЕТ порівняно з первинним (не кажучи вже про зниження якості вторинного ПЕТ) [158].

Як бачимо, поводження з використаними ПЕТ-пляшками є проблемою навіть високорозвинених країн. Так, Директивою 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради про упаковку та відходи від упаковки ухвалено рішення про необхідність повторного перероблення не пізніше 31.12.2025 р. лише 55 % (за масою) полімерної упаковки, а не пізніше 31.12.2030 р. – 65 % [159]. Директивою 2019/904/ЄС Європейського Парламенту і Ради про скорочення впливу деяких пластикових продуктів на оточуюче середовище від 05.06.2019 р. передбачено, що з 2025 року в країнах Європейського Союзу ПЕТ-пляшки міститимуть не менше 25 % переробленого полімеру, а з 2030 року цей показник має бути не менше 30 % [160].

Отже, вирішення порушеної проблеми, на превеликий жаль, є справою не одного десятиліття, проте скоротити цей процес у наших інтересах.

2.3. Висновки до розділу 2

Проблема поводження з використаними ПЕТ-пляшками є надзвичайно актуальною для будь-якої країни, і Україна серед них не є винятком.

Переймаючись актуальністю порушеної проблеми, більшість високорозвинених країн намагаються створити умови, які б заохочували і споживачів, і виробників ПЕТ-тари, навіть за умови збитковості відповідних заходів. Тому в сучасних умовах одним з найбільш неефективних заходів вирішення проблеми використаних ПЕТ-пляшок залишається повна відповідальність виробника за випущену на ринок продукцію.

3. ПОВОДЖЕННЯ З ПНЕВМАТИЧНИМИ ШИНАМИ, ЩО ВТРАТИЛИ СВОЇ СПОЖИВЧІ ВЛАСТИВОСТІ

3.1. Загальні тенденції утворення відходів пневматичних шин

Одним з найбільш важливих, а в багатьох випадках майже незамінним матеріалом, продукція з якого застосовуються майже у всіх сферах матеріального виробництва та побуті, є гума – продукт вулканізації гумових або латексних сумішей [93, 161].

Проте, незважаючи на високі експлуатаційні властивості гум, і передусім високу еластичність в широкому діапазоні значень температури, з часом гумова продукція втрачає споживчі властивості. Це стосується майже всіх виробів і матеріалів, виготовлених з будь-яких гум, і передусім пневматичних шин, частка яких серед виробів гумотехнічної промисловості становить близько 60 % [162].

Пневматична шина – це пружна оболонка, яка установлюється на ободі колеса й заповнюється газом або повітрям під тиском [93, 163]. Вона є досить складним виробом, до складу якого входять різноманітні матеріали, що характеризуються високою стійкістю до механічних навантажень і впливу навколишнього середовища. І саме високі експлуатаційні характеристики шини наприкінці її життєвого циклу стають серйозною перешкодою перед необхідністю позбавлення від неї.

У зв'язку з безперервним збільшенням виробництва пневматичних шин для колісних транспортних засобів і їх причепів проблема ефективного поводження зі спрацьованими шинами з кожним роком набуває все більшого економічного та екологічного значення, оскільки в природних умовах шини розкладаються не менше ніж за століття. Щорічно утворюється понад 1 млрд спрацьованих пневматичних шин [164], при цьому тільки в Європі щорічно утворюється близько 2 млн т, а в США – 2,8 млн т спрацьованих шин [165]. В Україні маса неутилізованих шин перевищує 10 млн т, щорічно в країні їх утворюється до 0,4 млн т, проте утилізуванню піддається лише 10 % спрацьованих автомобільних шин [166].

З економічної точки зору найбільш ефективними методами утилізації є такі, які дають змогу максимально використовувати цінні властивості матеріалів, що містяться в шинах, і передусім – гуми. Адже на відміну від більшості зразків гумотехнічної продукції наприкінці свого терміну експлуатації, який настає зазвичай після 50–100 тис. км пробігу (найчастіше в результаті зносу протектора) [167], шина представляє собою абсолютно унікальний вид відходів, адже ані її склад, ані властивості впродовж експлуатації майже не змінюються.

3.2. Основні операції поводження з шинами, що втратили свої споживчі властивості

Пневматичні шини, що втратили свої споживчі властивості й потребують подальшого поводження з ними, можна поділити на шини, спрацьовані в результаті використання за призначенням (тобто відходи споживання), та шини, відбраковані в результаті проходження ними контролю якості під час їх виготовлення (тобто відходи виробництва) [98].

Основне джерело утворення шин, що втратили свої споживчі властивості, – це результат їх використання за призначенням, який призводить до утворення спрацьованих шин – пневматичних транспортних шин, які втратили свої функціональні властивості в результаті закінчення терміну служби або через аварійні ситуації [168].

У сучасній політиці поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості, зазвичай розрізняють п'ятиступеневий ієрархічний порядок поводження з ними [27]: відновлення й повторне використання; використання не за призначенням; використання як вторинних матеріальних ресурсів; рекуперація енергії; остаточне розміщення (рис. 3.1).

У 2018 році в США поводження зі спрацьованими шинами здійснено так, % [169]:

- перероблення на паливо – 43...49;
- виробництво асфальту та ізоляційних матеріалів – 25...26;
- захоронення (розміщення на звалищах) – 11...16;
- цивільне будівництво (улаштування гідротехнічних споруд, зміцнення схилів тощо) – 7...8;
- перероблення на іншу продукцію (покриття для ігрових і спортивних майданчиків, залізничних переїздів тощо) – 7...8.

3.3. Відновлення й повторне використання шин

Одним із заходів, що зменшують обсяг виготовлення нових пневматичних шин, а отже й обсяг утворення відповідних відходів – це максимально продовжувати терміни служби шин на легковому й вантажному автотранспорті, а також на автонавантажувачах, застосовуючи відновлювальний ремонт протекторів шин [27]. Отже, найбільш раціональною операцією поводження зі спрацьованими в результаті використання за призначенням шинами є продовження терміну служби спрацьованих шин їх відновлення для повторного використання за призначенням. Це, як уже було зазначено, дає змогу зменшити кількість виготовлених шин, а отже й утворюваних відходів, а також хоча б частково поліпшити екологічний стан довкілля.

Відновлена пневматична шина – це пневматична шина, відремонтована заміною зношеного протектора новим. Ця заміна також може передбачати

повне або часткове відновлення верхнього шару покривної гуми боковин шини [167].

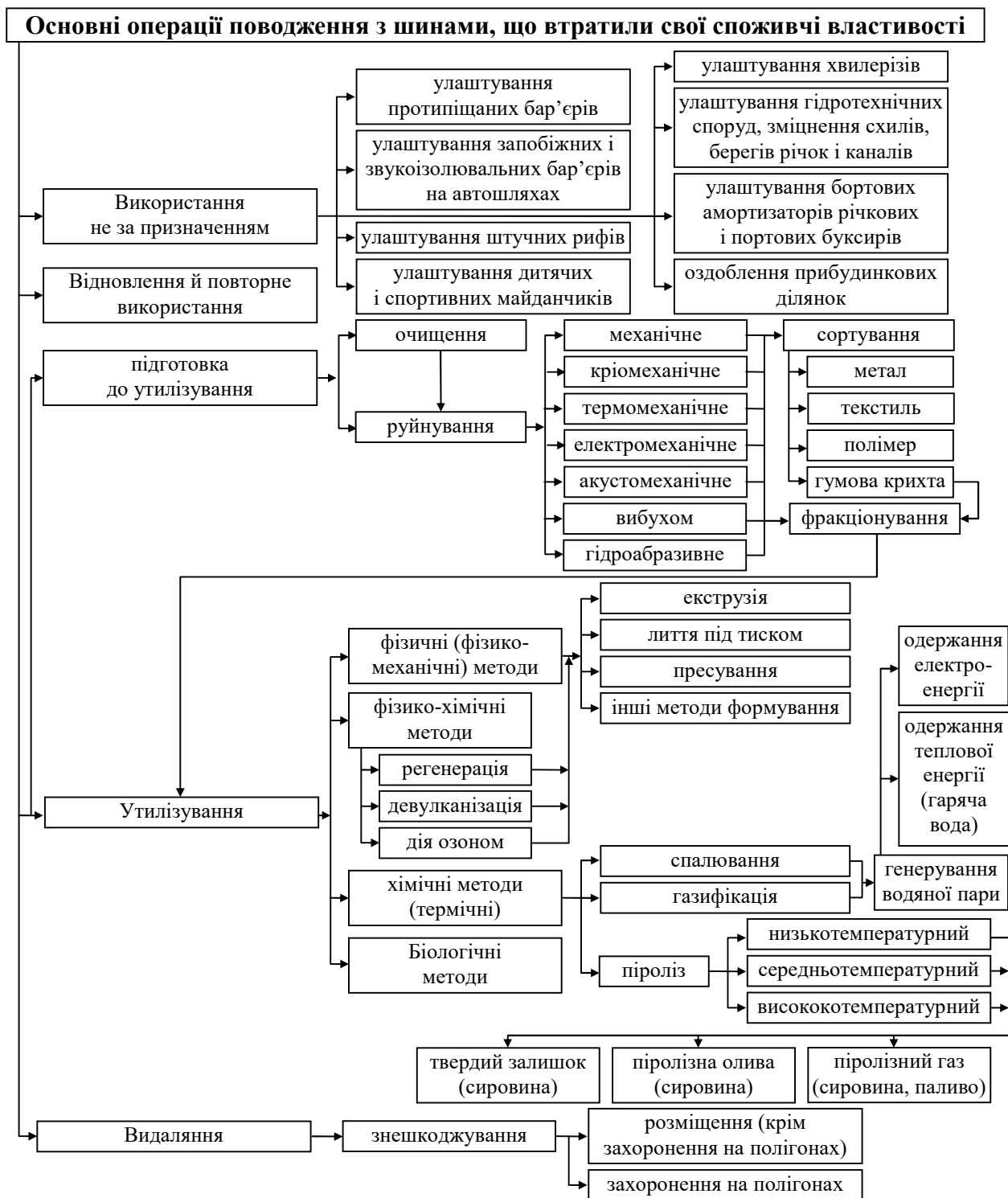


Рис. 3.1. Основні операції поводження з шинами, що втратили свої споживчі властивості

Вартість відновлення зазвичай становить 40–55 % вартості нової шини. У різних країнах підхід до відновлення спрацьованих шин різний: на початку

третього тисячоліття в США шини майже не відновлювали, в Японії відновлювали 10 % шин, у Німеччині – 20 %, а в Нідерландах – 33 % [170].

Зрозуміло, що зазначена операція поводження з шинами лише віддаляє процес їх подальшого видалення, але не вирішує проблему в цілому.

3.4. Використання шин не за призначенням

Пневматичні шини, що втратили свої споживчі властивості, часто використовують як вироби з максимальною реалізацією їхніх властивостей: міцністю, еластичністю, хімічною стійкістю [90, 162].

Найбільш поширеними напрямками використання спрацьованих шин не за призначенням є:

- будівництво хвилерізів;
- будівництво штучних рифів;
- будівництво протипіщаних бар'єрів;
- будівництво запобіжних і звукоізолювальних бар'єрів на автошляхах;
- будівництво гідротехнічних споруд, зміцнення схилів, берегів річок і каналів;
- улаштування дитячих, ігрових і спортивних майданчиків;
- оздоблення прибудинкових ділянок;
- улаштування бортових амортизаторів річкових і портових буксирів.

Цілісні шини або фрагменти розрізаних шин використовують для створення хвилерізів, штучних рифів (нерестовищ для риб), попереджувальних бар'єрів на швидкісних автошляхах, захисту гідротехнічних споруд, зміцнення укосів берегів річок і каналів [164, 171]. Використовуються зношені шини та зовсім незвично: у вигляді виготовлених з них скульптур, умивальників, смітєвих урн, крісел для сидіння, велостоянок, підвісних і наземних квітників [172].

Спрацьовані шини застосовуються для будівництва штучних рифів, які є місцем проживання риб і устриць. Фірмою «Гудьїр» в 1970 р. біля берегів Австралії було створено штучний риф з 15 тис. шин. Лише в одній Флориді (США) улаштовано 571 дозволений штучний риф, при цьому вважається, що кількість незаконних рифів набагато більше. Рифи також створені біля берегів Нової Зеландії, Ямайки, Греції, Японії та інших країн. Близько 200 штучних нерестовищ зі спрацьованих шин створено в Німеччині [165]. У США приблизно в п'яти кілометрах від берега побудовано підводний риф з хаотично скріплених між собою 70 млн шин завдовжки 5 км і завширшки 600 м [173]. Однак, в останні роки за вимогою екологів раніш побудованих рифів намагаються позбутися.

У Німеччині для створення звукоізоляційних бар'єрів уздовж автострад у шин видаляють одну з боковин, після чого їх з'єднують і заповнюють ґрунтом. У результаті утворюється похилий спуск, який можна озеленити.

Зазначена конструкція поглинає звук і одночасно служить бар'єром безпеки, для виготовлення якого потрібно 50 тис. шин на кожний кілометр [165, 174]. Аналогічні звукоізоляційні бар'єри облаштовують також в Італії та США [175].

Проте зазначені приклади використання зношених шин за їхнім впливом на довкілля майже не відрізняються від впливу шин, що розміщені на звалищі побутових відходів. Тому екологи все частіше вимагають заборонити використання спрацьованих шин не за призначенням, у тому числі заборонити «шинні скульптури» біля будинків і в місцях відпочинку, адже до складу спрацьованих шин входить понад 120 шкідливих хімічних речовин, багато з яких є сильними канцерогенами, а отже можуть спричинити онкологічні захворювання [176].

Крім того, використання не за призначенням, як і відновлення й повторне використання шин, лише відтерміновує процес їх подальшого видалення.

3.5. Утилізування шин

3.5.1. Загальні відомості про стилізування шин

Утилізація є найбільш доцільною операцією поводження з шинами, адже в результаті її проведення максимально використовуються властивості матеріалу шини. Близько 80 % маси шин легкових автомобілів і 75 % маси шин вантажних автомобілів становить гумова суміш, при цьому хімічні склади покриттів різних виробників дуже близькі [168].

Для полегшення вибору технології утилізування спрацьованих шин залежно від її якісного й кількісного складу запропоновано спеціальне маркування нових шин [177].

3.5.2. Підготовка шин до утилізування

Перед утилізуванням шини можуть бути піддані відповідній підготовці, яка зазвичай полягає в очищенні забруднених шин та руйнуванні шин з одержанням гумової крихти.

Очищення здійснюють сухим або мокрим способами. Мокрий спосіб більш ефективний, проте він передбачає додаткове очищення забрудненої води від відділених від шин забруднень, що робить цей спосіб більш складним [105]. Наприклад, запропоновано спосіб очищення спрацьованих шин струменем води під тиском 10–20 МПа й наступним сушінням очищених шин потоком повітря за температури 80–100 °С (пат. Росії № 2010708С1). Як бачимо, цей спосіб достатньо енергоємний і потребує значної витрати води.

Для спрощення подальшого одержання з шин гумової крихти до або після їх очищення з них можуть бути видалені найбільш міцні й важко

перероблювані елементи – бортові кільця, тобто дротяні кільця, яке є жорсткою основою бортів покриття [163]. Для цієї операції розроблено простий, але ефективний пристрій, дія якого ґрунтується на послідовному висмикуванні бортових кілець з шини (пат. України № 1782U).

Після очищення шин їх піддають дробленню й подрібненню для одержання крихти, що складається з частинок гуми, а також металевих, текстильного або полімерного кордону.

Незважаючи на уявну простоту, процес руйнування шин досить складний, оскільки гума має пружнопластичні властивості. В основі роботи обладнання для руйнування шин та їхніх фрагментів зазвичай лежать принципи удару, роздавлювання, стирання, стискання з одночасним зсувом, різання та їх комбінації.

Найбільшого поширення серед обладнання для руйнування шин набули такі дробарки: молоткові (дроблення ударом), валкові (стисканням, стиранням і зсувом), ножові (різанням) і роторні (стисненням, стиранням, зрушенням і різанням) подрібнювачі [16, 40, 178]. При цьому розділення великих шин, зокрема великогабаритних, на окремі фрагменти доцільно здійснювати розпилюванням, наприклад, за допомогою стрічкових, дискових та інших пилок [179].

Експериментально доведено, що мінімум витрати енергії під час руйнування еластомерів спостерігається як за низьких (приблизно мінус 70–80 °С), так і за підвищених (100–120 °С) температур [180, 181].

Подрібнення гуми за низької температури (кріогенне подрібнення) полягає в охолодженні вихідного матеріалу нижче за температуру склування й подальшого механічного впливу на нього.

Найчастіше для охолодження застосовується рідкий азот, який дає змогу не лише ефективно охолодити перероблюваний матеріал (при цьому матеріал набуває крихкості), але й підтримувати під час подрібнення інертне середовище, що запобігає окисненню компонентів гуми. Наприкінці третього тисячоліття за допомогою кріогенного перероблення відходів гуми в м. Уапаконета (англ. Wapakoneta), штат Огайо, США щорічно утилізувалося 50 млн зношених шин [182].

Зниження температури шини рідким азотом не лише спрощує руйнування гуми через набуття нею крихкості, а й істотно знижує адгезію між гумою й металокордом (внаслідок різних значень коефіцієнта температурного розширення гуми й сталі), що спрощує подальше відділення гуми від металокордону.

Недоліком кріогенного подрібнення шин є значна витрата рідкого азоту – від 0,3 до 2 кг азоту на 1 кг відходів. Під час подрібнення гумових відходів за температури навколишнього середовища витрата енергії зазвичай становить 3,6–5,0 МДж/кг, а за низької температури – 0,25–0,86 МДж/кг. Але

при цьому витрата енергії на одержання 1 кг рідкого азоту становить близько 4,32 МДж, тому загальна енергоємність одержання кріогенної гуми й звичайної гумової крихти сумірні [183]. (Тут варто зазначити, що рідкий азот під час зрідження повітря зазвичай є не цільовим, а побічним продуктом одержання рідкого кисню.)

Незважаючи на отримання більш чистої гумової крихти, кріогенне подрібнення не набуло широкого поширення внаслідок значних експлуатаційних витрат і потреби в спеціальному обладнанні. Крім того, кріогенна гумова крихта має відносно невисоку питому поверхню, а не пористу і розвинену, як у крихти, одержаної пружно-деформаційним методом у роторних подрібнювачах [16, 40, 43, 44, 181, 184–186], що зменшує поверхневу активність кріогенної крихти в разі її застосування як компонента різноманітних композицій для виготовлення іншої продукції (рис. 3.2).

Процес подрібнення еластомерів за підвищеної температури найбільш ефективно реалізується в роторних подрібнювачах, основними елементами яких є циліндричний корпус з розміщеним в ньому з незначним зазором ротором, спорядженим подрібнювальними елементами [16, 29] (рис. 3.3). Одержуваний порошок з частинками розміром 150–500 мкм має значну питому поверхню, внаслідок чого він має високу поверхневу активність.

Менш розповсюджена бародеструкційна технологія перероблення зношених шин, яка ґрунтується на явищі псевдозрідження гуми за високого тиску й видавлюванні її крізь отвори робочої камери. Гума і текстильний корд при цьому відокремлюються від металевго корду і бортових кілець, подрібнюються і виходять з отворів у вигляді первинної гумо-тканинної крихти, яка піддається подальшому обробленню: додатковому подрібненню й сепарації. Металокорд видаляється з робочої камери у вигляді спресованого брикету [165].

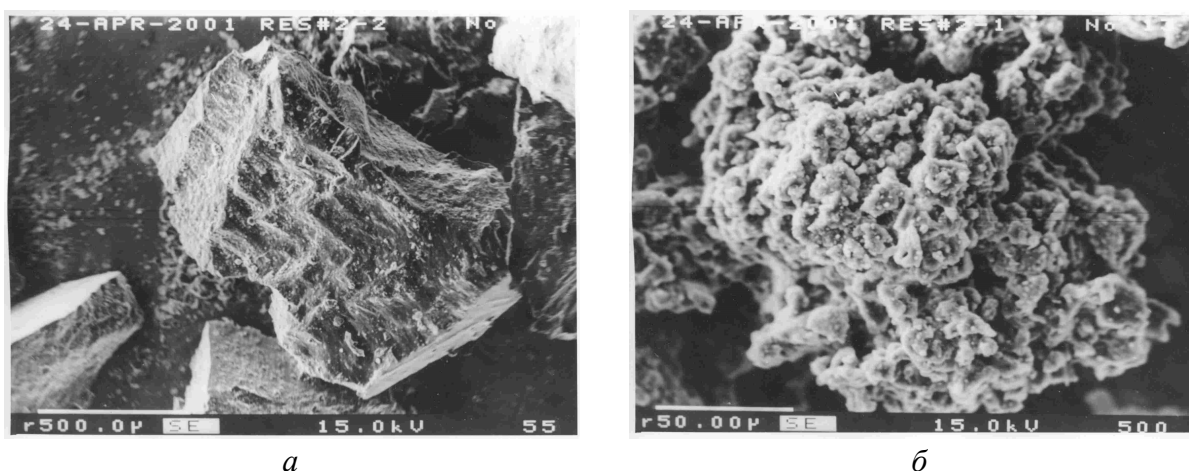


Рис. 3.2. Гумова крихта, одержана кріогенним (а) і пружнодеформаційним (б) методами подрібнення [44]



Рис. 3.3. Фотознімок черв'ячно-роторного диспергатор-екструдера ДЕКЧЕР-150 (індекс 514112) виробництва АТ «Перший київський машинобудівний завод» (колишнє ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ) (фото автора, 31.05.2007)

Подрібнений гумовмісний матеріал безпосередньо переробляють в різні вироби (шланги, килимки, шини для інвалідних візків і ліжок, плити для покриття підлог і спортивних майданчиків, безшовних покриттів для спортивних, ігрових і дитячих майданчиків), застосовують як наповнювач композиційних матеріалів, у тому числі на основі термопластичного полімеру з утворенням термоеластопластів (наприклад, поліетилен-гумових композицій, з яких виготовляють підрейкові підкладки) [16, 187], як добавки в бітуми для виготовлення покрівельних і мастикових матеріалів, гідроізоляції трубопроводів і фундаментів будівель, а також як домішки до палива (наприклад, у цементній промисловості).

Одним з методів одержання гумової крихти також є руйнування попередньо охолоджених шин вибухом у герметичній камері [188] з наступним подрібненням одержаних у результаті вибуху фрагментів у роторному подрібнювачі.

До способів руйнування шин з металевим кордом під дією електричного струму належить їх оброблення в пристроях з індукційними нагрівачами і пристроях, що забезпечують електричний контакт металевих деталей виробів (кордних проводів) з джерелом електричного струму.

Під впливом вихрових струмів в першому випадку або внаслідок омичного опору в другому кордні дроти починають розігріватися, що забезпечує випалювання шарів гуми, прилеглих до цих проводах. Після цього під час подрібнення виробу гума відділяється від металу. Ці способи досить енергоємні і до того ж призводять до деструкції значної частини гуми, а також забруднення готового продукту і навколишнього середовища продуктами розкладання гуми.

Також запропоновано спосіб руйнування шин з металевим кордом за допомогою сил електричного струму, згідно з яким від шини відокремлюють борт, оголюючи при цьому частину кордних проводів (пат. Росії № 2139188С1). Після цього боковини шин приєднують до кільцевих електричних контактів і пропускають через відкриті дроти імпульси електричного струму, генеруючи одночасно вихрові струми в дротах, торці яких залишилися вільними під час відрізання бортів. При цьому майже в усьому корді протягом декількох мілісекунд відбувається інтенсивне виділення теплоти, яка приводить до миттєвого вибухоподібного руйнування корду та одночасного подрібнення гуми шини. Внаслідок незначної тривалості імпульсу струму гума не встигає нагрітися, що запобігає виділенню з неї летких продуктів термодеструкції. Далі звільнена від металу гума піддається подрібненню на традиційному обладнанні.

І, нарешті, одним з новітніх методів подрібнення спрацьованих шин і перетворення їх на крихту, є гідроабразивне подрібнення. Тиск струменя води досягає 250 МПа, при цьому границя міцності типового каучуку під час стискання становить близько 25 МПа, а границя міцності під час зсуву – близько 1–5 МПа [189]. Крихта, одержана гідроабразивним подрібненням, характеризується високорозвиненою активованою поверхнею, властивості якої подібні до крихти, одержаної пружнодеформаційним методом.

Більшість установок для подрібнення зношених шин є стаціонарними, однак виготовляють і мобільне обладнання, змонтоване зазвичай на автомобільному шасі (патенти України № 1205U, Росії № RU105222U1). Основне й допоміжне обладнання розміщено в трейлері або причепі з приводом від тягача.

Порошкова гума з розмірами частинок 0,2–0,45 мм використовується як добавка (5–20 %) у гумові суміші для виготовлення нових пневматичних і масивних шин, а також інших гумотехнічних виробів. Застосування гумового порошку з високорозвиненою питомою поверхнею частинок (2500–3500 см²/г) підвищує стійкість шин на згин та удар, збільшуючи термін їх експлуатації [165].

Додаванням в обкладувальні гуми шинного виробництва гумової крихти тонкого помелу (5–7 % за масою) досягають підвищеного опору підвulkanізації та твердості вулканізаторів, а для низки гум – підвищеного

опору роздиранню й розростанню тріщин, а також зниженого теплоутворення [190].

Одним з основних споживачів гумової крихти є дорожнє будівництво. За умови її додавання до асфальту або асфальтобетону спрощується процес облаштування верхнього покриття доріг, підвищуються такі його характеристики як опір втоми, залишкової деформації й розтріскування, а також зменшуються обмерзання й рівень шуму під час руху транспорту (на 30 %) [191]. Крім того, зчеплення шин автомобілів під час дощу з таким покриттям краще, ніж зі звичайним, а гальмівний шлях зменшується вдвічі. Гумова крихта застосовується як добавка до матеріалу для замазування тріщин у дорожньому покритті (ремонтні суміші), а також для збирання мастильних матеріалів і нафти з поверхні води (як адсорбент) [173].

Гумоасфальт має високі експлуатаційні показники (водостійкість, стійкість до утворення борозен за підвищеної температури й низькотемпературний опір розтріскуванню) за вмісту в ньому 15 % гумового порошку [162]. Також отримано гумобетон для дорожніх покриттів, що містить гумову крихту зі зношених шин і має покращене опір розтріскування й підвищену довговічність [192–194].

Досліджено можливість застосування шинної крихти і як зв'язуючого в бітумно-щебених сумішах [195]. Показано, що суміші із вмістом 20 % шинної крихти з розміром частинок до 0,6 мм не лише майже не відрізняються від звичайних бітумних сумішей з вологовбирання, але й мають підвищену сезонну стійкість.

Показано, що найбільш раціональним з точки зору набуття бетоном потрібних фізико-механічних властивостей, є додавання до нього 3 % шинної гуми як дрібного заповнювача. У цьому разі границя міцності бетону під час стискання становить 50,8 МПа [196].

Також досліджено можливість застосування в бетоні як заповнювача не лише шинної крихти, а й крупних фрагментів шин еквівалентним розміром до 20 мм замість гравію [197].

Бетон з додаванням волокон з гумовим покриттям, одержаними як продукт перероблення спрацьованих шин (волокна з кордних дротів і шнурів), має кращі фізико-механічні властивості, порівняно з бетоном, наповненим гумовою крихтою [198].

Подрібнені шини також запропоновано утилізувати при виробництві штучного фосфатного й шлакопортландцементного каменю [199].

Також проведено дослідження будівельних матеріалів на основі гіпсу та одержаної подрібнюванням пневматичних шин волокнистої гуми різного розміру (до 4 мм, понад 4 мм і їхньої суміші) із вмістом 10, 20 і 30 % (за масою) [200]. Показано задовільні фізико-механічні характеристики одержаних циліндричних зразків.

Пропонується використання подрібненої шинної крихти і в технології залізничних шпал. Так, шпалу формують з суміші, що містить термопластичний полімер (наприклад, регенований поліолефін) і від 4 до 55 % шинної крихти (пат. США № 6828372B2). Також дерев'яну шпалу запропоновано покривати композицією, що містить наповнювач – шинну гумову крихту зі зв'язуючим – поліуретановим клеєм (пат. Росії № 96812U).

Досліджено можливість безпосереднього застосування фрагментів спрацьованих шин як складової баласту залізничних колій (разом з гравієм) [201].

Також зі спрацьованих шин розроблено технологію аерогелю з високими експлуатаційними властивостями: пористістю до 90 %, густиною 20–91 кг/м³, коефіцієнтом теплопровідності 0,035–0,049 Вт/(м·К), високим коефіцієнтом звукопоглинання та модулем пружності під час розтягу до 965,6 кПа [202]. Такі аерогелі можуть бути застосовані як теплозвукоізоляційні матеріали різного призначення.

Гумову крихту також запропоновано використовувати як сорбент для очищення стічних вод від кадмію та інших важких металів [203]. Проте такий сорбент характеризується низькою сорбційною ємністю, а також важко піддається регенерації (відпрацьований сорбент доцільно не регенерувати, а використовувати в дорожньому будівництві).

У разі використання подрібненої гуми як компонента гумових сумішей, а також композиційних матеріалів на основі полімерів виникає потреба в сортуванні та/або фракціонуванні гумової крихти, одержаної після в результаті руйнування.

Сортуванню зазвичай піддають гумову крихту, одержану в результаті руйнування шин з металевим, текстильним або полімерним кордом. У цьому разі для відділення гуми від металокорду застосовують магнітну сепарацію, а для відділення текстильного й полімерного корду – повітряну сепарацію.

3.5.3. Фізичні (фізико-механічні) та фізико-хімічні методи утилізування шин

Під час реалізації фізичних (фізико-механічних) методів змінюються лише форма, розміри, агрегатний стан і 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 [41, 42, 58, 59, 204].

При цьому найбільш ефективно екструзійне перероблення композицій із застосуванням термопластичного зв'язуючого й гумової крихти може бути реалізоване в одну стадію без попереднього гранулювання одержуваної композиції [32, 42, 205] з одержанням безперервних або погонних виробів і

матеріалів найрізноманітніших типорозмірів [206].

До фізико-хімічних методів переробки відходів гуми передусім належить регенерація – процес руйнування просторової сітки вулканізованої гуми під час теплового, механічного та хімічного впливу на неї. Після регенерації одержують переважно пластичний продукт, здатний знову перероблятися на іншу продукцію.

Регенерація за своїм механізмом і результатом не є процесом, протилежним вулканізації. Після регенерації значна частина каучуку зберігає залишки незруйнованої вулканізаційної сітки. Інша частина каучуку регенованої гуми вільна від поперечних зв'язків, але відрізняється від вихідного каучуку довжиною й формою макромолекул. Крім того, склад регенерату відрізняється від складу вихідного матеріалу внаслідок добавки до регенованої гуми допоміжних речовин: пластифікаторів (пом'якшувачів) та активаторів регенерації.

Існує багато методів регенерації, які поділяють на дві основні групи: високотемпературні (понад 100 °C) і низькотемпературні (до 100 °C включно) [207].

Високотемпературні методи у свою чергу поділяють на термомеханічні (виробництво регенерату в однечерв'ячних регенераторах, двороторних змішувачах закритого типу [208] та іншому обладнанні) і термічні, до яких належать методи у водному середовищі (водонейтральний, лужний), у вуглеводневих середовищах (методи повного й неповного розчинення, одержання пастоподібного регенерату), у середовищі водяної пари (паровий, пароповітряний, паровий високотемпературний, кислотний методи), у повітряному середовищі (мікрохвильовий, під впливом струмів високої частоти та ін.), в атмосфері інертних газів, у полум'ї, термомеханічний (ріклемейтор-процес) та ін.

До низькотемпературних методів регенерації належать механічний (на регенеративних вальцях), комбінований механоколоїднохімічний (метод диспергування), радіаційний (під впливом γ -випромінювання), метод хімічної деструкції та ін.

При цьому переважна більшість методів регенерування гумових відходів ґрунтується на двох послідовних процесах: механічне (фізико-механічне) перетворення гумових відходів на гумову крихту (зазвичай еквівалентним розміром частинок 0,2–5,0 мм) та її подальше оброблення пом'якшувачем та активатором з одержанням регенерату [23].

Наприкінці другого тисячоліття на території України найбільш поширеними були виробництва, які працювали на основі водонейтрального, парового й термомеханічного методів. При цьому найбільш ефективним методом регенерування гуми вважається термомеханічний метод, основними перевагами якого є безперервність процесу, можливість повної механізації та

автоматизація виробництва і висока продуктивність. За цього способу регенерат одержують пропусканням попередньо подрібненої гумової сировини разом з пом'якшувачем та активатором крізь черв'ячну машину впродовж 3–6 хв за температури 150–260 °С.

Регенерування відходів гуми потребує використання метало- та енергоємного технологічного обладнання: змішувачів закритого типу, екструдерів, вальців. Також у зв'язку зі зміною властивостей одержуваної сировини порівняно з вихідною гумою й підвищенням вимог з боку споживача до нових виробів галузь застосування регенерату досить обмежена, а тому обсяг його виробництва в усьому світі поступово скорочується. Так, якщо в США в 1957 році рівень споживання регенерату в шинній промисловості становив 15,85 %, а у виробництві інших гумотехнічних виробів (ГТВ) і матеріалів – 22,3 %, то вже двадцять років по тому (у 1978 році) цей рівень у шинній промисловості знизився до 2 %, у виробництві ГТВ – до 3 %, а для виготовлення взуття регенерат вже взагалі не використовувався. У СРСР ці показники на той самий період (у 1960 і в 1980 роках) становили відповідно для шинного виробництва 6,8 і 1,6 %, у виробництві ГТВ – 25,44 і 15,88 %, а у виробництві взуття – 25,44 і 10,7 % [207]. Натепер в Україні споживання регенерату в шинній промисловості зазвичай не перевищує 1 %, при цьому численні ще кілька десятків років тому виробництва шинного регенерату через низьку рентабельність і негативний вплив на довкілля майже припинили своє існування.

Девулканізація гуми забезпечує майже повне відновлення вихідної гуми з можливістю повторного формування нової продукції й подальшої її вулканізації [209]. З метою девулканізації гуми застосовують діелектричне нагрівання, високочастотну радіацію, короткочасне нагрівання відкритим полум'ям [180], термомеханічний спосіб з накладанням ультразвукових коливань [210] та інші методи. Проте, як і регенерація, ці методи не забезпечують повного відновлення властивостей вихідної сировини, потребують значних витрат і тому не набули поширення.

Розроблено технологію термомеханічного методу девулканізації гуми на основі бутадієнстирольного каучуку з подальшим додаванням до продукту девулканізації наночастинок кремнезему (діоксиду кремнію) з одержанням суміші, придатної для виготовлення нових шин [211].

Також існує фізико-хімічний метод подрібнення гумових відходів, за якого в них створюють внутрішні механічні напруження, після чого на вільну поверхню гуми впливають газовою сумішшю, що містить озон, який сприяє розтріскуванню поверхневих шарів відходів і відокремленню від них частинок гуми (пат. Росії № 2126320С1). Енергоємність цього способу незначна (у 5–10 разів менше, ніж кріогенного руйнування), проте процес руйнування гуми дуже повільний, а окиснення вільних радикалів на поверхні частинок

подрібненої гуми під дією озону значно знижує їхню поверхневу активність, а отже і якість продукції, яку виготовляють з одержаної гумової крихти. У результаті озонне руйнування дає змогу одержати частинки гуми задовільної якості розміром не менше 2–10 мм, що передбачає подальше їх додаткове подрібнення й робить озонну технологію малоефективною [165].

Фізичними (фізико-механічними) методами переробляється лише незначна частина зношених шин, що можна пояснити значними труднощами, пов'язаними передусім з необхідністю відділення від гуми текстильного та особливо металевго корду (залежно від конструкції шина зазвичай містить 50–60 % гуми, 11–18 % текстильного корду і 11–29 % металу, придатних до утилізації).

3.5.4. Хімічні (термічні) методи стилізування шин

Під час реалізації хімічних методів змінюються як фізичні властивості, так і якісний хімічний склад, причому взаємодія речовин здійснюється в стехіометричних співвідношеннях [98].

Багато європейських країн у питанні утилізації шин уже на початку третього тисячоліття досягли значних успіхів. При цьому найвищий ступінь утилізації притаманний хімічним методам, які приводять до глибоких незворотних змін структури речовин компонентів шин і передусім – каучуку. Зазвичай хімічні методи реалізуються за високої температури й полягають у термічному розкладанні компонентів гуми.

Основними хімічними методами утилізування шин є термічні методи (так званий термоліз): спалювання, газифікація й піроліз [212] (також до термічних методів належать і плазмові технології, проте для утилізування шин вони майже не використовуються [213]).

Найпростішим з хімічних методів утилізації гумових відходів є їх спалювання, обумовлене високою теплоотою їх згоряння. Так, спалювання 1 кг деревини дає змогу одержати 10,2 МДж, бурого вугілля – 17 МДж, коксу і фрагментів шин – 32 МДж, а гумової шинної крихти з домішками корду – 36...37 МДж [214].

У багатьох країнах світу використовуються промислові установки для спалювання шин, які втратили свої споживчі властивості. Деякі фахівці вважають спалювання шин свідченням недосконалості інших методів перероблення, інші ж, розглядаючи шину як нафтопродукт, стверджують, що під час спалювання зношені шини використовуються за призначенням. Але навіть певна економія енергії, що отримується при спалюванні шин порівняно з традиційним паливом, не може виправдати в цьому разі втрату цінної хімічної сировини.

Найбільшого поширення спалювання шин набуло у виробництві цементу. Недоліками цього методу є значне виділення вуглекислого газу

(близько 3700 м³ на 1 т шин), а також можливість зміни кольору цементу в результаті перетворення сталевих шинних кордів на оксид заліза [170].

Газифікація гумових відходів – це процес їх перетворення на горючі гази під час високотемпературного (1000–2000 °C) нагрівання з окисником (кисень, повітря, водяна пара, CO₂ або їх суміш). У результаті газифікації з матеріалу одержують синтетичний газ, який може бути використаний для синтезу нових хімічних речовин, а також одержання теплової та електричної енергії [98].

Проведено дослідження газифікації відпрацьованих шин в газифікаторах з нерухомим і псевдозрідженим шаром [215]. Показано, що продукти газифікації, одержані в газифікаторі з нерухомим шаром, мають нижчі характеристики, проте газифікація з нерухомим шаром економічно більш приваблива для виробництва синтез-газу. Крім того, приведена вартість синтез-газу, одержаного в результаті газифікації шин, може бути вдвічі нижче за ринкову ціну природного газу, що доводить потенційну перспективність газифікації шин.

Одержаний у результаті газифікації шин в атмосфері осушеного повітря синтез-газ містить H₂, CH₄ і CO, при цьому об'ємні частки водню й метану в синтез-газі становили близько 35% і 40%, відповідно [216].

Проведено аналіз процесів газифікації чотирьох видів відходів: харчових відходів, відходів птахівництва, твердих побутових відходів і спрацьованих шин. Показано перспективність газифікації харчових відходів і використаних шин для генерування синтез-газу [217].

Ще одним з хімічних методів перероблення спрацьованих шин є піроліз, під час якого з гумових відходів одержують газоподібні, рідкі та тверді продукти у співвідношенні, визначеному умовами реалізації процесу [218, 219]. У середньому з однієї тонни гумових відходів можна отримати 10,2 м³ піролізного газу, 0,45–0,60 м³ піролізного мастила і 250–320 кг піролізної сажі [180].

Продукти піролізу, який зазвичай проводять за температури 400–800 °C (низько- й середньотемпературний піроліз [98]), використовують як сировину під час виробництва асфальту, протикорозійних покриттів, палива та іншої продукції.

Досліджено можливість одержання методом піролізу спрацьованих шин вуглеводневого рідкого палива з температурою кипіння нижче за 240 °C [220].

Також запропоновано технологію перероблення спрацьованих шин методом низькотемпературного піролізу з одержанням рідкого палива з теплотворною здатністю 41,67 МДж/кг [221].

Спільний високотемпературний піроліз (за температури 900 °C) спрацьованих шин і соснової кори в атмосфері азоту дає змогу одержати синтез-газ і вугілля. Досліджено склад одержуваних продуктів піролізу залежно від співвідношення компонентів сировини [222].

Також досліджено склад продуктів згоряння дизельного палива, одержаного зі спрацьованих шин [223].

Гума має низьку теплопровідність, тому процес нагрівання гумових відходів зазвичай досить повільний. Одним зі шляхів прискорення нагрівання гуми одразу в усьому її об'ємі є використання енергії електромагнітних хвиль надвисокої частоти (НВЧ), тому реалізація піролізу в електромагнітному НВЧ-полі може інтенсифікувати процес хімічного утилізування гумових відходів [224].

Порівняно з іншими методами утилізації шин піроліз має суттєві переваги: вихідна сировина не потребує тонкодисперсного подрібнення, а внаслідок генерування газоподібного, рідкого палива газу відпадає потреба в додатковому підведенні енергії ззовні.

Так, наприкінці другого тисячоліття компанія Oxford Energy (м. Модесто, США), використовуючи піроліз, переробляла до 5 млн шин на рік (при цьому шини спалювалися без попереднього руйнування). Одержана електроенергія (понад 14 МВт) споживалася 15000 будівлями й спорудами, а тверді продукти піролізу у вигляді сульфату кальцію, шлаків і зольного пилу використовувалися у виробництві гіпсу, цементу й цинку [182].

Проте, незважаючи на певні переваги піролізу старих шин, він поступово втрачає свої позиції, в основному внаслідок невисокої якості кінцевих продуктів [165, 170, 225]. При цьому показано, що ефективність газифікації зношених шин в атмосфері повітря вища за піроліз [226, 227].

3.5.5. Біологічні методи утилізування шин

Виготовлення пневматичних шин з біорозкладаної гуми поки не набуло промислових масштабів, але відповідні дослідження інтенсивно проводяться, адже таке інноваційне рішення може кардинально змінити підходи в поводженні зі спрацьованими шинами [228].

Було проаналізовано кінетику руйнування спрацьованих шин бактеріями *Bacillus* sp. Після п'ятиденного культивування спостерігалася втрата маси $2,03 \pm 0,22$ % і $0,005 \pm 0,001$ % для дослідного зразка шини та зразка шини контрольної групи, відповідно, що підтверджує перспективність подальших досліджень у цьому напрямку [229].

3.6. Видаляння пневматичних шин

Методи видалення відходів можна поділити на дві основні групи [183]:

а) спалювання, яке полягає в здійсненні технологічних заходів, що призводять до окиснювання органічних речовин спалюванням для перетворення відходів у безпечнішу форму й відвернення їх накопичування та/або отримування енергії; спалювання супроводжується виділенням теплової енергії, яка неповоротно втрачається й не використовується.

На відміну від полімерних відходів [98] методом спалювання шини у такий спосіб видаляти вкрай небезпечно, адже під час згоряння шин в атмосферу виділяються такі небезпечні речовини як пірен, фенантрен, антрацен (канцероген), флуорантен. Крім того, залежно від умов згоряння можуть утворюватися такі канцерогени як нафталін, аценафтілен, флуорен, аценафтена, хризен, а також такі особливо небезпечні канцерогени як бензопірен і дібензантрацен. Тому не випадково відповідно до Директиви Ради Європейського Союзу № 1999/31/ЄС щодо полігонів захоронення відходів (м. Люксембург, 26.04.1999 р.) держави-члени вживають заходів, щоб шини та їхні фрагменти не приймалися для захоронення на полігонах [230].

б) захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення в 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.

Найдешевшим і найрозповсюдженим (але й найбільш нераціональним) натеper способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах і сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках [85]. Станом на 2019 рік в Україні існувало 6000 офіційних сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9000 га, одним з видів відходів яких є спрацьовані пневматичні шини [3].

Особливо небезпечні на полігонах і сміттєзвалищах пожежі, які можуть тривати місяцями і навіть роками. Так, у результаті удару блискавки звалище шин в Неуре (Середній Уельс, Великобританія) горіла впродовж 13 років (1989–2001 рр.).

Наявність на полігонах і звалищах шин призводить до скорочення земель сільськогосподарського призначення, забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження шкідливих комах і гризунів тощо. Підземне захоронення шин є більш раціональним, проте воно також не виключає забруднення грантових вод [98]. Інтенсивне розмноження шкідливих організмів можна пояснити сприятливими умовами їх розмноження та існування, адже завдяки особливостям форми пневматичних шин (видозмінений тор з видаленою центральною ділянкою) за довільного розташування їх у просторі в них утворюються застійні зони, в яких затримується вода та сніг, а на відкритому повітрі завдяки великому ступеню чорноти поверхні шин температура в цих зонах вища за температуру навколишнього середовища.

Зрозуміло, що повністю відмовитися від облаштування сміттєзвалищ, полігонів і могильників для видалення шин натеper неможливо, проте сучасні технології можуть істотно знизити шкідливий вплив спрацьованих шин на навколишнє середовище [231].

Основний недолік видалення шин – це безповоротні втрати потенційно

відновлюваних матеріалів, тому з 2006 року Європейським Союзом прийнято рішення про заборону захоронення цілих шин [165], при цьому основна увага приділяється розробленню рентабельних методів утилізації, адже у світі «друге життя» отримують тільки 23 % спрацьованих шин [168].

Як показує світовий досвід поводження з відпрацьованими шинами, для ефективного вирішення проблеми їх утилізування необхідне прийняття спеціальних законодавчих актів як на державному, так і на місцевому рівнях. Так, упровадження нового законодавства щодо поводження зі спрацьованими шинами в Бельгії сприяли поліпшенню екологічних показників у 7,9 разів порівняно з австралійським сценарієм [232]. Також прикладом може бути розвиток законодавчої бази в США, де 48 штатів з 50 прийняли відповідні законодавчі акти. Крім того, впродовж майже 11 років у США діяв закон, який вимагав введення в асфальтобетонні дорожні покриття до 20 % відпрацьованих шин. Крім того, у багатьох розвинених країнах на державному рівні розроблені законодавчі акти, в яких передбачено з виробників і продавців шин стягувати спеціальний податок (залежно від маси шини), при цьому отримані кошти акумулюють у спеціальних фондах, після чого направляють на фінансування науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, а також підтримку організацій та установ, що займаються утилізуванням відпрацьованих шин. У США і Західній Європі широко практикується система державних грантів на розробку нових перспективних технологічних процесів і обладнання утилізування спрацьованих шин [168]. Також не стоять осторонь і лідери серед виробників пневматичних шин: французька компанія Michelin на відповідні дослідження щорічно витрачає понад 800 млн доларів США [169].

3.7. Висновки до розділу 3

Аналіз сучасного стану проблеми поводження з пневматичними шинами, що втратили споживчі властивості, дає змогу зробити висновок, що найбільш доцільним методом поводження з ними є їх утилізування, а саме їх перероблення на гумову крихту для її застосування як сировини для виготовлення іншої гумотехнічної продукції, а також добавки до різних композиційних матеріалів. У разі, коли подальше фізичне перероблення шин неможливе або недоцільне, їх варто переробляти хімічними методами, зокрема термохімічними, з одержанням хімічної сировини або енергії в результаті їх спалювання. Для досягнення успіху в цій справі потрібно вирішити як проблему збирання та перероблення некондиційних шин, так і проблему розвитку ринку збуту продуктів їх перероблення.

4. ПОВОДЖЕННЯ ЗІ СКЛЯНИМИ ВІДХОДАМИ

4.1. Загальні тенденції утворення скляних відходів

Одними з найбільш поширених твердих відходів є побутові й промислові відходи зі скла. Світове виробництво скла 2016 року становило 140 млн т [233], що всього втричі менше за виробництво полімерів [98]. Значну частку з цього обсягу скла становить скляна упаковка: якщо 2015 року її було виготовлено 50,63 млн т, то за прогнозами 2020 року буде виготовлено 65,42 млн т [234].

Скло є одним з найдавніших матеріалів, які використовуються людиною, а завдяки його унікальним властивостям (передусім прозорості, відбивній здатності, стійкості до агресивних середовищ, твердості, низькій теплопровідності, естетичній привабливості та ін.) – універсальним у практиці людини. Надзвичайно широко використовуються скляні матеріали й вироби будівельного, технічного й побутового призначення: листове скло, пляшки, бутлі, банки, флакони та інші види упаковки, різноманітна продукція для будівництва, транспорту, авіації й космонавтики, військової техніки, оптики, медицини, зв'язку, а також лабораторний і хімічний посуд, промислове обладнання, трубопроводи, вимірювальна техніка, витвори образотворчого мистецтва тощо. І саме з огляду на широкий асортимент та обсяги виробництва скловиробів наприкінці їхнього життєвого циклу постає проблема утилізації відходів зі скла, масова частка яких у загальному обсязі твердих відходів становить 5 % у Європі [235] і 4,5 % у США [236].

Основними передумовами утилізації відходів зі скла є такі:

1) тривалий термін їх розкладання в природних умовах, який може становити від кількох тисячоліть до мільйона років [237]; при цьому скло є крихким і тому через небезпеку завдання механічного пошкодження є небезпечним для людини, а також тваринного й рослинного світів;

2) скляна вторинна сировина дає змогу заощадити природні та інші ресурси, а саме вапнякові суміші (зокрема вапняк, доломіт, що містять карбонати кальцію й магнію), кварцовий пісок, кальциновану соду (карбонат натрію), а також інші матеріали залежно від виду й типу скла;

3) скляна вторинна сировина дає змогу заощадити паливно-енергетичні ресурси; якщо під час варіння скла до шихти додати 10 % (за мас.) склобою (склобій – використане скло, зібране з різних джерел і призначене для оброблення, подрібнене до встановлених розмірів і відокремлене від забруднювального матеріалу), то економія природного газу становитиме 3 %, а в разі виробництва склопродукції лише зі склобою – 30 %, що істотно знижує собівартість одержуваної продукції.

Отже, перероблення відходів скла не лише забезпечує екологічну безпеку, а й зберігає природні ресурси й здешевшує виробництво продукції зі скла.

Основною перевагою скла є те, що воно є повністю перероблюваним, і таким чином його повторне використання – повністю безвідходний процес, що істотно знижує негативний вплив скла на довкілля. Крім того, скло, на відміну від полімерів [98], можна переробляти на нову продукцію без погіршення експлуатаційних властивостей необмежену кількість разів [238]. Таким чином, скляні відходи становлять значний ресурсний потенціал як вторинна сировина. Але навіть за умови відносної доцільності перероблення скляних відходів рівень їх утилізації навіть у високорозвинених країнах недостатній: наприклад, у США 2013 року 74 % скляних відходів було піддано захороненню [239].

4.2. Основні операції поводження зі скляними відходами

Основними операціями поводження зі скляними відходами є такі [25, 26]:

1) Збирання відходів.

Скляні відходи можуть бути у вигляді упаковки (пляшки, бутлі, фляги, флакони тощо), виробів і склобою.

Збирання відходів скла здійснюється в населення, підприємств і організацій.

Для збирання скляних відходів організовуються спеціальні пункти прийому, а також укладаються договори з підприємствами, де відходи скла є частиною технологічного процесу (наприклад, на заводах скловиробів, зокрема з виготовлення дзеркал).

Також у багатьох країнах світу стають популярними автомати з приймання упаковки (фандомати) – роботизовані агрегати, який вимінює в населення оборотну упаковку (у тому числі й скляну) в обмін на певну грошову винагороду або на бали (або чеки), які можна використовувати в магазинах або для проїзду на громадському транспорті. Такі автомати розташовують у громадських місцях, зручно розташованих для споживача вони є однією з ланок у ланцюзі роздільного збирання й перероблення побутових відходів.

2) Зберігання відходів.

Зберігання відходів – це 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 і накопичуванням;

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

3) Транспортування відходів.

Транспортують відходи в непошкодженій упаковці, використовуючи транспортні засоби, призначені для відходів відповідного класу небезпеки.

4) Обробляння та переробляння відходів.

Обробляють скляні відходи їх фізичним, хімічним чи біологічним перетворюванням, для потреби готування їх до наступного безпечного перевезення, переробляння, утилізування чи видалення. Насамперед це стосується медичних скляних відходів, проте значна частка скляних відходів (до 75–80 % відходів, утворених закладами охорони здоров'я), що відносяться до категорії А (епідемічно безпечні, тобто такі, що не мали контакту з біологічними рідинами пацієнтів, інфекційними та шкірно-венерологічними хворими), за складом наближені до побутових відходів і в подальшому можуть бути перероблені [240] (при цьому поверхні великогабаритних медичних відходів зазвичай підлягають обов'язковому знезараженню (дезінфекції) фізичними методами (термічними, мікрохвильовими, радіаційними та ін.).

Переробляють скляні відходи здебільшого на склозаводах у скловарних печах, на яких зібрані скляні відходи проходять первинну мийку. Перед мийкою за допомогою автоматизованих методів або вручну від скляних відходів відокремлюють органічний матеріал, метали, кераміку, полімери та папір. Далі скляні відходи сортують за кольором (зазвичай білого (безколірного), зеленого й коричневого кольорів), яке здійснюють переважно вручну на стрічковому конвеєрі. Після поділу за кольором скляні відходи піддаються подрібненню, магнітній сепарації для видалення включень металу, за потреби просіюванню з сортуванням по фракціях [105, 241], а також сушінню підігрітим повітрям.

Безпосередньо перероблення оброблених скляних відходів здійснюється їх плавленням у спеціальних плавильних печах, де за високої температури відходи перетворюються на однорідну скляну масу певного кольору, з якої формуються нові скляні вироби (скляна упаковка, скловата, склоблоки, піноскло тощо).

5) Утилізування відходів.

Скляні відходи утилізують передусім для отримання з них тих чи інших матеріалів за допомогою їх економічно обґрунтованого, безпечного для здоров'я людей переробляння чи прямого використання на базі наявних чи спеціально створюваних виробничих потужностей і технологічних процесів. Утилізація скляних відходів спрямована на повну або часткову заміну традиційних сировини й матеріалів відходами, вилучення з них цінних компонентів, застосування відходів як шихтових матеріалів, напівфабрикатів тощо.

Підготовлені скляні відходи використовують зокрема для виготовлення

рідкого скла (силікатний клей), оздоблювальної будівельної плитки, компонентів бетонів, асфальтно-бітумних композицій тощо.

б) Видаляння (усування) відходів.

Видаляння відходів – це операції, що не призводять до їхньої утилізації. Видаляння спрямоване на знищення відходів або їх захоронення.

Рекомендовані елементи шестиступеневого ієрархічного порядку поводження зі скляними відходами [242]: попередження утворення; підготовка до повторного використання; використання як вторинних матеріальних ресурсів до переплавлення (переробляння); інші види використання як вторинних матеріальних ресурсів (утилізування); рекуперація енергії; остаточне розміщення.

4.3. Попередження утворення скляних відходів

Основними шляхами попередження виникнення відходів є [98]:

1) максимальне використання вихідних сировини та матеріалів без утворення відходів виробництва або з їх мінімізацією; прикладом може бути раціональне розкроювання листового скла у виробництві дзеркал;

2) запобігання утворенню відходів; прикладом можуть бути багатооборотні скляні пляшки, спроектовані й використовувані для багаторазового повторного заповнення або багаторазового повторного використання;

3) скорочення утворення відходів; прикладом може бути використання скляних відходів для подальшого застосування як компонента бетонів та асфальтобітумних композицій.

Зрозуміло, що попередження виникнення відходів у разі виготовлення продукції зі скла в більшості випадках лише відтерміновує видалення утворюваних в решті-решт скляних відходів, але не вирішує проблему в цілому.

4.4. Повторне використання скляних відходів

Повторне використання – це процес повернення використаної продукції в корисний оборот. Для скляної продукції це насамперед стосується скляної упаковки, спроектованої й використовуваної для повторного заповнення або повторного використання.

Однооборотні скляні пляшки розроблені для одноразового застосування, і їх потрібно використовувати тільки один раз. Проте деякі з них можуть бути використані знову (це може відбуватися тільки після перевірки придатності пляшок для подальшого використання).

Широкий асортимент скляної упаковки істотно стримує їх повторне використання, адже в цьому разі для упаковки певного типорозміру має бути розроблено комплекс заходів з їх збирання, транспортування до місця

повторного заповнення, а також оброблення перед повторним заповненням (зокрема мийка й сушіння).

4.5. Перероблення скляних відходів

Як було зазначено раніше, скляні відходи зазвичай переробляють на склозаводах у скловарних печах, додаючи їх після відповідної підготовки (мийки, сортування за видом скла, сортування за кольором, подрібнення, класифікування (розділенням подрібнених відходів на фракції за розміром частинок) і наступного сушіння (зазвичай разом з іншими компонентами шихти у високопродуктивних барабанних сушарках [243]) до шихти для виробництва скла.

Сортування скляних відходів за видом скла здійснюють для максимального виділення скла з певними властивостями із суміші твердих відходів.

Зазвичай певну продукцію виготовляють з відповідного виду скла. Насамперед це стосується скляної упаковки, кінескопів телевізорів і моніторів комп'ютерів, триплексних автомобільних стекол тощо. Проте для гарантованої ідентифікації виду скла для об'ємних скляних відходів застосовують також ідентифікацію за наявним маркуванням (кодом перероблення, або рецикловим кодом; рис. 4.1, табл. 4.1) [244].

У результаті перероблення скляних відходів одержують нову продукцію зі скла: скляні упаковку, листове скло, скловату, склоблоки, піноскло та інші вироби й матеріали.

У разі перероблення скляних відходів, однорідних за складом та/або кольором, з них у багатьох випадках можна одержувати аналогічну продукцію майже без втрат експлуатаційних властивостей. У разі ж перероблення скляних відходів, неоднорідних за складом та/або кольором, зазвичай одержують менш відповідальну продукцію (здебільшого будівельного призначення).

Процес виготовлення скляної упаковки, зокрема пляшок і фляг, з використанням скляних відходів містить такі самі основні операції, як і без використання скляних відходів [66]: змішування шихти, плавлення, формування, охолодження, контроль якості та упаковування готової продукції. Принципова відмінність полягає лише в додаванні обробленого склобою до шихти.

Під час змішування шихти залежно від кольору одержуваної продукції змінюють склад суміші склобою в шихті. У разі виготовлення зеленого скла може бути використано до 95 % (за мас.) склобою. Біле скло зазвичай виготовляють з переважним вмістом первинної сировини.

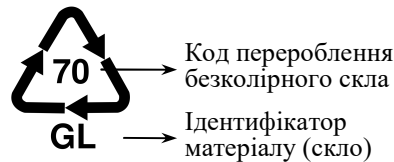


Рис. 4.1. Код перероблення безколірного скла

Таблиця 4.1. Знаки коду перероблення для різних видів скла

Ідентифікатор матеріалу	Тип скла	Приклади продукції
70 GL	Безколірне скло	Прозоре скло
71 GL	Зелене скло	Використовується у виробництві пляшок
72 GL	Коричнєве скло	Використовується у виробництві пляшок
73 GL	Пляшкове скло темно-коричнєве	Використовується у виробництві пляшок
74 GL	Пляшкове скло світло-коричнєве	Використовується у виробництві пляшок
75 GL	Скло з малим вмістом свинцю	Використовується в сучасних телевізорах та електронних приладах (Е-відходах, тобто відходах електроніки)
76 GL	Кришталі	Використовується в кришталевому посуді
77 GL	Скло, покрите міддю	Використовується в електроніці, годинниках
78 GL	Скло, покрите сріблом	Використовується в дзеркалах, посуді для сервірування
79 GL	Позолочене скло	Використовується в посуді для сервірування

Отже, до скловарної печі може надходити вхідний потік матеріалів, що містить три підпотоки: первинну сировину (шихта, що складається з суміші піску, золи, соди, вапняку, доломіту й польового шпату, з додаванням фарбувальних і просвітлювальних добавок); перероблений матеріал з інших джерел (зокрема невелика кількість листового скла) та перероблений матеріал з використаної скляної упаковки (використана скляна упаковка, яку розділяють або не розділяють за кольором, а потім сортують і переробляють у печі як готовий склобій).

Далі реалізують операції плавлення суміші шихти та склобою, формування скляної упаковки, охолодження відформованої упаковки, контроль якості готової упаковки та упакування готової продукції, які, як уже було зазначено, майже не відрізняються від операцій виготовлення скляної упаковки з шихти без склобою.

Деякі скляні відходи заборонено переплавляти у скловарних печах. До таких відходів зокрема належать дзеркала або їхні фрагменти, оскільки вони містять шар металу (алюмінію або срібла) та захисного лаку, нанесеного поверх шару металу для захисту його від дії вологи.

4.6. Утилізування скляних відходів

Скляні відходи зазвичай утилізують за трьома напрямками:

- 1) матеріальним (скляно-сировинний);
- 2) сировинним;
- 3) енергетичним

або за трьома 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 скляної сировини; рециклінг);
- 3) спалювання для одержання здебільшого теплової енергії.

Найбільш поширеними методами утилізування скляних відходів є фізичні методи, під час яких змінюються лише форма та/або розміри частинок або фрагментів скла, його агрегатний стан та властивості за умови збереження його якісного хімічного складу.

Утилізування відходів скла в будівельних матеріалах у вигляді скляного порошку почала широко впроваджуватися з 1963 року [245]. При цьому скляний порошок і натеper залишається інноваційним та екологічно чистим в'язучим матеріалом та/або заповнювачем у різноманітних цементних матеріалах [246].

На перший погляд простий процес додавання скляних відходів як наповнювача до бетонів або будівельного розчину виявився достатньо складним, адже було виявлено, що з часом між частинками скла й цементом відбуваються лужно-кремнеземна реакція (хімічна реакція між лугами цементу й кремнеземом відходів скла), або ASR – alkali-silica reaction, яка може призвести до розтріскування будівельних конструкцій [247–249]. Проте дослідження довели, що скляні відходи у вигляді дрібнодисперсного порошку (розмір частинок до 100 мкм) не призводить до погіршення стійкості наповнених бетонів та будівельного розчину до розтріскування [250]. При цьому з'являється можливість утилізування в бетонах замість частки (переважно до 20 % (за мас.)) кварцового піску чи цементу різнокольорових скляних відходів без їх попереднього поділу за кольором, що істотно спрощує поводження зі скляними відходами [251].

За іншими даними ефект ASR майже відсутній за розміру скляних частинок до 300 мкм і за умови їх вмісту в бетоні до 30 % (за мас.) [252]. Аналогічний висновок зроблено і в праці [253], відповідно до якої розмір скляних частинок для унеможливлення проходження ASR має бути менше приблизно 300 мкм (частинки мають проходити крізь комірки сита № 50 меш (США)). Тут потрібно зауважити, що в праці [253] фразу «U.S. standard mesh size #50» з посиланням на [254] було розтлумачено невірно й зазначено, що

розмір скляних частинок має бути менше 50 мм, що є грубою помилкою.

Також показано, що виникнення, проходження та вплив ASR на виготовлені бетонні блоки може мінімізувати застосування скляного порошку в сухих будівельних сумішах [255], для одержання яких можна використовувати різноманітні змішувачі сипких матеріалів [256].

Скляний порошок з розміром частинок менше 38 мкм має пуццоланові властивості, які роблять його придатним для заміни портландцементу як в'язучої речовини [257].

Застосування скляного наповнювача дає змогу проводити бетонування за низьких температур, а споруди, побудовані з такого бетону, забезпечують високу температурну стабільність всередині них за температури довкілля від мінус 20 до 60 °C [258].

Доведено можливість застосування дрібнодисперсного скляного порошку як наповнювача бетонів не лише за умови статичних, а й динамічних навантажень, наприклад, під час землетрусу, дії вітру та ударів. При цьому показано, що демпфірувальна здатність таких бетонів істотно підвищується за негативної температури [259].

Показано, що додавання до складу бетону до 20 % (за мас.) дрібнодисперсного скляного порошку, одержаного з листового скла, скляних пляшок і посуду, а також ЕПТ, не лише не погіршує, а й за деякими показниками навіть поліпшує експлуатаційні показники бетону [260].

Запропоновано застосовувати крупнозернистий скляний заповнювач замість природного заповнювача в традиційних бетонах. Показано, що найбільш придатною для застосування є бетонна суміш із вмістом 25 % (за мас.) крупнозернистого скляного заповнювача [261].

Досліджено можливість повної заміни крупнозернистого заповнювача склобоям с частинками розміром до 5 мм та до 20 % (за мас.) цементу скляним порошком с частинками розміром до 50 мкм (як зв'язуючим) під час виготовлення бетонних блоків для будівництва пішохідних доріжок та автошляхів [262].

Розроблено технологію двошарової керамічної плитки із застосуванням скляного порошку, яка має високі теплоізоляційні властивості [263].

Додавання 10 % частинок натрієво-кальцієвого скла розміром 0,037–0,125 мм до керамічної маси на основі глини знизило температуру випалювання на 55 °C, а отже й споживання енергії під час виготовлення керамічної плитки [264].

Показано можливість утилізування в бетоні скляного порошку, одержаного в результаті подрібнення такого поширеного й небезпечного виду скляних Е-відходів із вмістом свинцю як спрацьованих електронно-променевих трубок (ЕПТ) [265]. Доведено, що скляний порошок, одержаний в результаті подрібнення ЕПТ, може замінити кварцовий пісок або пуццолан

(суміш вулканічного попелу, пемзи, туфу; не є самостійним зв'язучим, тому застосовується як пуццоланова добавка до цементу й вапнякового розчину) у будівельних розчинах і бетонах без погіршення їхніх експлуатаційних властивостей [266]. При цьому для подрібнення доцільно застосовувати ефективні та високопродуктивні барабанні млини [267].

Також підтверджено високі радіаційно-захисні властивості баритбетону з дрібно- або крупнозернистим (5–10 мм) скляним заповнювачем, одержаним у результаті подрібнення ЕПТ [268]. Як скляний заповнювач баритбетону можна застосовувати продукти подрібнення ЕПТ як з видаленням з них свинцю, так і не оброблені, але в останньому разі обсяг заміни традиційного заповнювача бетону частинками скла має бути обмежено 25 % (за мас.) через загрозу вилугування свинцю під час експлуатації бетону [269].

Для зниження проходження ASR і вилугування свинцю з матеріалу на основі цементу та дрібнодисперсних (0,075–0,15 мм) і зернистих (8,0–9,5 мм) частинок скла, одержаних подрібненням ЕПТ, у вихідну суміш компонентів додавали 0,1 % (за мас.) оксиду графену [270].

У сербському місті Ніш для перевірки можливості застосування скляного порошку з ЕПТ як наповнювача бетонних сумішей у реальних умовах було виготовлено та встановлено партію бордюрів [271].

Досліджено можливість перероблення одного зі скляних відходів електроніки (Е-відходів) – рідкокристалічних дисплеїв на безперервне скловолокно промислового призначення (Е-скло) [272], а також як дрібнозернистий заповнювач бетонів [273].

Досліджено можливість утилізування відпрацьованих люмінесцентних ламп як дрібного заповнювача будівельного розчину на основі цементу [274]. При цьому було зроблено аналіз двох видів відходів: необроблених (зразки А) і попередньо прожарених за температури 375 °С (зразки Б) для видалення ртуті зі скляних відходів. У результаті було отримано, що частинки скла поліпшують зручність укладання цементного розчину, а також зменшують його усадку під час тверднення. Міцність цементу зі зразком А була нижчою, ніж зі зразком Б, що можна пояснити кращим зчепленням з цементним розчином частинок скла, позбавленого в результаті прожарювання органічного лаку та гладкого покриття. Також було досягнуто істотне (до двох порядків) зниження вилугування ртуті із затверділого цементного розчину до прийнятних значень. При цьому для зниження впливу ASR на готові цементні зразки треба обмежуватися вмістом скла в них до 30 % (за мас.).

Встановлено високі тепло- та звукоізоляційні властивості піноскла, одержаного зі скляних відходів [275], а виготовлені з нього монолітні тепло- та звукоізоляційні вироби набагато безпечніші для людини, ніж такий поширений натеper тепло- та звукоізоляційний матеріал як скловата.

Розроблено теплоізоляційне піноскло, одержане з використаних скляних

пляшок і соснової кори як піноутворювача [276]. Одержане піноскло має пористість 78–86 %, коефіцієнт теплопровідності 0,072–0,093 Вт/(м·К) і границю міцності під час стискання 0,2–3,4 МПа.

Скляну піну одержано з використаних скляних пляшок та яєчної шкаралупи як піноутворювача (1–30 % (за мас.)) спіканням вихідної сировини за температури 900 °С упродовж 30 хв. Властивості скляної піни: пористість – 60–95 %, коефіцієнт теплопровідності – 0,177–0,055 Вт/(м·К), границя міцності під час стиску – 0,15–1,50 МПа – дають підставу рекомендувати її як теплозвукоізоляційний негорючий матеріал [277].

У пінобетон запропоновано вводити не просто частинки скла, а частинки піноскла, що істотно поліпшує теплоізоляційні властивості пінобетону та зменшує його густину [278].

Доведено можливість застосування скляного порошку як компонента матеріалів на керамічній основі під час виробництва керамічної цегли, облицювальної плитки, склокераміки, піносклокераміки й порцеляни, еластомерних покриттів дахів, оздоблювальних матеріалів і наповнювача фарби [279], а також піноскла й волокон у складі надлегкого бетону, який може бути застосований для облаштування тепло- та/або звукоізоляційних покриттів та екранів [249].

Бетонна суміш з комбінованим гумовим і скляним наповнювачем характеризується високими експлуатаційними характеристиками, у тому числі низьким водовбиранням і зручністю укладання [280]. Дослідження бетонів з аналогічним комбінованим наповнювачем показали підвищення водовбирання бетону, а також зниження його міцності під час стискання та тривалості схоплювання в разі збільшення вмісту комбінованого наповнювача в бетоні [281].

Підтверджено можливість одночасної утилізації скляних (до 30 % (за об.)) і полімерних (до 30 % (за об.)) відходів як грубодисперсного заповнювача у складі бетону для будівництва пішохідних доріжок [282]. Також запропоновано спільне утилізування скляних і полімерних відходів у складі пінобетону, придатного для облаштування несучих стін будівель і споруд [283].

Досліджено фізико-механічні властивості бетону, армованого одержаним зі склопластику скловолоком [284]. Показано, що за умови додавання 5 % (за мас.) скловолокна міцність бетону збільшується. Розроблена технологія дає змогу утилізувати не лише скловолокну як таке, а й такий важко утилізовуваний композиційний матеріал як склопластик [52].

Доведено підвищення міцності бетону (границя міцності під час згину на 26,5 %, границя міцності під час розколювання на 185 %), а також зменшення усадки (на 65,5 %) у разі часткової заміни кварцового піску на частинки скла та поліпропіленові волокна (до 1,5 (кг волокна)/(м³ бетону), або 0,3125 % від маси цементу) [285].

Також показано підвищення міцності бетону (границя міцності під час згину на 29,9 %, границя міцності під час розриву на 97,6 %) у разі його армування одержаним з використаних скляних пляшок скловолокном у кількості 1,8 (кг волокна)/(м³ бетону) [286].

Проаналізовано можливість утилізування скляних відходів разом із золою осаду стічних вод, утвореної в результаті спалювання зневодненого осаду стічних вод, як компонента бетону [287]. При цьому скляні відходи були заповнювачем бетону, а зола – частковим заміником у ньому цементу. Така комбінація утилізовуваних відходів не лише знизилася усадку бетону під час його тверднення й підвищила міцність бетону під час стискання, а й придушення ASR з боку золи. Обґрунтовано можливість одержання в такий спосіб високоякісних бетонних блоків для будівництва тротуарів і доріг.

Інший напрямок використання скляних відходів у будівництві – застосування їх як дрібнозернистого заповнювача асфальтових сумішей [288]. Показано, що додавання 8 % (за мас.) підготовленого склобою до асфальтової суміші дає змогу не лише одержати якісне дорожнє покриття з високими експлуатаційними характеристиками, а й частково вирішити проблему утилізації скляних відходів [289].

Показано принципову можливість і доцільність застосування асфальту з 10–15 % (за мас.) вмістом частинок скла розміром не більше 4,75 мм для облаштування поверхневого шару дорожнього покриття [290]. Таке технічне рішення не лише частково вирішує проблему утилізації скляних відходів, а й підвищує коефіцієнт тертя автомобільних шин по дорожньому покриттю. Визначено оптимальне значення вмісту скляних частинок в асфальті для облаштування поверхневого шару дорожнього покриття, яке складає 8 % (за мас.) [291].

Скляний порошок також вносять у ґрунти з низькою несучою здатністю з метою її підвищення [257]. Доведено, що додавання до ґрунту 8 % (за мас.) скляного порошку завдяки його відносно великій густині й малому водовбиранню істотно підвищує несучу здатність ґрунту.

Проведено дослідження стосовно можливості застосування одержаного з триплексних лобових автомобільних стекол скляного порошку з розміром частинок 90–160 мкм як наповнювача композиції на основі поліетилену високого тиску з метою виготовлення філаменту для 3D-друку діаметром 1,45 мм. При цьому лобові стекла подрібнюють без видалення з них плівки полівінілбутиралу [41, 42], що істотно спрощує їх утилізацію [292].

Ґрунтовно досліджено реологічні властивості [60] бетону із скляним заповнювачем для можливості його застосування для 3D-друку будівельних конструкцій. Показано, що регулюванням вмісту й розмірів скляних частинок і додаванням спеціалізованих добавок можна досягти потрібної текучості бетону [293].

І нарешті, в індивідуальному будівництві є численні приклади спорудження будинків і допоміжних споруд зі скляних пляшок, розташованих паралельно одна одній поперек стіни та скріплених між собою будівельним розчином [294]. Такі дешеві, відносно легкі та енергоефективні споруди, на перший погляд здаються дуже привабливими, проте не варто забувати про невизначений термін служби таких споруд через можливість негативного впливу ASR.

І нарешті, скляні відходи можуть бути піддані спалюванню для одержання здебільшого теплової енергії. Зазвичай це відбувається під час спалювання несортованих твердих побутових відходів.

Спалювання є хімічним метод утилізування скляних відходів, при цьому під час реалізації хімічних методів змінюються як фізичні властивості, так і якісний хімічний склад матеріалу відходів, причому взаємодія речовин здійснюється в стехіометричних співвідношеннях [98].

За даними Агентства з охорони навколишнього середовища США [295] 2018 року з 12,25 млн т утворених скляних відходів було піддано спалюванню з метою рекуперації енергії 1,64 млн т (13,4 %), переробленню – 3,06 млн т (25 %), а видаленню (захороненню) – 7,55 млн т (61,6 %).

4.7. Видалення скляних відходів

Основним методом видалення скляних відходів є захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення в 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 [98].

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

Найдешевшим і найрозповсюдженим на тепер способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах і сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках. Проте наявність на полігонах і звалищах скляних пляшок також призводить до розмноження шкідливих комах і гризунів, що можна пояснити сприятливими умовами їх існування, адже завдяки особливостям форми пляшок (зазвичай циліндрична ємність з відкритим горлечком) у більшості випадках всередині них утворюються застійні зони, в яких затримується вода та сніг, а на відкритому повітрі завдяки перетворенню опукло-увігнутої стінки на своєрідну лінзу температура всередині пляшок може бути вища за температуру навколишнього середовища. Саме з точки зору унеможливлення відбиття сонячних променів на горючий об'єкт заборонено розміщати на полігонах і сміттєзвалищах дзеркала або їхні фрагменти.

Крім того, скло, хоч і повільно, але під впливом природних чинників розкладається, виділяючи при цьому певну кількість луку. При цьому швидкість розкладання збільшується зі зменшенням розміру відходів. У результаті цього може змінитися кислотно-лужний баланс ґрунтових вод і самого ґрунту, негативно впливаючи на його родючість. У довгостроковій перспективі це може призвести до унеможливлення вирощування культурних рослин на забруднених територіях.

Поводження з відходами скла є проблемою навіть високорозвинених країн. Так, Директивою 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради про упаковку та відходи від упаковки ухвалено рішення про необхідність повторного перероблення не пізніше 31.12.2025 р. 50 % (за мас.) скла, а не пізніше 31.12.2030 р. – 75 % (за мас.) [159].

З огляду на порушену проблему, можна з упевненістю стверджувати, що треба якнайшвидше впроваджувати в наше життя принципи 3R (Reuse, Reduce, Recycle – повторне використання, скорочення, перероблення як вторинних матеріальних ресурсів) [296, 297] або 4R (Reusing, Reducing, Recycling, Recovering) – повторне використання, скорочення, перероблення як вторинних матеріальних ресурсів, перероблення як вторинних ресурсів) [298] поведження з різноманітними твердими відходами, у тому числі зі скляними, полімерними та гумовими [98, 154, 299].

Як видно з наведеного огляду, проблема поведження зі скляними відходами є актуальним питанням, проте перспективи її вирішення, на відміну від багатьох інших твердих відходів, достатньо оптимістичні.

4.8. Висновки до розділу 4

Аналіз сучасного стану проблеми поведження зі скляними відходами дає змогу зробити висновок, що найбільш доцільним методом поведження з ними є їх перероблення на іншу скляну продукцію.

Актуальним також є використання скляних відходів (навіть без попереднього їх сортування за видом скла та/або кольором) у складі будівельних матеріалів і виробів: бетону, асфальту, цегли, плитки, тепло- та звукоізоляційних матеріалів і виробів. Але в цьому разі впровадженню у промислове виробництво відповідних технологій мають передувати ґрунтовні дослідження, особливо з точки зору впливу на скловмісні матеріали й вироби лужно-кремнеземної хімічної реакції, яка може призвести до їх розтріскування та передчасного руйнування.

Для можливості утилізування оброблених скляних відходів через їх додавання до різних композицій і композиційних матеріалів потрібно розробити ефективний комплекс дій щодо збирання, транспортування та

відповідних підготовчих операцій. При цьому одержання композицій і композиційних матеріалів з прогнозованими експлуатаційними властивостями, в яких повністю реалізуються унікальні властивості такого матеріалу як скло, є одним з найбільш дешевих і перспективних напрямів поводження зі скляними відходами.

5. ПОВОДЖЕННЯ З МЕТАЛОВМІСНИМИ ВІДХОДАМИ

5.1. Загальні тенденції утворення металовмісних відходів

Металеві відходи є одними з найбільш поширених твердих побутових відходів. Їхня частка в загальному обсязі твердих побутових відходів становить 4 % у Європі [300] і 9,1 % у США [301], що робить металеві відходи разом з відходами з полімерів [98, 154, 299] і скла [302] одними з джерел як потенційної вторинної сировини, так і небезпеки для довкілля.

Метали та їхні сплави завдяки унікальним властивостям (передусім міцності, жорсткості, стійкості до агресивних середовищ, високій теплопровідності, естетичній привабливості, високій технологічності та ін.) залишаються одними з найбільш затребуваних конструкційних, оздоблювальних та захисних матеріалів, використовуваних у виробництві найрізноманітнішої продукції. Крім традиційного застосування в промисловості металева продукція широко розповсюджена і в побуті. Це насамперед металева упаковка, металева фольга, столовий посуд і столове приладдя, які достатньо легко утилізуються. Більш складними в поводженні є відходи такої продукції як електричне та електронне обладнання, електротехнічні джерела живлення (акумулятори, гальванічні елементи), а також освітлювальні лампи. До складу металовмісних побутових відходів входять не лише традиційні залізо, алюміній, мідь та їхні сплави, а й більш дефіцитні метали, зокрема рідкісноземельні й важкі метали, а також метали платинової групи, які є не лише цінним джерелом вторинної сировини, а й підґрунтям для зниження техногенного навантаження на довкілля. При цьому близько 70 % небезпечних для навколишнього природного середовища та здоров'я людини речовин, що входять до складу побутових відходів, міститься у відходах електричного та електронного обладнання [2].

Основними передумовами утилізації металовмісних відходів (і передусім металевих, тобто таких, до складу яких метали входять не у вигляді хімічних сполук, а в чистому вигляді або у вигляді сплавів з іншими металами) є такі:

1) кородування більшості металів і сплавів у природних умовах і потрапляння продуктів корозії в навколишнє середовище, що є небезпечним для людини, а також тваринного й рослинного світів;

2) можливість багаторазового перероблення металевих відходів практично без втрати якості одержуваної продукції порівняно з аналогічною продукцією, що виготовляється з первинної сировини;

3) металева вторинна сировина дає змогу заощадити паливно-енергетичні ресурси; наприклад, переплавлення алюмінієвих відходів потребує лише 5 % енергії, що витрачається на виробництво первинного

алюмінію з природної сировини [303]; для міді цей показник становить 17 %, сталі – 26 %, свинцю – 36 %, цинку – 40 % [304].

Отже, перероблення металовмісних відходів не лише забезпечує екологічну безпеку, а й зберігає природні ресурси й здешевшує виробництво продукції з металу. Таким чином, металовмісні відходи становлять значний ресурсний потенціал як вторинна сировина, проте навіть за умови доцільності їх перероблення значна частка металовмісних відходів досі піддається захороненню [2].

5.2. Основні операції поводження з металевими відходами

5.2.1. Загальні відомості про поводження з металевими відходами

Металеві відходи, до складу яких метали входять у чистому вигляді або у вигляді сплавів з іншими металами, зазвичай поділяють на три групи: чорні, кольорові й дорогоцінні.

Основними операціями поводження з металевими відходами, як і більшістю інших, є їх збирання, зберігання, транспортування, оброблення та перероблення, утилізування, а також видалення [98, 154, 299, 302].

Збирання металевих відходів

Вторинні чорні метали в загальному випадку (як відходи виробництва й споживання) поділяють [305]:

- за змістом вуглецю – на два класи: сталеві лом і відходи, а також чавунні лом і відходи;
- за наявністю легувальних елементів – на дві категорії: А – вуглецеві, Б – леговані;
- за показниками якості – на 28 видів;
- за змістом легувальних елементів – на 67 груп.

Лом і відходи двошарових сталей збирають в окремі металозбірники.

Лом і відходи кольорових металів і сплавів збирають роздільно за найменуваннями металів і за видами брухту й відходів відповідно до класифікації [306].

Відходи біметалів, що складаються з двох і більше кольорових металів, збирають в окремі металозбірники.

Не допускається засміченість брухту й відходів кольорових металів неметалевими домішками, чорними та іншими кольоровими металами.

Лом гальванічних елементів і батарей збирають роздільно за найменуванням електроліту (лужний, сольовий).

Лом електровакуумних приладів та електроламп збирають роздільно за групами виробів.

Побутовий брухт збирають роздільно за найменуваннями металів.

Зазвичай певну металовмісну продукцію виготовляють із застосуванням відповідних металів і сплавів, проте для гарантованої ідентифікації виду металу, що входить до складу тієї чи іншої продукції, іноді застосовують ідентифікацію за наявним маркуванням (кодом перероблення, або рецикловим кодом; табл. 5.1) [307].

Рекомендовані складові п'ятиступеневого ієрархічного порядку поводження з металевими відходами [27]: попередження утворення, підготовка до повторного використання, використання як вторинних матеріальних ресурсів, використання як вторинних матеріальних ресурсів після рекуперації енергії, остаточне розміщення.

Таблиця 5.1. Знаки коду перероблення для металевих і металовмісних відходів

Ідентифікатор матеріалу	Тип скла	Приклади продукції
8 Lead	Свинцево-кислотний акумулятор	Автомобільні акумулятори
9 Alkaline	Лужний елемент	Батарейки для ТВ пульта, батарейки для ліхтарів
10 NiCD	Нікель-кадмієвий акумулятор	Інші елементи живлення
11 NiMH	Нікель-металогідридний акумулятор	
12 Li	Літійовий елемент	Батареї мобільних телефонів, переносні зарядні пристрої
13 SO(Z)	Срібно-цинковий акумулятор	Срібно-цинковий акумулятор
14 CZ	Цинк-вугільна батарея	Батарейки для ліхтарів
40 FE	Сталь	Консервні банки
41 ALU	Алюміній	Банки для безалкогольних напоїв, дезодоранти, одноразові контейнери для харчових продуктів, алюмінієва фольга, радіатори
92	Пластик / Різні метали	
98	Скло / Різні метали	

Розглянемо окремі ступені ієрархічного порядку поводження з металовмісними відходами на прикладі електричного та електронного обладнання, яке втратило свої споживчі властивості [27].

Попередження утворення відходів і скорочення їх кількості

Господарючі суб'єкти, які використовують електричне та електронне обладнання, мають вживати заходи, що дають змогу скорочувати утворення відпрацьованого електричного та електронного обладнання, в тому числі здійснювати вибір обладнання з тривалим терміном служби, а також проводити заміну його несправних частин замість заміни всього приладу або пристрою.

Повторне використання побічної продукції іншими споживачами

Рекомендується повторно використовувати побічну продукцію. Наприклад, часто справне електричне та електронне обладнання виходить з ужитку та не використовується через придбання більш технічно досконалої продукції. У цьому разі попереднє обладнання доцільно передавати іншому споживачеві.

Підготовка відпрацьованого електричного та електронного обладнання до повторного використання

Деякі види відпрацьованого електричного та електронного обладнання можуть бути підготовлені для повторного використання з мінімальними витратами, наприклад, за допомогою ремонту.

Використання відпрацьованого електричного та електронного обладнання як вторинних матеріальних ресурсів

Якщо відпрацьоване електричне та електронне обладнання не може бути відремонтоване, його потрібно демонтувати для використання окремих вузлів, частин і деталей під час обслуговування або ремонту іншого відпрацьованого електричного та електронного обладнання або в інших цілях.

Інші підходи до використання відпрацьованого електричного та електронного обладнання

Якщо відпрацьоване електричне та електронне обладнання не може бути використане як вторинні матеріальні ресурси, його варто обробляти іншими методами. Наприклад, після видалення люмінофорного покриття зі скляного екрану електронно-променевих трубок телевізорів для подальшого вилучення з нього металів застосовують подрібнення скляних екранів [105, 241, 308–311]; при цьому одержана скляна крихта може бути використана як заповнювач бетонів або під час виробництва облицювальної й тротуарної плитки.

Також може бути застосоване термічне оброблення відпрацьованого електричного та електронного обладнання з метою рекуперацією енергії.

При цьому будь-яке відпрацьоване електричне та електронне обладнання, яке піддається обробленню, має передбачати вилучення з нього окремих компонентів або речовин та їх окреме перероблення й розміщення (наприклад, видалення люмінофорного покриття з електронно-променевих трубок, видалення хлорфторвуглеців, гідрохлорфторвуглеців і гідрофторвуглеців з холодильників, видалення рідкокристалічних екранів з комп'ютерних моніторів).

Видаляння відходів

Будь-які відходи, що утворилися в результаті ремонтних і відновлювальних робіт відпрацьованого електричного та електронного обладнання, включаючи демонтаж, та які не можуть бути перероблені, піддають спалюванню або направляють на захоронення.

Далі розглянемо напрями й перспективи поводження з найбільш поширеними металовмісними побутовими відходами.

5.2.2. Алюмінієві банки з-під напоїв

Алюміній – достатньо зручний метал для вторинного перероблення. За останні 40 років понад половини алюмінієвих відходів було піддано повторному переробленню. Його переплавлення потребує лише 5 % енергії, що витрачається на виробництво первинного алюмінію з природної сировини. При цьому алюміній, як і скло [302], може перероблюватися багаторазово [303].

Найбільш розповсюдженим видом алюмінієвих побутових відходів є алюмінієві банки. Натеper найчастіше використовуються банки місткістю 0,33 і 0,5 л (у Європі виготовляють банки місткістю від 150 мл до 1 л), при цьому маса найбільш поширеної банки місткістю 0,5 л становить приблизно 15,5 г. Алюмінієві банки в природних умовах розкладаються понад 500 років, що не лише спричинює потенційну втрату цінної сировини, а й створює небезпеку для довкілля, оскільки потрапляння в них води створює сприятливі умови для розмноження шкідливих мікроорганізмів, комах і гризунів.

У розвинених країнах алюмінієві банки приймають як у пунктах вторинної сировини, так і в фандоматах (тароматах) – роботизованих агрегатах, які вимінюють у населення оборотну упаковку в обмін на певну грошову винагороду або на бали чи чеки, які можна використовувати в магазинах або для проїзду на громадському транспорті.

Цікаве застосування використаних алюмінієвих банок запропоновано в Єгипті [312]: банки з обрізаними основами й кришками послідовно складають між собою з одержанням ефективних сонячних колекторів. Недолік конструкції запропонованих сонячних колекторів – неможливість використання zdeформованих та/або пошкоджених банок, а також банок різного типорозміру.

Досліджено процес переплавлення алюмінієвих банок на виливок, у тому числі з додаванням як 50 % (за мас.) первинного алюмінію, так і з додаванням 4 % (за мас.) рисового лушпиння та 2 % (за мас.) магнію [313]. Порівняно з першими двома виливками додавання до вторинного алюмінію рисового лушпиння та магнію сприяло підвищенню твердості та зменшенню крихкості й густини третього виливка.

Також досліджено властивості виливків, одержаних переплавленням алюмінієвих банок з додаванням як технічного алюмінію, так і міді та магнію [314].

Використані алюмінієві банки запропоновано обробляти водними розчинами для одержання водню з метою подальшого генерування з нього електричної та/або теплової енергії. Одержаний у результаті хімічної реакції твердий залишок піддавали сушінню з подальшим прожарюванням за температури 1200 °C для перетворення його на глинозем [315]. Метод одержання водню з алюмінієвих банок запропоновано і в праці [316].

Розроблено технологію одержання високопористого глинозему з розміром наночастинок 20–40 нм як основи термостійкого каталізатора з високою питомою поверхнею [317]. У праці [318] наведено технологію одержання наночастинок термодинамічно стабільного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ розміром 54–58 нм.

Запропоновано технологію одержання нанокристалічного $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ з середнім розміром частинок 68,56 нм і питомою поверхнею 311 м²/г, який може бути застосований як основа термостійкого каталізатора [319].

Досліджено одержання за допомогою гідротермального методу високоефективних адсорбентів у вигляді наноструктурних цеолітів з алюмінієвих банок і кремнію різного походження [320].

Більш складним виявляється перероблення алюмінієвих банок з внутрішнім захисним епоксидним покриттям, яке призначене для запобігання безпосередньому контакту вмісту банок з алюмінієм [321]. Звичайний спосіб перероблення таких банок неприйнятний через згоряння епоксидного покриття та забруднення продуктами згоряння вторинного алюмінію. Перед переплавленням банок алюмінієву складову банок запропоновано розчиняти біологічним вилуговуванням за допомогою бактерій (ефективність вилуговування становить майже 92 % після трьох тижнів інкубації), при цьому епоксидне покриття залишається незмінним, що дає змогу його також надалі утилізувати.

Запропоновано переробляти алюмінієві банки на металічну піну [322]. У результаті досліджень одержано алюмінієву піну з однорідною пористою структурою з середньою пористістю 80 %, середнім розміром пор 3 мм, густиною 400 кг/м³ і границею міцності під час стискання 22 МПа.

Розроблено технологію одержання дешевого й високоякісного композиційного матеріалу на основі перероблених алюмінієвих банок з-під напоїв з додаванням частинок діоксиду кремнію та піноутворювача. Досліджено вплив технологічних параметрів, а саме температури й часу на структуру, густину та міцність наповненого піноалюмінію. Зразки з доданням 10 % (за об.) частинок діоксиду кремнію та 6 % (за мас.) піноутворювача характеризується рівномірним розподілом і розміром закритих газових комірок майже правильної форми [323].

5.2.3. Консервні банки

У багатьох країнах світу харчові продукти споживають не лише у свіжому вигляді, а й перероблених або оброблених для можливості тривалого зберігання, зокрема в консервних банках.

Консервна банка – це герметичний контейнер для довгострокового зберігання харчових продуктів у герметичному середовищі, найчастіше виконаний з тонкої луджених сталі (консервної жерсті) або алюмінію. При

цьому в консервних банках може зберігатися найрізноманітніший вміст, але найчастіше вони застосовуються для тривалого зберігання консервованих продуктів харчування. Як і алюмінієві банки з-під напоїв, консервні банки не передбачають можливість повторної герметизації, оскільки їх відкриття призводить до розрізання металу упаковки.

Матеріалом для виробництва консервних банок зазвичай є біла жерсть завтовшки 0,12–0,36 мм із захисним олов'яним покриттям обох поверхонь. Проте захисні покриття (зазвичай внутрішні) можуть бути і з інших матеріалів, наприклад, полімерні. Наявність покриттів ускладнює процес перероблення відходів консервних банок.

5.2.4. Відпрацьоване електричне та електронне обладнання

До найбільш поширених категорій електричного та електронного обладнання, що втратило свої споживчі властивості, належать [27, 324]:

- великогабаритне побутове обладнання (наприклад, холодильне обладнання, пральні машини, кондиціонери);
- малогабаритне побутове обладнання (наприклад, пилососи, праски, тостери);
- телекомунікаційне обладнання (наприклад, телевізори, оргтехніка, персональна обчислювальна техніка);
- обладнання для запису й відтворення звуку або зображень (наприклад, радіоприймачі, відеокамери, магнітофони);
- освітлювальні лампи;
- господарське електрообладнання (наприклад, дрилі, пилки, швейні машини);
- іграшки та обладнання для розваг і спорту (наприклад, електричні залізнички, відеоігри, спортивне обладнання з електричними або електронними компонентами, ігрові автомати);
- медичні пристрої (за винятком імплантованої та інфікованої продукції);
- обладнання та прилади для моніторингу й контролю;
- торгові автомати й банкомати.

Крім традиційних сталі, чавуну, алюмінію та міді в електричному та електронному обладнанні містяться й інші метали. Наприклад, персональний комп'ютер, крім полімерних матеріалів і скла містить алюміній, барій, берилій, ванадій, вісмут, галій, германій, європій, залізо, золото, індій, ітрій, кобальт, марганець, мідь, нікель, ніобій, олово, паладій, родій, ртуть, рутеній, свинець, срібло, талій, тербій, хром, цинк, телур (металоїд), миш'як і сурму (напівметали). А окремі компоненти електричного та електронного обладнання можуть стати джерелом вторинних рідкісних (у тому числі рідкісноземельних) металів: празеодиму, неодиму, самарію й диспрозію

(високоєфективні магніти, наприклад, у навушниках і жорстких дисках комп'ютерів), індію (сенсорні екрани й фотоелементи), галію й телуру (фотоелементи), ербію (оптичне волокно), танталу (конденсатори), лантану й церію (акумулятори), лантану, церію, європій, тербій та ітрій (флуоресцентні покриття та енергозберігаючі лампи) [324].

Світовий обсяг відходів електричного та електронного обладнання (WEEE – Waste electrical and electronic equipment) у 2016 році становив близько 44,7 млн т, або 6,1 кг на душу населення. За прогнозами у 2021 році обсяг цих відходів зросте до 52,2 млн т зі щорічними темпами зростання від 3 до 4 % [325].

Одними з поширених видів електронних відходів є друковані плати, до складу яких входять конструкційні пластмаси (зокрема склотекстоліт, гетинакс), а також багато металів (у тому числі й важких): Al, Cd, Cr, Hg, Pb, Ni, Cu, Au, Ag, Pd, Sn, Fe та ін. Для вилучення металів з друкованих плат (зокрема Cu, Al і Fe) запропоновано застосовувати плазмові технології, під час яких органічні складові плат згоряють, а метали надалі піддаються вилуговуванню [326, 327]. Також показано, що в результаті плазмового оброблення друкованих плат утворюється значна кількість CO, який може бути використаний як енергетичний газ, а сам метод плазмового оброблення має високу економічну привабливість за значної енергоефективності [328].

Дорогоцінні метали з друкованих плат зазвичай вилучають на афінажних заводах [329].

У загальному випадку до складу друкованих плат можуть входити такі метали як Al, Sb, Be, Bi, Cd, Cr, Co, Cu, Ga, Au, Fe, In, Pb, Hg, Pd, Pt, Ru, Na, Ta, Sn, W, Zn [330]. Проте одержання деяких з них у результаті утилізації друкованих плат за сучасного рівня техніки й технології неможливо або економічно недоцільно.

Джерелом такого цінного легкого металу як індій (а також таких розповсюджених металів як алюміній і залізо) можуть бути відпрацьовані плоскопанельні дисплеї. Розроблено технологію, яка дає змогу утилізувати до 90 % індію з рідкокристалічних дисплеїв [331].

Джерелом рідкісноземельних металів можуть бути люмінесцентні лампи, до складу люмінофору яких входять європій, тербій, індій, лантан, церій, до 70 % світового виробництва яких використовуються саме для одержання люмінофорів [332]. Проте натепер зазвичай утилізуються лише скло, алюміній та ртуть, які входять до складу люмінесцентних ламп, а рештки люмінофора піддаються захороненню на полігонах. При цьому однією з проблем утилізації люмінесцентних ламп є вилучення з них такого небезпечного металу як ртуть [333]. Зокрема в лінійних (трубчастих) люмінесцентних лампах зазвичай міститься від 1 до 70 мг ртуті (для порівняння ртутний термометр може містити близько 2 г ртуті), яка після

виходу лампи з ладу розподіляється між газовим середовищем, нанесеним на скляну трубку люмінофором, скляною трубкою (колбою), а також алюмінієвими цоколями.

Розроблено технології вилуговування рідкісноземельних металів з люмінофору відпрацьованих люмінесцентних ламп, які забезпечують вилучення, % (за мас.): 98,6 ітрію, 96,2 європію, 98,9 лантану, 98,2 церію та 96,5 тербію [334], а також понад 95 % (за мас.) ітрію, європію, тербію, лантану, церію та гадолінію [335]. При цьому показано, що ступінь подрібнення використаних ламп істотно впливає на ступінь вилучення ртуті (середній розмір частинок подрібнених ламп не повинен перевищувати 100 мкм) [336], а технології вилуговування характеризуються незначною витратою розчинників, зручністю й точністю контролю перебігу процесу, низьким енергоспоживанням, а також високими екологічними показниками [337].

Незважаючи на те, що з 2020 року Мінаматська конвенція про ртуть [338] заборонила виробництво, експорт та імпорт декількох різних видів ртутьвмісної продукції, в тому числі електричних батарей, електричних вимикачів та реле, деяких видів компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ), люмінесцентних ламп з холодним катодом або із зовнішнім електродом, ртутних термометрів та приладів вимірювання тиску, у світі залишаються значні запаси зазначеної продукції, тому питання утилізуванню її відходів залишається актуальним.

Іншим поширеним потенційним джерелом вторинних металів є світлодіодні (LED) лампи, до складу яких входять такі метали як Al, Cu, Ga, Y, Ce, In, Pb, Au, Ag, більшість з яких можуть бути виділені із застосуванням гідрометалургійних процесів. Зокрема вміст золота у світлодіодних лампах становить 0,01–0,07 % (за мас.), що часто більше, ніж у золотоносній руді [339]. Проте відновлення рідкісноземельних металів гідрометалургійними процесами робить негативний внесок у процес глобального потепління, адже супроводжується значними викидами в атмосферу діоксиду вуглецю [340].

Очікується, що до 2030 року на частку світлодіодних ламп припадатиме 74 % ринку джерел світла [341], що сприятиме заощадженню електроенергії на 46 % [342], тому натеper проводяться інтенсивні пошуки не стільки ефективних методів утилізації світлодіодних ламп, скільки шляхів відновлення їх працездатності [343].

5.2.5. Електротехнічні джерела живлення (акумулятори й гальванічні елементи)

У сучасній техніці використовують шість основних типів хімічних джерел електричного струму багаторазової та одноразової дії – акумуляторів і гальванічних елементів, які відрізняються за хімічним складом [344]:

1. Нікель-кадмієві (NiCd). Добре відпрацьована й вивчена технологія, але має низьку густину енергії. Використовується там, де важлива довговічність, здатність забезпечити високий струм навантаження та малу вартість. Основні сфери застосування: портативні радіостанції, медичне обладнання, професійні відеокамери та електроінструмент. NiCd акумулятори містять токсичні матеріали та є екологічно небезпечними.

2. Нікель-металогідридні (NiMH). Порівняно з NiCd мають більшу густину енергії, але менший термін експлуатації. NiMH акумулятори не містять токсичних матеріалів. Використовуються в мобільних телефонах та портативних комп'ютерах.

3. Літій-іонні (Li-ion). Найбільш поширені акумулятори. Використовуються там, де потрібна висока густина енергії та низька маса, але вони дорожчі за решту типів акумуляторів. Використовуються в комп'ютерах і мобільних телефонах.

4. Літій-полімерні (Li-polymer). Розроблені як більш дешева версія Li-ion акумуляторів і за густиною енергії аналогічні Li-ion. Li-polymer акумулятори дуже компактні, тому зазвичай використовуються в мобільних телефонах.

5. Свинцево-кислотні акумулятори (LA). Застосовуються там, де потрібна велика потужність, а маса не має значення. Основна сфера застосування – стартерні акумуляторні батареї. Герметичні свинцево-кислотні (SLA) – один із видів свинцево-кислотних акумуляторів. Типові сфери застосування – стаціонарне медичне обладнання, електромобілі, системи аварійного енергопостачання, джерела безперебійного живлення (UPS).

6. Лужні (алкалінові) елементи живлення – марганцево-цинкові гальванічні елементи живлення з лужним електролітом. Ці елементи використовуються тоді, коли не потрібна велика потужність. Невеликий термін служби елементів компенсується дуже низьким струмом саморозряду, що робить їх найбільш доцільними для застосування в портативних магнітолах і ліхтарях.

За прогнозами світовий ринок елементів живлення у 2025 році становитиме понад 100 млрд USD з щорічним зростанням на 10 % у період з 2010 по 2025 роки [345].

Одними з найбільш поширених видів джерел електричної енергії для автомобілів та силової електроніки є літій-іонні акумулятори (батареї), попит на яких лише зростатиме щонайменше найближчі 15–20 років [346, 347]. Ці акумулятори характеризуються великою питомою потужністю та тривалим терміном експлуатації. При цьому серед електрохімічних джерел струму загальна потужність літій-іонних акумуляторів у 2018 році склала понад 86 % [307], а їхній світовий ринок у 2020 році перевищив 32 млрд USD [345]. Потреба в металах для акумуляторів електромобілів у 2019 році становила

близько 19 тис. т для кобальту, 17 тис. т для літію, 22 тис. т для марганцю й за прогнозами у 2030 році вона зросте в десять разів [348], при цьому маса відпрацьованих акумуляторів електромобілів у 2030 році досягне 4 млн т [349], а кількість електромобілів у світі – 140 млн одиниць [350], що становитиме певну проблему, адже існуючих виробничих потужностей з їх утилізації буде недостатньою. Станом на 2014 рік частка світового споживання літію й кобальту в акумуляторних батареях становила 35 % і 41 %, відповідно, і надалі вона лише зростатиме [351].

Загальна потужність автомобільних літій-іонні акумуляторів збільшилася з 31 ГВт·год у 2016 році до 120 ГВт·год у 2020 році. Для такого зростання знадобилося понад 0,55 млн т таких матеріалів як літій, кобальт, марганець, нікель і графіт [352].

Для утилізації літій-іонних акумуляторів зазвичай використовують окремо або в комбінації такі технології як пірометалургія та гідрометалургія (високо- і низькотемпературні металургійні процеси), кріогенне подрібнення або інші механічні процеси для попереднього розділення відходів на компоненти, а також екстракція розчинником для оброблення електроліту, катодних та анодних матеріалів. При цьому як розчинник може бути використаний надкритичний діоксид вуглецю (CO_2), який на відміну від багатьох органічних розчинників характеризується негорючістю, нетоксичністю, а також хімічною інертністю.

У результаті механічних процесів утилізації (які зазвичай проводять разом з гідрометалургією) цільовим продуктом є Li_2CO_3 , гідрометалургії – мідь, алюміній, кобальт і Li_2CO_3 , пірометалургії – мідь, нікель, кобальт і незначна частка заліза, а екстракції розчинником, зокрема надкритичним діоксидом вуглецю, – майже всі компоненти, крім матеріалу сепаратора (розміщений між електродами й виготовлений з синтетичних пористих матеріалів сепаратор застосовується для відокремлення позитивних і негативних електродів з метою запобігання короткому замиканню) [346]. При цьому шлак, який є одним з продуктів пірометалургії, можна додавати в бетонні суміші [349].

Понад 90 % літію може бути вилучено шляхом триступеневої протитечійної екстракції β -дікетеном, який після проведення процесу екстракції може бути повністю регенований [352]. Недолік методу – горючість, токсичність і хімічна активність екстрагенту.

Наприклад, лише в Китаї 2020 року було використано 0,5 млн т літій-іонних акумуляторів і гальванічних елементів (циліндричних, конічних (у вигляді круглих «таблеток»), призматичних і плоских). За умови повного перероблення цієї кількості батарей можна було б одержати приблизно 90 тис. т заліза, 75 тис. т літію, 60 тис. т кобальту, 45 тис. т міді, а також 35 тис. т полімерних матеріалів [353]. Взагалі, технологія літій-іонних

елементів живлення передбачає використання таких металів як алюміній, кобальт, мідь, залізо, літій, марганець, нікель, олово, титан [349]. Розмір літій-іонних елементів живлення може коливатися від міліметрів (у вигляді «таблеток») до десятків сантиметрів (електромобільні акумулятори, маса яких досягає 250 кг, а об'єм – 0,5 м³; при цьому річний продаж електромобілів у 2017 році перевищив 1 млн одиниць [354]).

Майже всі компоненти літій-іонних акумуляторів і гальванічних елементів можуть бути перероблені багатоступінчастими процесами. Зокрема сталеву та/або полімерну оболонку відокремлюють механічними або фізичними методами. Катод (LiCoO₂) та анод (графіт) можуть бути відокремлені від струмоznімачів (алюмінієвої й мідної фольги) механічними або фізичними методами (нагрівання, розчинення з метою видалення полівінілденфториду (недопустима назва «Фторопласт-2» [41, 42]) або органічного клею, що з'єднує між собою графіт та алюмінієву або мідну фольгу), після чого металеву фольгу переробляють безпосередньо, а графітний анод може бути використаний для одержання графену або композиційних матеріалів, у тому числі й полімерних композиційних матеріалів [52, 92, 126]. Матеріал катоду LiCoO₂ перероблюється переважно механохімічним методом (попереднє подрібнення матеріалу катоду з наступним кислотним вилуговуванням за кімнатної температури), гідрометалургійним методом (спочатку LiCoO₂ піддається кислотному або біологічному вилуговуванню, після чого метали з одержаного розчину можуть бути відновлені хімічним або електрохімічним осадженням, а також екстрагуванням органічним розчинником) [353]. При цьому гідрометалургійним методом відновлюють 99 % Al, 93 % Li, 89 % Co, 97 % Ni, 98 % Cu, 98 % Mn та 99 % Fe [355].

Показано, що випалюванням без доступу кисню літій-іонних елементів можна одержати до 91,3 % вихідного літію у вигляді карбонату літію, при цьому марганець одержують у вигляді його оксиду [356].

Аналіз технологій перероблення нікель-металогідридних акумуляторів наведено у праці [357].

У працях [345, 358] докладно проаналізовано особливості будови найбільш розповсюджених типів елементів живлення, а також методів їх утилізації з точки зору втілення в життя принципу 3R (Reuse, Reduce, Recycle – повторне використання, скорочення й перероблення) або більш всеосяжного принципу 3E (Efficiency, Economy, Environment – ефективність, економіка, довкілля).

І нарешті, металеві відходи можуть бути піддані спалюванню для одержання здебільшого теплової енергії. Зазвичай це відбувається під час спалювання несорттованих твердих побутових відходів.

За даними Агентства з охорони навколишнього середовища США [359]

2018 року з 25,6 млн т утворених металевих побутових відходів було переробленню 8,72 млн т (34,1 %), піддано спалюванню з метою рекуперації енергії 2,95 млн т (11,5 %), а видаленню (захороненню) – 13,93 млн т (54,4 %).

5.3. Видаляння металовмісних відходів

Основному методу видалення металовмісних відходів – захороненню – підлягають зазвичай істотно забруднені відходи, наприклад, металева фольга із залишками їжі. При цьому перед захороненням відходи можуть бути піддані знешкоджуванню, тобто обробленню, спрямованому на змінення й переведення небезпечних складників відходів у безпечні форми [302].

Поводження з металовмісними відходами є проблемою навіть високорозвинених країн. Так, Директивою 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради про упаковку та відходи від упаковки ухвалено рішення про необхідність повторного перероблення не пізніше 31.12.2025 р. 50 % чорних металів і 50 % алюмінію, а не пізніше 31.12.2030 р. – 75 % чорних металів і 75 % алюмінію [2].

Як видно з наведеного огляду, проблема поведження з металовмісними побутовими відходами залишається актуальною, проте перспектива її вирішення достатньо оптимістична.

5.4. Висновки до розділу 5

Аналіз сучасного стану проблеми поведження з побутовими металовмісними відходами, і передусім побутовою технікою, дає змогу зробити висновок, що наразі спостерігається тенденція не стільки вдосконалювати методи її утилізації, скільки забезпечити випуск більш довговічної продукції, які передбачають можливість її ефективного ремонту. Іншими словами, потрібно здійснювати поступовий перехід від стратегії 3R (Reuse, Reduce, Recycle – повторно використовувати, скорочувати, переробляти як вторинні матеріальні ресурси) до стратегії 10R (refuse, rethink, reconsider, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle and recover – відмовлятися, переосмислювати, переглядати, повторно використовувати, ремонтувати, оновлювати, переробляти, перепрофілювати, переробляти як вторинні матеріальні ресурси та відновлювати) [343, 360]. Такий перехід має активізувати в споживачів «зелене мислення»: здійснюючи ремонт техніки, ми скорочуємо кількість побутових відходів, тобто, майже не змінюючи різноманітні пристрої, ми маємо скоротити виробництво зайвої продукції.

При цьому не знімається з порядку денного й розроблення ефективних технологій вилучення дефіцитних матеріалів, і зокрема рідкісноземельних і важких металів, а також металів платинової групи, з побутових металовмісних відходів, що дасть змогу істотно знизити техногенне навантаження на довкілля.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Головний результат проведених досліджень – ґрунтовний аналіз стану та перспектив п'янь поводження з такими поширеними видами твердих побутових відходів як полімер-, скло- і металовмісні.

Показано, що якщо для полімер- і скловмісних відходів найбільш доцільними впродовж останніх десятиліть залишаються методи перероблення на вторинну сировину, які дають змогу максимально використати властивості відповідних матеріалів, то для металовмісних відходів і зокрема такого поширеного натеper як електричне та електронне обладнання методи їх перероблення на вторинну сировину поступово поступаються заходам, спрямованим на випуск більш довговічної продукції для зменшення утворення відповідних відходів.

Останніми роками для більшості технічно й технологічно складних твердих побутових відходів традиційна натеper стратегія 3R (Reuse, Reduce, Recycle – повторно використовувати, скорочувати, переробляти як вторинні матеріальні ресурси) або 3E (Efficiency, Economy, Environment – ефективність, економіка, довкілля) поступово поступається стратегії 10R (refuse, rethink, reconsider, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle and recover – відмовлятися, переосмислювати, переглядати, повторно використовувати, ремонтувати, оновлювати, переробляти, перепрофілювати, переробляти як вторинні матеріальні ресурси та відновлювати). Такий перехід має активізувати в споживачів «зелене мислення»: здійснюючи ремонт різноманітної науковвмісної продукції, людство скорочує кількість побутових відходів. У той же час залишається актуальним питання розроблення високоефективних технологій та обладнання для перероблення та утилізуваннa продукції, що врешті-решт втратила свої споживчі властивості.

Одержані результати є логічним продовженням ґрунтовних досліджень процесів та обладнання перероблення різноманітних матеріалів, у тому числі й вторинної, виконуваних на інженерно-хімічному факультеті КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Municipal solid waste. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Municipal_solid_waste (дата звернення: 04.12.2021).
2. 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> (дата звернення: 04.12.2021).
3. 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/terretery/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> (дата звернення: 04.12.2021).
4. Твёрдые бытовые отходы. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Твёрдые_бытовые_отходы (дата звернення: 04.12.2021).
5. Ritchie H., Roser M. Plastic Pollution // Our World in Data. 2018. URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#> (дата звернення: 04.12.2021).
6. Parker L. The world's plastic pollution crisis explained. 2019. URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution> (дата звернення: 04.12.2021).
7. Earth 2020: An Insider's Guide to a Rapidly Changing Planet / Tortell P. (ed.). Cambridge : Open Book Publishers. 2020. 274 p. DOI: <https://doi.org/10.11647/OBP.0193>
8. 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, N 1. P. 7–20. DOI: 10.12775/EiP.2020.001
9. 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. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>". 2020. 175 p. DOI: <http://science.sciencemag.org/content/suppl/2020/07/22/science.aba9475.DC1>
10. Le Guern C. When the mermaids cry: the great plastic tide. 2019. URL: <https://plastic-pollution.org/> (дата звернення: 04.12.2021).
11. 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>
12. Galloway T. S., Cole M., Lewis C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem // *Nature Ecology & Evolution*. 2017. Vol. 1, N 5. Article 0116. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
13. Revel M., Châtel A., Mouneyrac C. Micro(nano)plastics: A threat to human health? // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018. Vol. 1, P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>
14. La Mantia F. P. Recycling of Plastic Materials. 1st Ed. Toronto–Scarborough: ChemTec Publishing, 1993. 189 p.
15. Мікульюнок І. О., Радченко Л. Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. 184 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062> (дата звернення: 04.12.2021).

16. 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> (дата звернення: 04.12.2021).
17. Мікульонюк І. О., Рябцев Г. Л. Основні методи і шляхи використання полімервмісних відходів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2001. № 2. С. 135–147.
18. 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
19. Balasubramani R., Muthunarayanan 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119502753.ch3>
20. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.017>
21. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>
22. Ragaert K., Delva L., Geemb van K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // *Waste Management*. 2017. Vol. 69. P. 24–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
23. 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.
24. 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-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf (дата звернення: 04.12.2021).
25. ДСТУ 4462.0.01:2005. Охорона природи. Поводження з відходами. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 15 с.
26. ДСТУ 4462.3.01:2006. Охорона природи. Поводження з відходами. Порядок здійснення операцій. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 27 с.
27. ГОСТ Р 56828.31–2017. Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Иерархический порядок обращения с отходами. Москва: Стандартинформ, 2017. 24 с.
28. Лукашова В. В., Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Екструзія пінополімерів. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 176 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37522> (дата звернення: 04.12.2021).
29. Mikulionok I. O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011. Vol. 83, N 6. P. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371
30. ДСТУ 2731–94. Сировина полімерна вторинна. Порядок збирання, зберігання і перероблення відходів. Київ: Держстандарт України, 1994. 13 с.
31. ДСТУ 2102–92. Ресурси матеріальні вторинні. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1992. 12 с.
32. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 658–661. DOI: 10.1007/s10556-013-9676-x

33. 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, N 1. P. 58–73. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002
34. 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*: X. 2020. Vol. 6. Article 100036. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>
35. 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. DOI: <https://doi.org/10.29007/nwsh>
36. 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, N 4. P. 284–303. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477760620918603>
37. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_14
38. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>
39. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
40. Мікульюнок І. О. Обладнання для механічного руйнування полімер- та еластомервмісних відходів // *Вісник КНУТД: Напрямок «Хімія та хімічні технології»*. 2003. № 1. С. 131–134.
41. Мікульюнок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
42. Мікульюнок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (дата звернення: 04.12.2021).
43. 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, N 9–10. P. 604–608. DOI: 10.1007/s10556-016-0093-9
44. Микульёнок И. О., Лукач Ю. Е. Особенности конструктивного исполнения роторных измельчителей для резино- и полимерсодержащих отходов (Обзор) // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007. № 3. С. 69–72.
45. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
46. ДСТУ 2406–94. Пластмаси, полімери і синтетичні смоли. Хімічні назви. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 27 с.
47. Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L. Modeling the process of polymer processing in twin-screw extruders // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series «Applied physics»*. 2018. № 4/5 (94). P. 35–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139886

48. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Моделювання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37523> (дата звернення: 04.12.2021).
49. Recycling today. The potential of polypropylene. URL: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-recycling-potential-of-polypropylene/> (дата звернення: 04.12.2021).
50. Horodytska O., Valdés 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
51. Вторичное использование полимерных материалов / под ред. Е. Г. Любешкиной. Москва: Химия, 1989. 192 с.
52. Мікульонюк І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // *Хімічна промисловість України*. 2005. № 5. С. 30–39.
53. Микулёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // *Пластические массы*, 2012. № 9. С. 29–38.
54. Marzouk O. Y., Dheilly R. M., Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites // *Waste management*. 2007. Vol. 27, N 2. P. 310–318. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.03.012
55. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00013-X>
56. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Warchol 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>
57. 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
58. Mikulionok I. O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, N 1–2. P. 14–19. DOI: 10.1007/s10556-015-9990-6
59. Mikulionok I. O. Screw extruder mixing and dispersing units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, N 1–2. P. 103–109. DOI: 10.1007/s10556-013-9711-y
60. Микулёнок И. О. Определение реологических свойств термопластичных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2011. № 7. С. 26–30.
61. Mikulionok I. O. Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials // *International Polymer Science and Technology*. 2013. Vol. 40, N 9. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>
62. Brems A., baeyens J., Dewil R. Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context // *Thermal science*. 2012. Vol. 16, N 1. P. 669–685. DOI: 10.2298/tsci120111121b
63. Rahimi A., García 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
64. 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
65. Baena-González J., Santamaria-Echart A., Aguirre J. L., González S. Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil // *Waste Management*. 2020. Vol. 118. P. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.035>

66. ГОСТ 33573–2015. Ресурсосбережение. Упаковка. Критерии выбора методов и процессов переработки использованной упаковки в качестве вторичных материальных ресурсов с учетом материальных потоков. Москва: Стандартинформ, 2019. 29 с.
67. Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информация. Москва: ВИНТИ, 1999. № 4. С.11–13.
68. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
69. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525>
70. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122442>
71. Латышенко К. П., Гарелина С. А. Плазмохимический реактор по переработке полимерных отходов в водород и другую ликвидную продукцию // *Известия МГТУ «МАМИ»*. Сер. «Химическое машиностроение и инженерная экология». 2014. Т. 3, № 1(19). С. 10–17.
72. Corn Plastic to the Rescue. URL: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/corn-plastic-to-the-rescue-126404720/> (дата звернения: 04.12.2021).
73. 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, N 4. Article 651. 20 p. DOI: 10.3390/polym11040651
74. Использование материальных ресурсов за рубежом: Реферативный сборник. Москва: ВИНТИ, 1991. Вып. 11. С. 57.
75. Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информация. Москва: ВИНТИ, 1999. № 17. С.19–23.
76. Гуль В. Е., Рыженкова И. П. Экологические аспекты вторичного использования амортизованных упаковок из полимерных материалов // *Тара и упаковка*. 1997. № 1. С. 40–43.
77. 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
78. Chua H., Yu P. H. F., Ma C. K. Accumulation of Biopolymers in Activated Sludge Biomass // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1999. Vol. 77–79. N 1–3. P. 389–399. DOI: 10.1385/abab:78:1-3:389
79. Polyamides. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* / B. Herzog, M. I. Kohan, S. A. Mestemacher, R. U. Pagilagan, K. Redmond. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. P. 1–36. DOI: https://doi.org/10.1002/14356007.a21_179.pub3
80. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>
81. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>

82. Klemeš 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>
83. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>
84. Шарина И. А., Перепечко Л. Н., Аньшаков А. С. Перспективы использования плазменной технологии для переработки/уничтожения техногенных отходов // *ЭКО*. 2016. № 12. С. 28–35.
85. Твердые бытовые отходы. Проблемы и решения. Технологии, оборудование / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, А. Н. Александров, А. М. Коваленко. Харьков: ХНАГХ, 2006. 301 с.
86. Nanda S., Berruti F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2021. Vol. 19. P. 1433–1456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
87. Klemeš J. J., Fan Y. V., Jiang P. Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021. Vol. 43, N 13. P. 1549–1565. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1801906>
88. 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](https://doi.org/10.1002/anie.201915651)
89. 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](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012041)
90. Мікульонюк І. О. Основні методи використання гумовмісних відходів // *Хімічна промисловість України*. 2001. № 5. С. 53–58.
91. Костюк В. С., Соколенко А. І., Васильківський К. В., Костюк Є. В., Піддубний В. А. Фізико-хімічні властивості пакувальних матеріалів. Київ: Кондор-Видавництво, 2013. 402 с.
92. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості. Київ: ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. 179 с.
93. Мікульонюк І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632> (дата звернення: 04.12.2021).
94. Tournier V., Topham C. M., Gilles A., David B., Folgoas C., Moya-Leclair E., Kamionka E., Desrousseaux M.-L., Texier H., Gavalda S., Cot M., Guémard E., Dalibey M., Nomme J., Cioci G., Barbe S., Chateau M., André I., Duquesne S., Marty A. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles // *Nature*. 2020. Vol. 580, N 7802, P. 216–219. DOI: [10.1038/s41586-020-2149-4](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4)
95. 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-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf (дата звернення: 04.12.2021).

96. Ji L.-n. Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET) // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 312. P. 406–410. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.312.406
97. Технические свойства полимерных материалов / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская; 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург: Профессия, 2005. 248 с. URL: <http://www.professija.ru/pdf/tehsvois.pdf> (дата звернення: 04.12.2021).
98. Мікульонюк І. О. Стан і перспективи поводження з твердими полімерними відходами // *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2021. № 2. С. 52–73. DOI: 10.33070/etars.2.2021.05
99. A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change'. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change> (дата звернення: 04.12.2021).
100. Statista: Production of polyethylene terephthalate bottles worldwide from 2004 to 2021 (in billions). URL: <https://www.statista.com/statistics/723191/production-of-polyethylene-terephthalate-bottles-worldwide/> (дата звернення: 04.12.2021).
101. Dr. Frank Welle. The Facts about PET. URL: https://www.petcore-europe.org/images/news/pdf/factsheet_the_facts_about_pet_dr_frank_welle_2018.pdf (дата звернення: 04.12.2021).
102. PET bottles recycling. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/PET_bottle_recycling (дата звернення: 30.01.2022).
103. Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles / S. Thomas, A. V. Rane, K. Kanny, V. K. Abitha, M. G. Thomas (Eds.). Amsterdam: Elsevier Inc., 2018. 212 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01084-7>
104. ГалПЕТ: Переробка відходів ПЕТ. URL: http://www.galpet.com.ua/?page_id=3 (дата звернення: 04.12.2021).
105. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (дата звернення: 04.12.2021).
106. Tan Z., Fei Z., Zhao B., Yang J., Xu X., Wang Z. Identification for Recycling Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Bottles by Polarization Vision // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 27510–27617. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050816
107. Hamade R., Hadchiti R., Ammouri A. Making the Environmental Case for Reusable PET Bottles // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 43. P. 201–207. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.137
108. 15 идей, как можно использовать пластиковые бутылки на даче. URL: <https://www.ogorod.ru/ru/main/inspiration/15033/15-idey-kak-mozhno-ispolzovat-plastikovyye-butytki-na-dache.htm> (дата звернення: 04.12.2021).
109. Sharma H. Innovative and Sustainable Application of PET Bottle a Green Construction. Overview // *Indian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 10, N 16. 7 p. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i16/114307
110. Ceja Soto F. R., Pérez Bueno J. de J., Mendoza López M. L., Pérez Ramos M. E., Reyes Araiza J. L., Ramírez Jiménez R., Manzano-Ramírez A. Sustainability Metrics for Housing and the Thermal Performance Evaluation of a Low-Cost Prototype Made with Poly (Ethylene Terephthalate) Bottles // *Recycling*. 2019, Vol. 4, N 3. P. 30–45. DOI: 10.3390/recycling4030030
111. Dorji U., Tenzin U., Dorji P., Pathak N., Johir M. A. H., Volpin F., Dorji C., Chernicharo C. A. L., Tijing L., Shon H., Phuntsho S. Exploring shredded waste PET bottles as a

biofilter media for improved on-site sanitation // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 148. P. 370–381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.066>

112. Gaita E., Evangelisti C., Panzarasa G. A Proof-of-Concept Portable Water Purification Device Obtained from PET Bottles and a Magnetite-Carbon Nanocomposite. Recycling. 2018. Vol. 3, N 3. P. 31–41. DOI: 10.3390/recycling3030031

113. Gubanov E., Kupinets L., Deforzh H., Koval V., Gaska K. Recycling of polymer waste in the context of developing circular economy // Architecture Civil Engineering Environment. 2019. N 4. P. 99–108. DOI: 10.21307/ACEE-2019-055

114. Küppers B., Chen X., Seidler I., Friedrich K., Raulf K., Pretz T., Feil A., Pomberger R., Vollprecht D. Influences and consequences of mechanical delabelling on pet recycling. Detritus. 2019. Vol. 6. P. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13816>

115. Benavides P. T., Dunn J. B., Han J., Biddy M., Markham J. Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2018. Vol. 6, N 8. P. 9725–9733. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b00750

116. Tylman I., Dzierżek K. Filament for a 3D Printer from Pet Bottles – Simple Machine // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2020. Vol. 9, N 10. P. 1386–1392. DOI: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392

117. Little H. A., Tanikella N. G., Reich M. J., Fiedler M. J., Snabes S. L., Pearce J. M. Towards Distributed Recycling with Additive Manufacturing of PET Flake Feedstocks // Materials. 2020. Vol. 13, N 19. Article 4273. 22 p. DOI: 10.3390/ma13194273

118. Ragaert K., Delva L., Geemb van K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // Waste Management. 2017. Vol. 69. P. 24–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

119. Eriksen M. K., Christiansen J. D., Dagaard A. E., Astrup T. F. Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling // Waste Management. 2019. Vol. 96, P. 75–85. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.005

120. Schyns Z. O. G., Shaver M. P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review // Macromolecular Rapid Communications. 2020. Article 2000415. 27 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>

121. Majumdar A., Shukla S., Singh A. A., Arora S. Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 161. Article 104915. 10 p. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104915

122. Sarıoğlu E. Ecological Approaches in Textile Sector: The Effect of r-PET Blend Ratio on Ring Spun Yarn Tenacity // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2017. Vol. 5, N 2. P. 176–180. DOI: 10.21533/pen.v5i2.110

123. Albini G., Brunella V., Placenza B., Martorana B., Guido Lambertini V. Comparative study of mechanical characteristics of recycled PET fibres for automobile seat cover application // Journal of Industrial Textiles. 2018. Vol. 48, N 6. P. 992–1008. DOI: 10.1177/1528083717750887

124. Duong V., Ahmed A., Farook O. A Model Template Green Environment Initiative for Recycling Plastic Bottles with Progressive Entrepreneurship Partnership // Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). 2018. 5 p. DOI: 10.23919/PICMET.2018.8481786

125. Kusumocahyo S. P., Ambani S. K., Kusumadewi S., Sutanto H., Widiputri D. I., Kartawiria I. S. Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development

of ultrafiltration membrane // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8. Article 104381. 11 p. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104381

126. Мікульонюк І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // *Хімічна промисловість України*. 2005. № 5. С. 30–39.

127. Khalid F. S., Azmi N. B., Mazenan P. N., Shahidan S., Othman N. h., Guntor N. A. A. Self-consolidating concretes containing waste PET bottles as sand replacement // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Article 020034. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5022928>

128. Jassim A. K. Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 8. P. 635–642. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.081

129. Ricardo J. R. C. Use of Residues of Crushed Pet Bottles in the Form of a Scale as an Addition to the Manufacture of Concrete // In: *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*; J. F. Martirena-Hernandez, A. Alujas-Díaz, M. Amador-Hernandez (Eds.). Cham: Springer. 2019. P. 251–263. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_29

130. Bui N. K., Satomi T., Takahashi H. Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study // *Waste Management*. 2018. Vol. 78. P. 79–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.035>

131. Ge Z., Sun R., Zhang K., Gao Z., Li P. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.073

132. Lin X., Yu J., Li H., Lam J. Y. K., Shih K., Sham I. M. L., Leung C. K. Y. Recycling polyethylene terephthalate wastes as short fibers in Strain-Hardening Cementitious Composites (SHCC) // *Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 357. P. 40–52. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.046

133. Aghayan I., Khafajeh R. Recycling of PET in asphalt concrete // In: *Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*; F. Pacheco-Torgal, J. Khatib, F. Colangelo, R. Tuladhar (Eds.). Sawston: Woodhead Publishing, 2019. P. 269–285. DOI: 10.1016/b978-0-08-102676-2.00012-8

134. Al-Mosawi A. I., Abdulsada S. A. Technological Procedure for Recycling of PET Waste for Sustainable Environment Concept Achievement // *Open Access Library Journal*. 2018. Vol. 5. 6 p. DOI: 10.4236/oalib.1104327

135. Zhang R., Ma X., Shen X., Zhai Y., Zhang T., Ji C., Hong J. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 260. Article 110062. 11 p. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.110062

136. Ronkay F., Molnar B., Gere D., Czigany T. Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies // *Waste Management*. 2021. Vol. 119. P. 101–110. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.029

137. Fakirov S. A new approach to plastic recycling via the concept of microfibrillar composites // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. Article in press. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.001>

138. Shojaei B., Abtahi M., Najafi M. Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability // *Polymers for Advanced Technologies*. 2020. Vol. 31, N 12. P. 2912–2938, DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.5023>

139. Thiounn T., Smith R. C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58, N 10. P. 1347–1364. DOI: 10.1002/pol.20190261

140. Raheem A. B., Noor Z. Z., Hassan A., Abd Hamid M. K., Samsudin S. A., Sabeen A. H. Current Developments in Chemical Recycling of Post-Consumer Polyethylene Terephthalate Wastes for New Materials Production: A Review // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 225, N 29. P. 1052–1064. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.019
141. Rahimi A., García 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
142. Pudack C., Stepanski M., Fässler P. PET Recycling – Contributions of Crystallization to Sustainability // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. Vol. 92, N 4. P. 452–458. DOI: 10.1002/cite.201900085
143. Ügdüler S., Van Geem K. M., Denolf R., Roosen M., Mys N., Ragaert K., De Meester S. Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis // *Green chemistry*. 2020. Vol. 22, N 16. P. 5376–5394. DOI: 10.1039/d0gc00894j
144. Cavalcante S., Vieira D., Melo I. Chemical Recycling: Comparative Study about the Depolymerization of PET Waste-Bottles to Obtain Terephthalic Acid // *Proceedings*. 2019. Vol. 41, N 1. P. 78–86. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsoc-23-06650>
145. Sun C., Chen X., Zhuo Q., Zhou T. Recycling and depolymerization of waste polyethylene terephthalate bottles by alcohol alkali hydrolysis // *Journal of Central South University*. 2018. Vol. 25, N 3. P. 543–549. DOI: 10.1007/s11771-018-3759-y
146. Singh S., Sharma S., Umar A., Mehta S. K., Bhatti M. S., Kansal S. K. Recycling of Waste Poly(ethylene terephthalate) Bottles by Alkaline Hydrolysis and Recovery of Pure Nanospindle-Shaped Terephthalic Acid // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018. Vol. 18, N 8. P. 5804–5809. DOI: 10.1166/jnn.2018.15363
147. Lee H. L., Chiu C. W., Lee T. Engineering terephthalic acid product from recycling of PET bottles waste for downstream operations // *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021. Vol. 5. Article 100079. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100079>
148. Spasojević P. M., Panić V. V., Džunuzović J. V., Marinković A. D., Woortman A. J. J., Loos K., Popović I. G. High performance alkyd resins synthesized from postconsumer PET bottles // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5, N 76. P. 62273–62283. DOI: 10.1039/c5ra11777a
149. Bal K., Ünlü K. C., Acar I., Güçlü G. Epoxy-based paints from glycolysis products of postconsumer PET bottles: synthesis, wet paint properties and film properties // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. Vol. 14, N 3. P. 747–753. DOI: 10.1007/s11998-016-9895-0
150. Kaliveer V., Ramachandra R., Kumar P., Prajwal, Shetty M. S., DSilva R. Recycling and conversion of waste PET bottles into acrylic paints // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2236, N 1. Article 040019. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0007730>
151. El Essawy N. A., Konsowa A. H., Elnouby M., Farag H. A. A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016. Vol. 67, N 3. P. 358–370. DOI: 10.1080/10962247.2016.1242517
152. Ellessawy N. A., Elnouby M., Gouda M. H., Hamad H. A., Taha N. A., Gouda M., Mohy Eldin M. S. Ciprofloxacin removal using magnetic fullerene nanocomposite obtained from sustainable PET bottle wastes: Adsorption process optimization, kinetics, isotherm, regeneration and recycling studies // *Chemosphere*. 2019. Vol. 239. Article 124728. 10 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124728

153. Jabłońska B., Kielbasa P., Korenko M., Drózd T. Physical and Chemical Properties of Waste from PET Bottles Washing as A Component of Solid Fuels // *Energies*. 2019. Vol. 12, N 11. Article 2197. 17 p. DOI: 10.3390/en12112197
154. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості (Огляд) // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 3. С. 63–83. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2021.06>
155. Li S. PET recycling via gasification - Influence of operating conditions on product distribution: Master's thesis. Gothenburg (Sweden): Chalmers University of Technology, 2019. 100 p. URL: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/257443/257443.pdf> (дата звернення: 04.12.2021).
156. Koshti R., Mehta L., Samarth N. Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review // *Journal of Polymers and the Environment*. 2018. Vol. 26, N 8. P. 3520–3529. DOI: 10.1007/s10924-018-1214-7
157. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) // *Science*. 2016. Vol. 351, N 6278. P. 1196–1199. DOI: 10.1126/science.aad6359
158. Що робити з використаними пляшками з ПЕТФ для напоїв? // *Упаковка*. 2020. № 5. С. 42–43.
159. Директива № 94/62/ЕС Европейского Парламента и Совета об упаковке и отходах от упаковки (Брюссель, 20 декабря 1994 года). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text (дата звернення: 04.12.2021).
160. Директива № 2019/904/ЕС Европейского Парламента и Совета от 5 июня 2019 г. о сокращении влияния некоторых пластиковых продуктов на окружающую среду. URL: <http://ecorportus.ru/node/968> (дата звернення: 04.12.2021).
161. ДСТУ 2214–93. Вироби гумові. Випробування. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1993. 80 с.
162. Микулёнок И. О. Основные методы использования вышедших из употребления автомобильных шин // *Химическая промышленность*. 2013. Т. 90, № 4. С. 202–212.
163. ДСТУ 2219:2015. Шини пневматичні. Конструкція. Терміни та визначення понять. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 57 с.
164. Haas T., Markl E., Lackner M. Innovative use of waste tyres: Noise-barriers and geoengineering // *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2020. Vol. 1, N 1. P. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2020.1.1.0024>
165. Иванов К. С., Сурикова Т. Б. Утилизация изношенных автомобильных шин. URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=302> (дата звернення: 24.04.2021).
166. Титамир Олег. И использованные автошины: почему государство игнорирует мощный ресурс? // Информационно-аналитический еженедельник «Зеркало недели. Украина». 2019. Вып. 35 (21–27 сентября 2019 г.). URL: https://zn.ua/business/ispolzovannye-avtoshiny-pochemu-gosudarstvo-ignoriruet-moschnyy-resurs-330487_.html (дата звернення: 24.04.2021)
167. Експлуатаційні норми середнього ресурсу пневматичних шин колісних транспортних засобів і спеціальних машин, виконаних на колісних шасі: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 20.05.2006, № 488. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0712-06> (дата звернення: 24.04.2021).
168. ГОСТ Р 54095–2010. Ресурсосбережение. Требования к экобезопасной утилизации отработавших шин. Москва: Стандартиформ, 2011. 28 с.
169. Ross D. E. Use of Waste Tyres in a Circular Economy // *Waste Management & Research*. 2020. Vol. 38, N 1. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X19895697>

170. Переработка покрышек: достоинства и недостатки // Ресурсосберегающие технологии: экспресс-информ. Москва: ВИНТИ, 2007. Вып. 19. С. 6–16.
171. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M. T., Kurmus H., Mirzababaei M., Arulrajah A., Horpibulsuk S., Maghool F. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. Article 104679. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
172. Елена Конькова. Вторая жизнь покрышки // *Природа и человек*. XXI век. 2013. № 2. С. 20–22.
173. Богданов В. В. Удивительный мир резины. Москва: Знание, 1989. 192 с.
174. Валуев Д. В., Ананьева О. Р. Перспективы переработки автомобильных покрышек // *Вестник науки Сибири*. Сер. 12. Машиностроение и транспорт. 2011. № 1 (1). С. 699–704.
175. Использование материальных ресурсов за рубежом: реферат. сб. Вып. 7. Москва: ВИНТИ, 1991. 86 с.
176. Гаврилова Ю. Экологи требуют запретить лебедей из шин во дворах. URL: <https://kp.ua/life/635478-ekolohy-trebuuit-zapretyt-lebedei-yz-shyn-vo-dvorakh> (дата звернення: 24.04.2021)
177. Dobrotă D., Dobrotă G., Dobrescu T. Improvement of waste tyre recycling technology based on a new tyre markings // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 260. Article 121141. 13 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121141
178. Мікульонок І. О. Моделювання обладнання технологічних ліній для перероблення пластмас і гумових сумішей на базі валкових машин. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 244 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37520> (дата звернення: 04.12.2021).
179. Технологии и оборудование по утилизации крупногабаритных шин / А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, Е. А. Емченко, А. В. Борисенко, Е. Ю. Гаврильченко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2006. № 6/1(18). С. 82–85.
180. Соловьёв Е. М., Кузнецова И. А., Тигина О. В. Оборудование для переработки отходов резиновой промышленности. Москва: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1987. 36 с.
181. Kroll L., Hoyer S. Zero-waste production: Technology for the in-house recycling of technical elastomers // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 33. P. 335–342. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.041
182. Использование материальных ресурсов за рубежом: реферат. сб. Вып. 6. Москва: ВИНТИ, 1990. 74 с.
183. Дроздовский В. Ф. Получение резиновой крошки из амортизованных шин при низких температурах : [обзор. информ.]. Москва: ЦНИИТЭнефтехим. 1990. 62 с. (Серия «Производство шин» ; вып. 7).
184. Hoyer S., Kroll L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 43. P. 193–200. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.135
185. Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J.K. Grinding of Waster Rubber. Ch. 1. P. 1–23. In: *Rubber Recycling: Challenges and Developments* / J.K. Kim, P. Saha, S. Thomas, J.T. Haponiuk, M.K. Aswathi (eds.). Croydon: CPI Group (UK) Ltd, 2019. 337 p.
186. Трофимова Г. М., Новиков Д. Д., Компаниец Л. В., Мединцева Т. И., Ян. Ю. Б., Прут Э. Б. Влияние метода измельчения на структуру резиновой крошки // *Высокомолекулярные соединения*. Серия А. 2000. Т. 42, № 7. С. 1238–1245.

187. Fazli A., Rodrigue D. Waste Rubber Recycling: A Review on the Evolution and Properties of Thermoplastic Elastomers // *Materials*. 2020. Vol. 13, N 3. P. 782–812. DOI: 10.3390/ma13030782
188. Леонов Д. И., Леонов И. В. Анализ способов измельчения изношенных шин // *Машиностроитель*. 1999. № 8. С. 28–29.
189. Bowles A., Fowler G. D., O’Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis // *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Vol. 25. Article e00173. 15 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00173>
190. Перлина Ж. В., Веселов И. В. О применении регенерата в шинных резинах // 20-й Юбилейный симпозиум «Проблемы шин и резинотехнических композиций» (Москва, 12–16 октября 2009). Т. 2. Москва: НИИШП, 2009. С. 121–125.
191. Использование материальных ресурсов за рубежом: Реферат. сб. Вып. 3. Москва: ВИНТИ, 1990. 62 с.
192. Al-Bared M. A. M., Marto A., Latifi N. Utilization of Recycled Tiles and Tyres in Stabilization of Soils and Production of Construction Materials – A State-of-the-Art Review // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 22. P. 3860–3874. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1532-2>
193. Barišić I., Zvonarić M., Grubeša I. N., Šurdonja S. Recycling waste rubber tyres in road construction // *Archives of Civil Engineering*. 2021. Vol. 67, N 1. P. 499–512. DOI: 10.24425/ace.2021.136485
194. Rahman M. T., Mohajerani A., Giustozzi F. Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete and Bitumen: A Review // *Materials*. 2020. Vol. 13, N 7. P. 1495–1514. DOI: 10.3390/ma13071495
195. Chiu C.-T., Lu L.-C. A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber // *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, N 5. P. 1027–1033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.005>
196. Senin M. S., Shahidan S., Leman A. S., Othman N., Shamsuddin S., Ibrahim M. H. W., Mohd Zuki S. S. The durability of concrete containing recycled tyres as a partial replacement of fine aggregate // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 271. Article 012075. 8 p. DOI: 10.1088/1757-899x/271/1/012075
197. Almaleeh A. M., Shitote S. M., Nyomboi T. Use of waste rubber tyres as aggregate in concrete // *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*. 2017. Vol. 8, N 2. P. 11–19. DOI: 10.5897/JCECT2016.0421
198. Medina N. F., Medina D. F., Hernández-Olivares F., Navacerrada M. A. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 144. P. 563–573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>
199. Утилизация отработанных резиновых покрышек / Е. И. Макарова, Е. В. Бенза, С. Г. Герке, М. Абу-Хасан, М. С. Старинец // *Новые исследования в материаловедении и экологии*. 2006. № 6. С. 38–39.
200. Foti D., Adamopoulos S., Voulgaridou E., Passialis C., Voulgaridis E. Compression strength properties of gypsum matrix composites with recovered fibrous scrap materials from post-consumer tyres // *International Journal of Materials and Product Technology*. 2020. Vol. 61, N 1. P. 53–67. DOI: 10.1504/IJMPT.2020.10033164
201. Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Saiz L., Rubio-Gámez M. C. Recycling waste rubber particles for the maintenance of different states of railway tracks through a two-step

stoneblowing process // Journal of Cleaner Production. 2019. Article JCLP 118570. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118570>

202. Thai Q. B., Chong R. O., Nguyen P. T. T., Le D. K., Le P. K., Phan-Thien N., Duong H. M. Recycling of waste tire fibers into advanced aerogels for thermal insulation and sound absorption applications // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8. Article 104279. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104279>

203. Макаров В. М., Дроздовский В. Ф. Использование амортизованных шин и отходов производства резиновых изделий. Ленинград: Химия, 1986. 248 с.

204. Sienkiewicz M., Janik H., Borzędowska-Labuda K., Kucińska-Lipka J. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 147. P. 560–571. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.121>

205. Kroll L., Hoyer S., Klaerner M. Production technology of cores for hybrid laminates containing rubber powder from scrap tyres // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 591–598. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.02.160](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.160)

206. Mikulenok I. O. Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50, N 7–8. P. 483–488. DOI: [10.1007/s10556-014-9927-5](https://doi.org/10.1007/s10556-014-9927-5)

207. Дроздовский В. Ф. Способы производства регенерата : [обзор. информ.]. Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1989. 88 с. (Серия «Производство шин» ; вып. 5).

208. Mikulionok I. O. Classification of the Structures of Closed-Type Rotary Mixers for Plastics and Rubber Mixtures (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, N 5–6. P. 437–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00956-3>

209. Markl E., Lackner M. Devulcanization Technologies for Recycling of Tire-Derived Rubber: A Review // Materials. 2020. Vol. 13, N 5. P. 1246–1261. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13051246>

210. Соколов М. В., Николюкин М. М. Перспективы применения ультразвука при производстве девулканизата // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17, № 1. С. 104–109.

211. Ghosh J., Hait S., Ghorai S., Mondal D., Wießner S., Das A., De D. Cradle-to-cradle approach to waste tyres and development of silica based green tyre composites // Resources, Conservation & Recycling. 2020. Vol. 154. Article 104629. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104629>

212. Rekhaye A., Jeetah P. Assessing Energy Potential from Waste Tyres in Mauritius by Direct Combustion, Pyrolysis and Gasification. 2017. P. 113–125. In: The Nexus: Energy, Environment and Climate Change. Series "Green Energy and Technology" / W. Leal Filho, D. Surroop (eds.). New York City: Springer International Publishing AG., 2018. 388 p. DOI: [10.1007/978-3-319-63612-2_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63612-2_7)

213. Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов). Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 9-2015. Москва: Бюро НДТ, 2015. 249 с.

214. Шинная промышленность : экспресс-информация. Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1991, № 10. 25 с.

215. Zang G., Jia J., Shi Y., Sharma T., Ratner A. Modeling and economic analysis of waste tire gasification in fluidized and fixed bed gasifiers // Waste Management. 2019. Vol. 89. P. 201–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.070>

216. Ongen A., Ozcan H. K., Elmaslar Ozbas E., Pangaliyev Y. Gasification of waste tires in a circulating fixed-bed reactor within the scope of waste to energy // Clean Technologies and Environmental Policy. 2019. Vol. 21. P. 1281–1291. DOI: [10.1007/s10098-019-01705-0](https://doi.org/10.1007/s10098-019-01705-0)

217. Naveed S., Malik A., Ramzan N., Akram M. A comparative study of gasification of food waste (FW), poultry waste (PW), municipal solid waste (MSW) and used tires (UT) // *The Nucleus*, 2009. Vol. 46, N 3. P. 77–81. URL: <http://www.thenucleuspak.org.pk/index.php/Nucleus/article/view/929/593> (дата звернення: 02.05.2021)
218. Mikáczó V., Zsemberi A., Siménfalvi Z., Palotás Á.B. Investigation of Tyre Recycling Possibilities with Cracking Process. P. 155–169. In: *Vehicle and Automotive Engineering* / K. Jármai, B. Bolló (eds.). New York City: Springer International Publishing AG. 2017. 500 p. DOI: 10.1007/978-3-319-51189-4_16
219. Sathiskumar C., Karthikeyan S. Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products – a review // *Sustainable Materials and Technologies*. 2019. Vol. 22. Article e00125. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>
220. Khudhair M. M., Omran R. J., Alameer H. A. Characterization study of liquid fuel produced from pyrolysis of waste tyres using different catalysts // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2290, Article 030009. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0027869>
221. Zahid M. U., Ali N., Khan W. A., Malik S. R. Effect of Operating Parameters on Bio-oil Yield from Pyrolysis of Waste Tyres in Lab Scale Fixed Bed Reactor // *NFC IEFJR Journal of Engineering and Scientific Research*. 2017. Vol. 5, N 1. 4 p. DOI: 10.24081/nijesr.2017.1.0002
222. Wang Z., Burra K. G., Zhang M., Li X., Policella M., Lei T., Gupta A. K. Co-pyrolysis of waste tire and pine bark for syngas and char production // *Fuel*. 2020. Vol. 274. Article 117878. 9 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117878
223. Verma P., Zare A., Jafari M., Bodisco T. A., Rainey T., Ristovski Z. D., Brown R. J. Diesel engine performance and emissions with fuels derived from waste tyres // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Article 2457. 13 p. DOI: 10.1038/s41598-018-19330-0
224. Яцун А. В., Коновалов П. Н., Коновалов Н. П. СВЧ-пиролиз изношенных автомобильных шин в присутствии гидроксида калия // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 2. С. 83–87. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36589> (дата звернення: 24.04.2021)
225. Современное состояние термических методов переработки изношенных шин и резиносодержащих отходов / С. Р. Иванов, М. Ю. Круглова, О. В. Платонова, Б. Н. Оладов. Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. 49 с.
226. Mozafari A., Farshchi Tabrizi F., Farsi M., Seyed Mousavi S. A. H. Thermodynamic modeling and optimization of thermolysis and air gasification of waste tire // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 126. P. 415–422. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jaap.2017.04.001>
227. Mavukwana A., Stacey N., Fox J.A., Sempuga B. C. Thermodynamic comparison of pyrolysis and gasification of waste tyres // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, N 2. Article 105163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105163>
228. Шины из биоразлагаемой резины могут стать реальностью. URL: <https://share.america.gov/ru/шины-из-биоразлагаемой-резины-могут-с/> (дата звернення: 24.04.2021).
229. Lao W. C., Toledo de R. A., Lu Q., Shim H. Degradation of scrap tyre by *Bacillus* sp. – Kinetic aspects of major environmental parameters and identification of potential growth substrates // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2019. Vol. 137. P. 95–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.11.012>
230. Директива Совета Европейского союза от 26 апреля 1999 г. О захоронении отходов на полигонах (Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_925#Text (дата звернення: 24.04.2021)

231. Nanda S., Berruti F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2021. Vol. 19. P. 1433–1456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
232. Soo V. K., Peeters J., Compston P., Doolan M., Duflou J. R. Comparative Study of End-of-Life Vehicle Recycling in Australia and Belgium // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 269–274. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.222
233. Abdelli H. E., Mokrani L., Kennouche S., de Aguiar JL B. Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review // *Waste Management & Research*. 2020. Vol. 00, N 0. 10 p. DOI: 10.1177/0734242X20941090
234. Vinci G., D'Ascenzo F., Esposito A., Musarra M., Rapa M., Rocchi A. A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 223. P. 587–595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.124>
235. Miteva K. Production of sustainable energy from solid waste by pyrolysis – a review // *Recycling and Sustainable Development*. 2017. Vol. 12, N 1. P. 69–77. DOI: 10.5937/ror1901069M
236. Cui H., Sošić G. Recycling Common Materials: Effectiveness, Optimal Decisions, and Coordination Mechanisms // *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 274. P. 1055–1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.010>
237. Что происходит с выброшенной стеклянной бутылкой? Ее легче переработать, чем пластиковую? URL: <https://www.coca-cola.ru/news-and-trends/trends/recycling/what-happens-to-a-glass-bottle-after-you-throw-it-away> (дата звернення: 24.04.2021)
238. Весь процесс переработки стекла: утилизация как способ сохранить природу и заработать. URL: <https://rcycle.net/steklo/pererabotka-utilizatsiya> (дата звернення: 04.12.2021).
239. Afshinnia, K., Rangaraju, P.R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 117. P. 263–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072>
240. Гуріна І. В. Аналіз сучасних підходів до класифікації медичних відходів в Україні // *Ліки України*. 2014. № 4 (21). С. 51–54. URL: https://www.health-medic.com/articles/liki_ukr_plus/2014-12-30/11.pdf (дата звернення: 04.12.2021).
241. Мікульонюк І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології. Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 172 с.
242. ГОСТ Р 56828.28–2017. Наилучшие доступные технологии. Производство стекла. Аспекты повышения энергетической эффективности. Москва: Стандартинформ, 2017. 16 с.
243. Mikulionok I. O. Classification of convective drum dryers (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56, N 7–8. P. 588–596. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00814-8>
244. Рішення Європейської комісії від 29.01.1997 № 97/129/ЄС, що встановлює ідентифікаційну систему для пакувальних матеріалів відповідно до Директиви 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради про упаковку та її відходи. URL: https://minjust.gov.ua/m/str_45875 (дата звернення: 04.12.2021).
245. Jiang Y., Ling T.-C., Mo K. H., Shi C. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 242, N 15. P. 440–449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>

246. Jani Y., Hogland W. Waste glass in the production of cement and concrete – A review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014. Vol. 2, N 3. P. 1767–1775. DOI: 10.1016/j.jece.2014.03.016
247. Dhir R. K., Dyer T. D., Tang M. C. Alkali-silica reaction in concrete containing glass // *Materials and Structures*. 2009. Vol. 42. N 10. P. 1451–1462. DOI: 10.1617/s11527-008-9465-8
248. Mohajerani A., Vajna J., Cheung T. H. H., Kurmus H., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 156. P. 443–467. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>
249. West G. *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Road and Bridges*. London: Thomas Telford, 1996. 163 p. DOI: <https://doi.org/10.1680/aricrab.20696>
250. Corinldesi V., Gnapi G., Moricni G., Montenero A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars // *Waste Management*. 2005. Vol. 25, N 2. P. 197–201. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.12.009
251. Bashar T., Ghassan N. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, N 5. P. 713–720. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019
252. Ke G., Li W., Li R., Li Y., Wang G. Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali–Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. Article 67. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>
253. Bisikirske D., Blumberga D., Vasarevicius S., Skripkiunas G. Multicriteria Analysis of Glass Waste Application // *Environmental and Climate Technologies*. 2019. Vol. 23, N 1. P. 152–167. DOI: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-0011>
254. Meyer C., Egosi N., Andela C. Concrete with Waste Glass as Aggregate. In: *Recycling and Re-use of Glass Cullet*. International Symposium Proceedings of the Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee, March 19–20, 2001. 9 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.558.2591&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення: 04.12.2021).
255. Yang S., Lu J.-X., Poon C.S. Recycling of waste glass in dry-mixed concrete blocks: Evaluation of alkali-silica reaction (ASR) by accelerated laboratory tests and long-term field monitoring // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. Article 120865. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120865>
256. Mikulionok I. O. Classification of gravity mixers of bulk materials (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56, N 1–2. P. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00884-2>
257. Khan M. S., Tufail M., Mateeullah M. Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils // *Civil Engineering Journal*. 2018. Vol. 4, N 9. P. 2044–2051. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091137>
258. Poutos K. H., Alani A. M., Walden P. J., Sangha C. M. Relative temperature changes within concrete made with recycled glass aggregate // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, N 4. P. 557–565. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.018
259. Liu T., Song W., Zou D., Li L. Dynamic mechanical analysis of cement mortar prepared with recycled cathode ray tube (CRT) glass as fine aggregate // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 1436–1443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.057>
260. Teja G N V. S., Sharma A. Usage of glass powder and recycled aggregate in concrete // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management (Conference: Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management, EIAETM)*. 2019. Vol. 6.

P. 575–579. URL: http://procedia-esem.eu/pdf/issues/2019/no4/65_Teja_19.pdf (дата звернення: 04.12.2021).

261. Olofinnade O. M., Ede A. N., Ndambuki J. M. Sustainable Green Environment through Utilization of Waste Soda-Lime Glass for Production of Concrete // *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2017. Vol. 8, N 4, P. 1139–1152. URL: http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_N4/121-JMES-2709-Olofinnade.pdf (дата звернення: 04.12.2021).

262. Lu J.-X., Zheng H., Yang S., He P., Poon C. S. Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. P. 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.231>

263. Wang H., Sun Y., Liu L., Wang X., Ji R. Integrated utilization of fly ash and waste glass for synthesis of foam/dense bi-layered insulation ceramic tile // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 168. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.018>

264. Ogunro A. S., Apeh F. I., Nwannenna O. C., Ibadode O. Recycling Of Waste Glass As Aggregate For Clay Used In Ceramic Tile Production // *American Journal of Engineering Research*. 2018. Vol. 7, N 8. P. 272–278. URL: <http://www.ajer.org/papers/Vol-7-issue-8/ZZG0708272278.pdf> (дата звернення: 04.12.2021).

265. Bursi E., Barbieri L., Lancellotti I., Saccani A., Bignozzi M. Lead waste glasses management: Chemical pretreatment for use in cementitious composites // *Waste Management & Research*. 2017. Vol. 35, N 9. P. 958–966. DOI: 10.1177/0734242X17715098

266. Yao Z., Ling T.-C., Sarker P. K., Su W., Liu J., Wu W., Tang J. Recycling difficult-to-treat e-waste cathode-ray-tube glass as construction and building materials: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 595–604. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.027

267. Mikulionok I. O. Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 57, N 9–10. P. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>.

268. Liu H., Shi J., Qu H., Ding D. An investigation on physical, mechanical, leaching and radiation shielding behaviors of barite concrete containing recycled cathode ray tube funnel glass aggregate // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 201. P. 818–827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.221>

269. Tung-Chai L., Chi-Sun P. Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 33. P. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.003>

270. Long W.-J., Gu Y.-c., Zheng D., Han N. Utilization of graphene oxide for improving the environmental compatibility of cement-based materials containing waste cathode-ray tube glass // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 192. P. 151–158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.229>

271. Grdić D., Ristić N., Topličić-Ćurčić G., Krstić D. Potential of usage of self compacting concrete with addition of recycled crt glass for production of precast concrete elements // *Facta universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering*. 2018. Vol. 16, N 1, P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.2298/FUACE170125005G>

272. Kim Kicheol, Kim Kidong. Valuable Recycling of Waste Glass generated from the Liquid Crystal Display Panel Industry // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 191–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.326>

273. Góra J., Franus M., Barnat-Hunek D., Franus W. Utilization of Recycled Liquid Crystal Display (LCD) Panel Waste in Concrete // *Materials*. 2019. Vol. 12, N 18. Article 2941. 21 p. DOI: 10.3390/ma12182941

274. Ling T.-C., Poon C. S. Spent fluorescent lamp glass as a substitute for fine aggregate in cement mortar // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 161. P. 646–654. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.173>
275. D'Amore G. K. O., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass Powder // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. P. 1306–1315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214>
276. Stochero N. P., de Souza Chami J. O. R., Souza M. T., de Moraes E. G., Novaes de Oliveira A. P. Green Glass Foams from Wastes Designed for Thermal Insulation // *Waste and Biomass Valorization*. 2020. Vol. 12, N 3. P. 1609–1620. DOI: 10.1007/s12649-020-01120-3
277. Souza M. T., Maia B. G. O., Teixeira L. B., de Oliveira K. G., Teixeira A. H. B., Novaes de Oliveira A. P. Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. Vol. 111. P. 60–64. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2017.06.011>
278. Zach J., Sedlmajer M., Dufek Z., Bubenik J. Development of Light-Weight Concrete with Utilization of Foam Glass Based Aggregate // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 276. P. 276–281. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.276.276
279. Silva R. V., de Brito J., Lye C. Q., Dhir R. K. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. P. 346–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
280. Ramdani S., Guettala A., Benmalek ML, Aguiar J. B. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 21. P. 302–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.003>
281. Abdulkareem M. A., Rasool D. A., Mahmood A. K. The effect of using rubber tier and glass waste on the properties of cement mortar // *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2018. Vol. 22, N 2 (part 4). P. 84–93. DOI: 10.31272/jeasd.2018.2.52
282. Mohammadinia A., Wong Y. C., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197. P. 489–496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.192>
283. Chandni T. J., Anand K. B. Utilization of Recycled Waste as Filler in Foam concrete // *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 19. P. 154–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.032>
284. Dehghan A., Peterson K., Shvarzman A. Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 146. P. 238–250. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.011>
285. Małek M., Łasica W., Kadela M., Kluczyński J., Dudek D. Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fibre-Reinforced Cement–Glass Composite // *Materials*. 2021. Vol. 14, N 3. Article 637. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14030637>
286. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M., Wachowski M. Mechanical and Material Properties of Mortar Reinforced with Glass Fiber: An Experimental Study // *Materials*. 2021. Vol. 14, N 3. Article 698. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14030698>
287. Chen Z., Li J.S., Poon C. S. Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 171. P. 1447–1459. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.140>

288. Tahmoorian F., Samali B., Yeaman J., Crabb R. The Use of Glass to Optimize Bitumen Absorption of Hot Mix Asphalt Containing Recycled Construction Aggregates // *Materials*. 2018. Vol. 11, N 7. Article 1053. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071053>
289. Rosli A. E., Sarif A. S. A Review of Potential on Modified Binder with Glass Cullet as Fine Aggregate Replacement // *Progress in Engineering Application and Technology*. 2021. Vol. 2, N 1. P. 258–265. DOI: <https://doi.org/10.30880/peat.2021.02.01.024>
290. Baqadeem A. O. A., Jakarni F. M., Al-Shakhrit A. K. S., Masri K. A. The usage of Recycled Glass in Hot Mix Asphalt: A Review // *Construction*. 2021. Vol. 1, N 1. P. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.15282/cons.v1i1.6324>
291. Alhassan H. M., Yunusa G. H., Sanusi D. Potential of glass cullet as aggregate in hot mix asphalt // *Nigerian Journal of Technology*. 2018. Vol. 37, N 2. P. 338–345. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v37i2.8>
292. Olesik P., Koziol M., Konik D., Jala J. The use of shredded car windscreen waste as reinforcement of thermoplastic composites for 3D (FDM) printing // *Composites Theory and Practice*. 2019. Vol. 19. N 1. P. 30–33. URL: https://kompozyty.ptmk.net/pliczki/pliki/1301_2019t01_piotr-olesik-mateusz-koziol-.pdf (дата звернення: 04.12.2021).
293. Ting A. G. H., Tay D. Y. W., Qian Y., Tan M. J. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2019. Vol. 21. P. 994–1003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00857-x>
294. Волоткович Е. Стрoения из стеклянных бутылок: реальность или фантастика. URL: <https://stroyday.ru/news/stroeniya-iz-steklyannyx-butylok-realnost-ili-fantastika.html> (дата звернення: 04.12.2021).
295. Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet. Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf (дата звернення: 04.12.2021).
296. 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
297. ГОСТ 33521–2015. Ресурсосбережение. Упаковка. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2018. 8 с.
298. David A., Thangavel Y. D., Sankriti R. Recover, Recycle and Reuse: An Efficient Way to Reduce the Waste // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019. Vol. 9, N 3. P. 31–42. DOI: 10.24247/ijmpredjun20194
299. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з використаними ПЕТ-пляшками // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 4. С. 45–61. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.4.2021.05>
300. Miteva K. Production of sustainable energy from solid waste by pyrolysis – a review // *Recycling and Sustainable Development*. 2017. Vol. 12, N 1. P. 69–77. DOI: 10.5937/ror1901069M
301. Cui H., Sošić G. Recycling Common Materials: Effectiveness, Optimal Decisions, and Coordination Mechanisms // *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 274. P. 1055–1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.010>
302. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження зі скляними відходами // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 1. С. 33–50. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2022.04>

303. Как зарабатывать деньги на банках: кто и для чего скупает алюминиевые банки? <https://www.vtorma.ua/ru/usloviya-vtormy-dlya-priema-loma-alyuminievyyh-banok-2/> (дата доступа 27.11.2021)
304. Клинков А. С., Беляев П. С., Однолько В. Г., Соколов М. В., Макеев П. В., Шашков И. В. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов / Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 188 с. URL: <https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2015/sokolov-t.pdf> (дата звернения: 04.12.2021).
305. ГОСТ 2787–75. Металлы черные вторичные. Общие технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов. 2002. 52 с.
306. ГОСТ Р 54564–2011. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2013. 59 с.
307. Fan E., Li L., Wang Z., Lin J., Huang Y., Yao Y., Chen R., Wu F. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects // Chemical Reviews. 2020. Article acs.chemrev.9b00535. 44 p. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00535
308. Mikulionok I. O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 56, N 11–12. P. 951–957. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>.
309. Mikulionok I. O. Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, N 9–10. P. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>
310. Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 1(21). С. 30–43. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254157
311. Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Подрібнювальні тіла барабанних млинів і дробарок (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 2(21). С. 9–21. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2022.260339
312. Kishk S. S., ElGamal R. A., ElMasry G. M. Effectiveness of Recyclable Aluminum Cans in Fabricating an Efficient Solar Collector for Drying Agricultural Products // Renewable Energy. 2019. Vol. 133(C). P. 307–316. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.028
313. Holzschuh G. G., Dörr D. S., Moraes J. A. R., Garcia S. B. Metal matrix production: Casting of recycled aluminum cans and incorporation of rice husk ash and magnesium // Journal of Composite Materials. 2020. Vol. 54, N 22. P. 3229–3241. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998320911964>
314. Holzschuh G. G., Moraes J. A. R., Garcia S. B., Zanesco I., Kipper L. M., Cassia Schneide R. Casting of recycled aluminum, Al + Cu + Mg alloy formation and lamination process of an electric current conductor // Research Square. 2021. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-443027/v1>
315. Buryakovskaya O. A., Meshkov E. A., Vlaskin M. S., Shkolnikov E. I., Zhuk A. Z. Utilization of Aluminum Waste with Hydrogen and Heat Generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 250. Article 012007. 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/250/1/012007
316. Yang H., Zhang H., Peng R., Zhang S., Huang X., Zhao Z. Highly efficient hydrolysis of magnetic milled powder from waste aluminum (Al) cans with low-concentrated

alkaline solution for hydrogen generation // International Journal of Energy Research. 2019. Article er.4621. 10 p. DOI: 10.1002/er.4621

317. Fakhimi O., Najafi A., Khalaj G. A facile rout to obtain Al_2O_3 nanopowder via recycling aluminum cans by sol-gel method // Materials Research Express. 2020. Vol. 7, N 4. Article 045008. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8653>

318. López-Juárez R., Razo-Perez N., Pérez-Juache T., Hernandez-Cristobal O., Reyes-López S. Y. Synthesis of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ from aluminum cans by wet-chemical methods // Results in Physics. 2018. Vol. 11. P. 1075–1079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.037>

319. Ahmedzeki N. S., Hussein S., Abdulnabi W. A. Recycling Waste Cans to Nano Gamma Alumina: Effect of the Calcination Temperature and pH // International Journal of Current Engineering and Technology. 2017, Vol.7, N 1. 8 p. URL: <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2017/01/Paper1482-88.pdf> (дата звернення: 04.12.2021).

320. Abdelrahman E. A. Synthesis of zeolite nanostructures from waste aluminum cans for efficient removal of malachite green dye from aqueous media // Journal of Molecular Liquids. 2018. Vol. 253. P. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.038>

321. Kremser K., Gerl P., Pellis A., Guebitz G. M. A new bioleaching strategy for the selective recovery of aluminum from multi-layer beverage cans // Waste Management. 2021. Vol. 120. P. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.012>

322. Prieto Martínez V., Torres Torres J., Flores Valdés A. Recycling of aluminum beverage cans for metallic foams manufacturing // Journal of Porous Materials. 2017. Vol. 24, N 3. P. 707–712. DOI: 10.1007/s10934-016-0307-8

323. Daoud A., Abou El-Khair M.T., Fairouz F., Mohamed E., Lotfy A. Effect of Processing Parameters on 7075 Al-Silica Particle Waste Composite Foams Produced with Recycled Aluminum Cans // Physics of Metals and Metallography. 2021. Article in Press. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X21130032>

324. ГОСТ 55102–2012. Ресурсорзбереження. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования, за исключением ртути содержащих устройств и приборов. Москва: Стандартинформ, 2014. 12 с.

325. Kumar S., Singh V. E-waste: generation, environmental and health impacts, recycling and status of e-waste legislations // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2019. Vol. 6, N 4. P. 592–600. URL: <https://www.researchgate.net/publication/332874565> (дата звернення: 04.12.2021).

326. Rath S. S., Nayak P., Mukherjee P. S., Chaudhury G. R., Mishra B. K. Treatment of electronic waste to recover metal values using thermal plasma coupled with acid leaching – A response surface modeling approach // Waste Management. 2012. Vol. 32, N 3. P. 575–583. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.11.001

327. Sikarwar V. S., Hrabovský M., Van Oost G., Pohořelý M., Jeremiáš M. Progress in waste utilization via thermal plasma // Progress in Energy and Combustion Science. 2020. Vol. 81. Article 100873. 34 p. DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100873

328. Wang S. B., Cheng C. M., Lan W., Zhang X. H., Liu D. P., Yang S. Z. Experimental Study of Thermal Plasma Processing Waste Circuit Boards // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 652–654. P. 1553–1561. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1553>

329. Волкова А. В. Рынок утилизации отходов (2018 год). Москва: НИУ ВШЭ. 87 с. <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260/Рынок%20утилизации%20отходов%202018.pdf>

330. Pahari A. K., Dubey B. K. Waste from Electrical and Electronics Equipment. In: *Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications*. London: Elsevier Inc., 2019. P. 443–468. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00018-2>
331. Fontana D., Forte F., Pietrantonio M., Pucciarmati S. Recent developments on recycling end-of-life flat panel displays: A comprehensive review focused on indium // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2021. Vol. 51, N 5, P. 429–456. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1729073>
332. Tan Q., Li J. Rare earth metal recovery from typical e-waste. In: *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*. 2nd ed. London: Elsevier Inc., 2019. P. 393–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102158-3.00015-X>
333. Kadam A. R., Nair G. B., Dhoble S. J. Insights into the extraction of mercury from fluorescent lamps: A Review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7, N 4. Article 103279. DOI: <https://doi.org/doi:10.1016/j.jece.2019.103279>
334. Anand A., Singh R., Sheik A. R., Ghosh M. K., Sanjay K. Leaching of Rare Earth Metals from Phosphor Coating of Waste Fluorescent Lamps // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. P. 623–634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1511-9>
335. Patil A. B., Tarik M., Struis R. P. W. J., Ludwig C. Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164, Article 105153. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105153>
336. Lecler M.-T., Zimmermann F., Silvente E., Masson A. Morèle Y., Remy A., Chollot A. Improving the work environment in the fluorescent lamp recycling sector by optimizing mercury elimination // *Waste Management*. 2018. Vol. 76. P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.037>
337. Rai V., Liu D., Xia D., Jayaraman Y., Gabriel J.-C.P. Electrochemical Approaches for the Recovery of Metals from Electronic Waste: A Critical Review. *Recycling*. 2021. Vol. 6, N. 3. Article 53. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6030053>
338. Minamata Convention on Mercury – Text and Annexes. URL: <https://www.mercuryconvention.org/en/resources/minamata-convention-mercury-text-and-annexes> (дата звернення: 27.11.2021)
339. Cenci M. P., Dal Berto F. C., Castillo B. W., Veit H. M. Precious and critical metals from wasted LED lamps: characterization and evaluation // *Environmental Technology*. 2020. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1856939>
340. Liu L., Keoleian G. A. LCA of rare earth and critical metal recovery and replacement decisions for commercial lighting waste management // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 159. Article 104846. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104846>
341. Rahman S. M. M., Kim J., Lerondel G., Bouzidi Y., Clerget L. Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, N 17. Article 4723. DOI: [10.3390/su11174723](https://doi.org/10.3390/su11174723)
342. Mizanur Rahman S. M., Kim J., Lerondel G., Bouzidi Y., Nomenyo K., Clerget L. Missing research focus in end-of-life management of light-emitting diode (LED) lamps. *Resources // Conservation and Recycling*, 2017. Vol. 127(C). P. 256–258. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.013>
343. Rahman S. M., Pompidou S., Alix T., Laratte B. A review of LED lamp recycling process from the 10 R strategy perspective // *Sustainable Production and Consumption*. 2021. Vol. 28. P. 1178–1191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.025>
344. Новые химические технологии. Сепараторы для аккумуляторных батарей. URL: https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=794 (дата звернення: 04.12.2021).

345. Zhang X., Li Li., Fan E., Xue Q., Bian Y., Wu F., Chen R. Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries // *Chemical Society Reviews*. 2018. Article 10.1039.C8CS00297E. 64 p. DOI: 10.1039/c8cs00297e
346. Steward D., Mayyas A., Mann M. Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 33. P. 272–279. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.033
347. Piątek J., Afyon S., Budnyak T.M., Budnyk S., Sipponen M.H., Slabon A. Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling // *Advanced Energy Materials*. 2020. Vol. 11, N 43. Article 2003456. 31 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202003456>
348. Fan M., Chang X., Meng Q., Wan L., Guo Y. Progress in the sustainable recycling of spent lithium-ion batteries // *SusMat*. 2021. Vol. 1, N 2. P. 241–254. DOI: <https://doi.org/10.1002/sus2.16>
349. Pinegar H., Smith Y. R. Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries. Part I: Commercial Processes // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019. Vol. 5. P. 402–416. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00235-9>
350. Bai Y., Muralidharan N., Sun Y.-K., Passerini S., Stanley Whittingham M., Belharouak I. Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of Battery Identity Global Passport // *Materials Today*. 2020. Vol. 41. P. 304–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.001>
351. Zhang S., Ding Y., Liu B., Chang C. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE // *Waste Management*. 2017. Vol. 65. P. 113–127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.003>
352. Zhang L., Li L., Rui H., Shi D., Peng X., Ji L., Song X. Lithium recovery from effluent of spent lithium battery recycling process using solvent extraction // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Article 122840. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122840>
353. Zhang W., Xu., C., He W., Li G., Huang J. A review on management of spent lithium ion batteries and strategy for resource recycling of all components from them // *Waste Management & Research*. 2018. Vol. 36, N 2. P. 99–112. DOI: 10.1177/0734242X17744655
354. Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R., Walton A., Christensen P., Heidrich O., Lambert S., Abbott A., Ryder K., Gaines L., Anderson P. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles // *Nature*. 2019. Vol. 575 (7781). P. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
355. Velázquez-Martínez O., Valio J., Santasalo-Aarnio A., Reuter M., Serna-Guerrero R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective // *Batteries*. 2019. Vol. 5, N 4. P. 68–100. DOI: 10.3390/batteries5040068
356. Xiao J., Li J., Xu Z. Recycling Metals from Lithium Ion Battery by Mechanical Separation and Vacuum Metallurgy // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 338, N 15. P. 124–131. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2017.05.024>
357. Silvestri L., Forcina A., Arcese G., Bella G. Recycling technologies of nickel- metal hydride batteries: An LCA based analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 273. Article 123083. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123083>
358. Kim H.-J., Krishna TNV, Zeb K., Rajangam V., Gopi C. V. V. M., Sambasivam S., Raghavendra K.V.G., Obaidat I.M. A Comprehensive Review of Li-Ion Battery Materials and Their Recycling Techniques // *Electronics*. 2020. Vol. 9, N 7. Article 1161. 44 p. DOI: 10.3390/electronics9071161
359. Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet. Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States. URL: <https://www.epa.gov/sites/>

default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf (дата звернення: 04.12.2021).

360. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з металовмісними побутовими відходами // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2022. № 2. С. 45–61. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2022.04>

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік скорочень	5
1. Поводження з твердими полімерними відходами	6
1.1. Загальні тенденції утворення полімерних відходів.....	6
1.2. Основні операції поводження з твердими полімерними відходами	7
1.3. Попередження виникнення полімерних відходів.....	10
1.4. Повторне використання полімерних відходів	10
1.5. Утилізування полімерних відходів	10
1.5.1. Загальні відомості про утилізування полімерних відходів.....	10
1.5.2. Підготовка до проведення фізичних методів перероблення полімерних відходів	11
1.5.3. Фізичні (фізико-механічні) методи утилізування полімерних відходів	19
1.5.4. Хімічні методи утилізування полімерних відходів	20
1.5.5. Біологічні методи утилізування полімерних відходів.....	22
1.5.6. Комбіновані методи утилізування полімерних відходів.....	23
1.6. Видаляння полімерних відходів	24
1.7. Висновки до розділу 1	25
2. Поводження з використаними ПЕТ-пляшками.....	27
2.1. Загальні тенденції утворення відходів ПЕТ-пляшок	27
2.2. Основні операції поводження з використаними ПЕТ-пляшками.....	28
2.2.1. Загальні відомості про утилізування використаних ПЕТ-пляшок.....	28
2.2.2. Повторне використання ПЕТ-пляшок.....	30
2.2.3. Використання ПЕТ-пляшок або їхніх фрагментів не за призначенням.....	30
2.2.4. Утилізування використаних ПЕТ-пляшок.....	31
2.2.5. Видаляння ПЕТ-пляшок	38
2.3. Висновки до розділу 2	39
3. Поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості	40
3.1. Загальні тенденції утворення відходів пневматичних шин.....	40
3.2. Основні операції поводження з шинами, що втратили свої споживчі властивості.....	41
3.3. Відновлення й повторне використання шин	41
3.4. Використання шин не за призначенням	43
3.5. Утилізування шин	44
3.5.1. Загальні відомості про утилізування шин.....	44
3.5.2. Підготовка шин до утилізування	44

3.5.3. Фізичні (фізико-механічні) та фізико-хімічні методи утилізування шин	50
3.5.4. Хімічні (термічні) та фізико-хімічні методи утилізування шин	53
3.5.5. Біологічні методи утилізування шин	55
3.6. Видаляння пневматичних шин	55
3.7. Висновки до розділу 3	57
4. Поводження зі скляними відходами.....	58
4.1. Загальні тенденції утворення скляних відходів.....	58
4.2. Основні операції поведження зі скляними відходами.....	59
4.3. Попередження утворення скляних відходів.....	61
4.4. Повторне використання скляних відходів	61
4.5. Переробляння скляних відходів	62
4.6. Утилізування скляних відходів	64
4.7. Видаляння скляних відходів	69
4.8. Висновки до розділу 4	70
5. Поводження з металовмісними побутовими відходами	72
5.1. Загальні тенденції утворення металовмісних відходів	72
5.2. Основні операції поведження з металевими відходами	73
5.2.1. Загальні відомості про поведження з металевими відходами.....	73
5.3.2. Алюмінієві банки з-під напоїв	76
5.3.3. Консервні банки.....	77
5.3.4. Відпрацьоване електричне та електронне обладнання	78
5.3.5. Електротехнічні джерела живлення (акумулятори й гальванічні елементи).....	80
5.3. Видаляння металовмісних відходів	84
5.4. Висновки до розділу 5	84
Загальні висновки і рекомендації	85
Перелік посилань.....	86

Наукове видання

Мікульонок Ігор Олегович

**ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕР-, СКЛО-
І МЕТАЛОВМІСНИМИ
ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ**

Монографія

В авторській редакції