Переробка сировини та ресурсозбереження

УДК 502.174:621.798.147-036.6(048.83)
DOI: 10.33070/etars.4.2021.05

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

Стан та перспективи поводження з використаними ПЕТ-пляшками

Наведено основні дані щодо обсягів виробництва пляшок з поліетилентерефталату (ПЕТ) у світі. Проаналізовано шляхи поводження з використаними ПЕТ-пляшками як одним з небезпечних видів відходів для довкілля, але перспективних з точки зору використання їхніх властивостей. Розглянуто основні методи поводження з використаними ПЕТ-пляшками, наведено критичний аналіз кожного з них. Особливу увагу приділено методам утилізації ПЕТ-пляшок, зокрема рециклінгу, який дає можливість ефективно використовувати вторинну ПЕТ-сировину безпосередньо за призначенням. Також розглянуто особливості фізичних, хімічних, біологічних та комбінованих методів перероблення, зокрема спалювання, газифікацію, піроліз, плазмове розкладання ПЕТ-пляшок, а також їх розкладання під дією мікроорганізмів. Запропоновано основні шляхи вирішення проблеми використаних ПЕТ-пляшок. *Бібл. 84, рис. 1.*

Ключові слова: тверді відходи, пляшки, поліетилентерефталат, поводження з відходами, утилізація відходів.

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 у них готового продукту, оскільки їхня маса на порядок менша, ніж скляних пляшок, та на відміну від скляної тари вони не б'ються. Полімерні пляшки зазвичай використовуються для зберігання різних рідин: води, в тому числі газованої, безалкоголь-

них та слабоалкогольних напоїв, моторних масел, рослинних олій, молочних продуктів, ліків та косметичних засобів [1–3].

Незважаючи на те, що для виготовлення полімерних пляшок використовуються різні матеріали, а саме: поліетилен високої й низької густини, поліпропілен, полівінілхлорид та полістирол — найбільшого поширення для цього набув поліетилентерефталат (ПЕТ, ПЕТФ), який нале-

жить до групи аліфатичних-ароматичних поліефірів.

Серед поліефірів ПЕТ є найбільш розповсюдженим полімером, щорічний випуск його сягає майже 70 млн т [4]. Частка ПЕТ у світовому обсязі виробництва полімерів становить 8 % (станом на 2017 р.), при цьому 30 % загального обсягу синтезованого ПЕТ витрачається на виготовлення пляшок [5, 6].

ПЕТ характеризується високими фізико-механічними властивостями та низькою гігроскопічністю в широкому діапазоні температур (від мінус 40 до плюс 60 °С). Він має високу хімічну стійкість до впливу кислот, лугів, солей, спиртів, парафінів, мінеральних масел, бензину, жирів та ефірів. Проте ПЕТ має істотний недолік — відносно низькі бар'єрні властивості, адже він пропускає ультрафіолетові промені й кисень всередину ПЕТ-пляшки та вуглекислоту назовні, що погіршує якість та скорочує термін зберігання рідкої продукції [7–9].

З огляду на свою популярність у споживачів полімерні пляшки одночасно спричинюють і проблему поводження з ними після їх використання [10]. Так, у 2016 р. щосекунди у світі виготовляли 20 тис. 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 у 2021 р. кількість виготовлених ПЕТ-пляшок досягне 583,3 млрд, а у 2004 р. 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 т полімерних відходів, значну частку яких становлять ПЕТ-пляшки. За прогнозами, до 2050 р. маса полімерних матеріалів в океані перевищить масу риби, що мешкає в ньому [11, 12].

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 у 2018 р. 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 [5].

Наприкінці 2018 р. загальна маса первинних полімерних відходів досягла 6900 млн т, з яких 800 млн т припадає на ПЕТ [5]. Крім того, у 2016 р. 87,4 % бутильованої води в Європі було

продано у ПЕТ-пляшках [13]. Саме тому раціональне поводження з використаними ПЕТ-пляшками є одним з нагальних питань поводження з твердими відходами споживання в цілому [14, 15].

Мета досліджень

Мета роботи полягає у критичному аналізі стану й перспектив поводження з використаними ПЕТ-пляшками як одним з найбільш розповсюджених видів твердих полімерних відходів.

Основні операції поводження з використаними ПЕТ-пляшками

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, знешкоджування та захоронювання [16].

Основна частка ПЕТ-сировини, призначеної для подальшого перероблення, — це збирання власне використаних та 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 розрізненим збором у місцях утворення [17].

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.1). Напевно, саме з огляду на значну частку ПЕТ-пляшок у загальній масі полімерних відходів споживання поліетилентерефталату надано код перероблення полімеру під номером один [10].

Для відокремлення ПЕТ-пляшок від решти відходів зазвичай застосовують ручне розділяння суміші твердих відходів, яке ґрунтується на різ-

Рис. 1. Код перероблення поліетилентерефталату.

Fig. 1. Polyethyleneterephthalate Recycling code.

ниці зовнішніх ознак розділюваних матеріалів [18]. Розроблено також метод сортування відходів, що рухаються на конвеєрній стрічці, який ґрунтується на поляризаційному аналізі; при цьому точність ідентифікації ПЕТ-пляшок становить 92,06 % [19].

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 пакувальних пресах (тюки для фіксації розмірів та 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 використані властивості поліетилентерефталату. Утилізують ПЕТ-пляшки для отримання з них тих чи інших матеріалів, а також енергії за допомогою їх економично обґрунтованого, безпечного для здоров'я людей перероблення чи прямого використання або спалювання. Утилізація ПЕТ-пляшок спрямована на повну або часткову заміну традиційних сировини, матеріалів та палива відходами.

ПЕТ-пляшки, які не можуть бути піддані переробленню або утилізуванню, піддають видаленню, тобто операціям, що не призводять до їх-

ньої утилізації. Видалення ПЕТ-пляшок спрямоване передусім на їх захоронення.

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 об'ємом 500 мл дає можливість заощадити близько 1 МДж порівняно з її переробленням. При цьому буде заощаджено 74 % енергії, а викиди CO₂ зменшено на 182 % [20].

Використання ПЕТ-пляшок або їхніх фрагментів не за призначенням

Використані ПЕТ-пляшки або їхні частини (зокрема нижні частини стінки з дном) часто застосовують у приватних домогосподарствах для вирощування розсади або облаштування крапельного поливу рослин, як мініпарники, вертикальні грядки для рослин, огорожі, пастки для комах, присадібні доріжки, годівниці для птахів тощо [21].

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 [22]. Показано, що пропонований 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 у них як з точки зору міцності житла, так і рівня температури й вологості в його приміщеннях [23].

Подрібнені фрагменти ПЕТ-пляшок застосовують як ефективну дешеву насадку біофільтрів для очищення побутових стічних вод [24].

Використані ПЕТ-пляшки запропоновано застосовувати як портативний фільтр на основі нанокмполімеру магнетит-вуглець для отримання питної води із води, забрудненої різноманітними

неорганічними та органічними сполуками й речовинами [25]. Таке технічне рішення дуже актуальне для місцевостей з дефіцитом питної води.

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

Утилізування відходів

Як і будь-які полімерні відходи, використані ПЕТ-пляшки піддаються утилізації за трьома напрямками [10]: матеріальний (полімерно-сировинний), сировинний та енергетичний, або за чотирма групами методів: використання для виготовлення аналогічної продукції (тобто як первинної полімерної сировини); використання для виготовлення іншої продукції, зазвичай зі зниженими експлуатаційними властивостями (тобто як вторинної полімерної сировини; рециклінг); перероблення на хімічну сировину; спалювання для одержання здебільшого теплової енергії.

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 [10].

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) [26]. Ця лінія мало чим відрізняється від типової технологічної лінії виробництва грануляту з термопластичних полімерів [10, 27].

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 та кількісного складів 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 або вологе);
- видалення сторонніх полімерів низької густини;
- гаряча мийка з поверхнево-активними речовинами;
- промивання подрібнених та 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 у ПЕТ-відходах, як полівінілхлорид, поліолефіни, поліактид, полівінілацетат, 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 них належать бруд, сторонні включення, пляшки нестандартних кольорів та з інших полімерів, кришки, етикетки, залишки рідини тощо. Частина з них, зокрема пляшки нестандартних кольорів і з інших полімерів, кришки та етикетки, можуть бути також перероблені [17].

Однією зі стадій підготовки до повторного перероблення ПЕТ-пляшок за фізико-механічними методами є відокремлення від них етикеток [28]. Нескладна на перший погляд операція насправді спричинює певні труднощі, оскільки потрібно не лише ідентифікувати наявність етикетки на пляш-

ці, а й ефективно її відділити, адже різними виробниками застосовуються різні методи фіксації етикеток на ПЕТ-пляшках.

Фізичні (фізико-механічні) методи утилізування відходів

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

Найбільш поширеними фізичними методами утилізування полімерних відходів є їх екструзія, лиття під тиском, пресування, а також деякі інші методи формування [8, 9, 29–31].

Наприклад, у Російській Федерації функціонують підприємства, 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 у металургії, машинобудуванні, будівництві та деревообробній промисловості) [32].

Виробництво поліестерової стреп-стрічки (інша назва — стрепінг-стрічка) у Росії складає близько 1200 т/рік, при цьому її міцність становить 450–600 МПа, вона має високі еластичність та відносне подовження, широкий температурний діапазон експлуатації (від мінус 30 до плюс 90 °C), вчетверо меншу, ніж у сталі, густину, не кородує й повністю піддається переробленню, а також характеризується безпечністю у поводженні з нею.

Достатньо цікавими можуть бути результати дослідження щодо емісії парникових газів та споживання води для виробників пляшок з первинного, вторинного та біорозкладуваного ПЕТ [33]. Однозначного висновку щодо ефективності використання вторинного й біорозкладуваного ПЕТ для виробництва ПЕТ-пляшок зробити не можна, адже незважаючи на зниження в цьому разі емісії парникових газів (до 82 й 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 та яєць.

До чисто механічного методу перероблення ПЕТ-пляшок можна віднести пропозицію, яка

полягає у нарізанні з циліндричної частини стінки пляшок стренги (нитки), використовуваної для перероблення у 3D-принтері [34]. 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 із 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 [35].

Відомо, що фізико-механічне перероблення вторинного ПЕТ, зокрема екструзією, спричинює певне погіршення експлуатаційних властивостей екструдату [28, 36, 37]. Тому для забезпечення фізико-механічних властивостей продукції, одержуваної екструзією, вторинний ПЕТ запропоновано додавати до первинного у масовому співвідношенні 30 : 70 [38, 39].

Дуже поширене є перероблення вторинного ПЕТ на волокно для використання у текстильній промисловості [40]. 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, бавовняними [41]. 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 чохла для автомобільних сидінь. Ґрунтовні дослідження підтвердили високі фізико-механічні властивості виготовлених чохла [42].

Розроблено технологію перетворення використаних ПЕТ-пляшок на полімерну стрічку або стренгу для їх застосування у виробництві різноманітної продукції: плетених меблів та господарських сумок, покрівельних матеріалів, біжутерії, ворсу для щіток тощо [43].

Досліджено можливість перероблення ПЕТ-пляшок на ефективні ультрафільтраційні мембрани для розділення різних рідких сумішей, одним з компонентів яких є вода [44].

Крім перетворення вторинної ПЕТ-сировини

на нову полімерну продукцію, зазначену сировину можна використовувати разом з іншими компонентами для одержання композиційних матеріалів з потрібними властивостями [45, 46].

Одним зі споживачів вторинного ПЕТ є будівництво. Вторинний гранульований ПЕТ у кількості до 5 % використовують замість кварцового піску у складі самоущільнюваного бетону [47].

Показано, що часткова заміна у 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 [48]. При цьому додавання до бетону фрагментів ПЕТ-пляшок у кількості до 1 % (за мас.) майже не впливає на міцність та пористість бетону, проте дає можливість частково утилізувати ПЕТ-відходи [49].

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 %, модуль пружності під час розтягу — на 16,9–21,5 % [50].

Армування цементного будівельного розчину ПЕТ-пластівцями, одержаними в результаті подрібнення за допомогою шредера ПЕТ-пляшок (масове співвідношення у розчині «кварцовий пісок — ПЕТ-пластівці» становить 3 : 1), забезпечує його міцність до 30 МПа впродовж 3 год, що становить 90 % від нормованого значення, якого він набуває за 7 діб [51].

Для підвищення адгезії між бетонною матрицею та армувальними ПЕТ-волокнами їхню поверхню обробляють гідроксидом натрію з наступним нанесенням силанового агенту (сполук кремнію з воднем) [52].

Додавання до асфальтобетону від 2 до 4 % (за мас.) ПЕТ-крихти, одержаної в результаті подрібнення ПЕТ-пляшок, підвищує експлуатаційні властивості дорожнього покриття [53].

Фрагменти ПЕТ-пляшок додають у бутадієн-стирольний каучук для застосування одержаного матеріалу в дорожньому будівництві, зокрема для улаштування «поліцейських, що лежать» [54].

У Китаї відпрацьовано технологію одержання ковдр, на 100 % виготовлених з перероблених ПЕТ-пляшок [55].

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) [56].

Розроблено інноваційну технологію одержання продукції з композиції двох не розчинних 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 [31, 57], одержувана композиція гранулюється, після чого одержані гранули переробляються екструзією, литтям під тиском або пресуванням [30, 58]. 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 та теплофізичних властивостей перероблюваних композиційних матеріалів [59, 60].

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

Хімічні методи утилізування відходів

Під час реалізації хімічних методів змінюються фізичні властивості та 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 [61–64].

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

кристалізацією дає можливість позбутися небажаних домішок з одержуваних мономерів, потрібних для наступної полімеризації [65].

Розроблено метод хімічної деполімеризації ПЕТ-пляшок з перетворенням полімеру на етиленгліколь та терефталеву кислоту [66]. 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 та 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 у роботах [67–70], при цьому вихід терефталевої кислоти в результаті деполімеризації ПЕТ впродовж 25 хв становить 92 % (за мас.) [69].

Хімічним переробленням використаних ПЕТ-пляшок одержують високоякісні алкідні смоли, які застосовують як плівкоутворювальну основу (лаки) для емалевих фарб [71]. Також розроблено технології виробництва фарб на основі епоксидної смоли, одержаної у результаті гліколізу ПЕТ-пляшок [72], та акрилових фарб [73].

Запропоновано процес одержання вуглецевих наноструктурних матеріалів, зокрема фулеренів та вуглецевих нанотрубок, термічним розкладанням ПЕТ-пляшок [74]. Основна перевага зазначеного процесу — достатньо просте одержання вуглецевих наноматеріалів з відходів ПЕТ без використання розчинників. У такий спосіб можна одержувати функціоналізовані магнітні фулери й застосовувати їх як сорбційний матеріал, який характеризується високою селективністю та адсорбційною здатністю, а також може бути застосований для видалення антибіотиків із забруднених ними середовищ [75].

Іншими хімічними методами утилізування ПЕТ-пляшок є спалювання, газифікація, піроліз та плазмохімічні технології, в результаті проведення яких одержують різноманітні хімічні сполуки [10].

Спалювання є одним з найбільш поширених та ефективних методів утилізування ПЕТ-пляшок, непридатних для перероблення через значну забрудненість 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-підне паливо [10].

Досліджено фізико-хімічні властивості вимитих використаних ПЕТ-пляшок як палива для одержання теплової енергії [76]. Показано, що теплотворна здатність зазначених відходів становить 13,2 МДж/кг, приблизно половину від теплотворної 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 [77]) 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 суміші) ПЕТ перетворюється на горючі гази. Також утворюються рідка й тверда фази, зокрема гудрон та напівкокс, які також можуть бути використані як паливо. Показано, що найбільший вихід синтез-газу (виходячи зі співвідношення $\text{H}_2 : \text{CO}$) досягається за температури 800 °С [78].

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

Рідше ПЕТ-пляшки піддають плазмохімічним технологіям, тобто процесу їх термічного розкладання у низькотемпературній плазмі (за температури понад 1000 °С) у присутності кисню, повітря, водяної пари, діоксиду вуглецю [10].

Біологічні методи утилізування відходів

Під час реалізації біохімічних методів утилізування відходів відбуваються їх хімічні перетворення за участю мікроорганізмів, рідше грибів й водоростей.

У 2020 р. французькими вченими було відкрито високоефективний оптимізований фермент, який перевершує усі ПЕТ-гідролази, забезпечуючи за 10 год щонайменше 90 %-у деполімеризацію ПЕТ, перетворюючи його на мономер [4].

На процес біологічного розкладання ПЕТ впливають характеристики полімеру та 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 умови проходження процесу, а саме: температура й вологість [79].

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 6 тижнів [80].

Комбіновані методи утилізування відходів

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

Окремі полімерні відходи, у тому числі й несортовані, 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 [10].

Видаляння відходів

Методи видаляння ПЕТ-відходів, як і полімерних відходів у цілому, можна поділити на дві основні групи [10]: 1) спалювання, яке полягає у здійсненні технологічних заходів, що призводять до окиснювання органічних речовин спалюванням для перетворення відходів у безпечнішу форму й відвернення їх накопичування та отримання енергії; спалювання супроводжується виділенням теплової енергії, яка безповоротно втрачається й не використовується; 2) захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення у спеціально відведених місцях чи на об'єктах таким чином, щоб довгостроковий шкідливий вплив відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини не перевищував установлених нормативів.

На превеликий жаль, найдешевшим та найбільш розповсюдженим натеper способом поводження з відходами є їх захоронення на відкритих полігонах та сміттєзвалищах, а також у підземних могильниках. Проте наявність полігонів та звалищ, а також відсутність контролю за ними призводять до скорочення земель сільськогосподарського призначення, забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження шкідливих комах та гризунів тощо. Підземне захоронення відходів є більш раціональним, проте воно також не виключає забруднення ґрунтових вод. Станом на 2019 р. в Україні створено 6000 офіційних сміттєзвалищ та полігонів загальною площею майже 9000 га, понад 99 % яких не відповідають європейським вимогам [81].

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 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 у серпні 2019 р. 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) [82].

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 грудня 2025 р. лише 55 % (за мас.) полімерної упаковки, а не пізніше 31 грудня 2030 р. — 65 % [83]. Директивою 2019/904/ЄС Європейського Парламенту і Ради про скорочення впливу деяких пластикових продуктів на оточуюче середовище від

5 червня 2019 р. передбачено, що з 2025 р. у країнах Європейського Союзу ПЕТ-пляшки міститимуть не менше 25 % переробленого полімеру, а з 2030 р. цей показник має бути не менше 30 % [84].

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

Висновки

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

Переймаючись актуальністю порушеної проблеми, більшість високорозвинених країн намагається 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.

Список літератури

1. 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.
2. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2005. 179 с.
3. 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>
4. Tournier V., Topham C. M., Gilles A., David B., Folgoas C., Moya-Leclair E., Kamionka I. E., Desrousseaux M.-L., Texier H., Gavalda S., Cot M., Guymard E., Dalibey M., Nomme J., Cioci G., Barbe S., Chateau M., Andriy I., Duquesne S., Marty A. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7802, P. 216–219. doi: 10.1038/s41586-020-2149-4
5. Plastic waste and recycling. Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions / Ed. T. M. Letcher. London: Elsevier Inc. 2020. 686 p. — https://www.researchgate.net/profile/Mohanraj-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf (Accessed June 13, 2021)
6. 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
7. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. Санкт-Петербург : Профессия, 2005. 248 с. — URL: <http://www.professija.ru/pdf/tehsvois.pdf>
8. Мікульонюк І.О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
9. Мікульонюк І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
10. Мікульонюк І.О. Стан і перспективи поводження з твердими полімерними відходами. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 2. С. 52–73. doi: 10.33070/etars.2.2021.05.
11. 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> (Accessed June 13, 2021).
12. 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/> (Accessed June 13, 2021).
13. 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 (Accessed June 13, 2021).
14. 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.
15. 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. — <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01084-7>
16. ДСТУ 4462.0.01:2005. Охорона природи. Поводження з відходами. Терміни та визначення понять. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 15 с.
17. ГалПЕТ: Переробка відходів ПЕТ. — URL: http://www.galpet.com.ua/?page_id=3
18. 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>
19. 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.

20. 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.

21. 15 идей, как можно использовать пластиковые бутылки на даче. — URL: <https://www.ogorod.ru/ru/main/inspiration/15033/15-idey-kak-mozhno-ispolzovat-plastikovyye-butylki-na-dache.htm> (Accessed June 13, 2021).

22. Sharma H. Innovative and Sustainable Application of PET Bottle a Green Construction. Overview. *Indian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 10, № 16. 7 p. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i16/114307.

23. Ceja Soto F.R., Pířez Bueno J. de J., Mendoza Lipez M.L., Pířez Ramos M.E., Reyes Araiza J.L., Ramnřez Jimřnez R., Manzano-Ramnřez 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, № 3. P. 30–45. doi: 10.3390/recycling4030030.

24. 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. — <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.066>

25. 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, № 3. P. 31–41. doi: 10.3390/recycling3030031.

26. 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. № 4. P. 99–108. doi: 10.21307/ACEE-2019-055.

27. Mikulionok I.O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011. Vol. 83, № 6. P. 1105–1113. doi: 10.1134/S1070427211060371.

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

29. 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>

30. Mikulionok I.O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, № 1–2. P. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6.

31. Mikulyonok I.O. Equipment for preparing and

continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, № 11–12. P. 658–661. doi: 10.1007/s10556-013-9676-x.

32. ИТС 15-2016. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов). Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М. : Бюро НДТ, 2016. 198 с.

33. 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, № 8. P. 9725–9733. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b00750.

34. 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, № 10. P. 1386–1392. doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.

35. 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, № 19. Article 4273. 22 p. doi: 10.3390/ma13194273.

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

37. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. 184 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062>

38. Eriksen M.K., Christiansen J.D., Daugaard 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.

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

40. 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.

41. Sarioğlu 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, № 2. P. 176–180. doi: 10.21533/pen.v5i2.110.

42. 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, № 6. P. 992–1008. doi: 10.1177/

1528083717750887.

43. 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.

44. 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.

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

46. Микулёнок И.О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей. *Пластические массы*. 2012. № 9. С. 29–38.

47. 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. — <https://doi.org/10.1063/1.5022928>

48. 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.

49. 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 // *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*; J. F. Martirena-Hernandez, A. Alujas-Dhaz, M. Amador-Hernandez (Eds.). Cham: Springer. 2019. P. 251–263. — https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_29

50. 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. — <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.035>

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. Ronkay F., Molnar B., Gere D., Czigan 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.

57. 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. — <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.001>

58. Mikulionok I.O. Screw extruder mixing and dispersing units. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, № 1–2. P. 103–109. doi: 10.1007/s10556-013-9711-y.

59. Микулёнок И.О. Определение реологических свойств термопластичных композиционных материалов. *Пластические массы*. 2011. № 7. С. 26–30.

60. Mikulenok I.O. Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials. *International Polymer Science and Technology*. 2013. Vol. 40, № 9. P. 23–28. — <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>

61. Shojaei B., Abtahi M., Najafi M. Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability. *Polymers for Advanced Technologies*. 2020. Vol. 31, № 12. P. 2912–2938. — <https://doi.org/10.1002/pat.5023>

62. Thiounn T., Smith R.C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58, № 10. P. 1347–1364. doi: 10.1002/pol.20190261.

63. 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, № 29. P. 1052–1064. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.019.

64. Rahimi A., Garcha J.M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*. 2017. Vol. 1, № 6. Article 0046. 11 p. doi: 10.1038/s41570-017-0046.

65. Pudack C., Stepanski M., Fässler P. PET Recycling — Contributions of Crystallization to Sustainability. *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. Vol. 92, № 4. P.

452–458. doi: 10.1002/cite.201900085.

66. Igdäler 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, № 16. P. 5376–5394. doi: 10.1039/d0gc00894j.

67. 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, № 1. P. 78–86. — <https://doi.org/10.3390/ecsoc-23-06650>

68. 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, № 3. P. 543–549. doi: 10.1007/s11771-018-3759-y.

69. 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, № 8. P. 5804–5809. doi: 10.1166/jnn.2018.15363.

70. 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. — <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100079>

71. 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, № 76. P. 62273–62283. doi: 10.1039/c5ra11777a.

72. Bal K., Їнль К. С., Асар І., Гьзль Г. Ероху-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, № 3. P. 747–753. doi: 10.1007/s11998-016-9895-0.

73. 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, № 1. Article 040019. 7 p. — <https://doi.org/10.1063/5.0007730>

74. 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, № 3. P. 358–370. doi: 10.1080/10962247.2016.1242517.

75. 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.

76. Jabłońska B., Kiełbasa P., Korenko M., Dryżdz T. Physical and Chemical Properties of Waste from PET Bottles Washing as A Component of Solid Fuels. *Energies*. 2019. Vol. 12, № 11. Article 2197. 17 p. doi: 10.3390/en12112197.

77. 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: 10.33070/etars.3.2021.06

78. 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>

79. Koshti R., Mehta L., Samarth N. Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review. *Journal of Polymers and the Environment*. 2018. Vol. 26, № 8. P. 3520–3529. doi: 10.1007/s10924-018-1214-7.

80. 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, № 6278. P. 1196–1199. doi: 10.1126/science.aad6359.

81. Міністерство розвитку громад та територій України: Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік. — URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diialnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> (Accessed June 13, 2021)

82. Що робити з використаними пляшками з ПЕТФ для напоїв? *Упаковка*. 2020. № 5. С. 42–43.

83. 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

84. Директива № 2019/904/ЕС Европейского Парламента и Совета от 5 июня 2019 г. о сокращении влияния некоторых пластиковых продуктов на окружающую среду. — URL: <http://ecoportus.ru/node/968>

Надійшла до редакції 04.07.2021

Микулёнок И.О., докт. техн. наук, проф.,
ORCID: 0000-0001-8268-7229

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

Состояние и перспективы обращения с использованными ПЭТ-бутылками

Приведены основные данные по объёмам производства бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТ) в мире. Проанализированы основные пути обращения с использованными ПЭТ-бутылками как одним из опасных видов отходов для окружающей среды, но перспективных с точки зрения использования их свойств. Рассмотрены основные методы обращения с использованными ПЭТ-бутылками, приведен критический анализ каждого из них. Особое внимание уделено методам утилизации ПЭТ-бутылок, в частности, рециклингу, позволяющему эффективно использовать вторичное ПЭТ-сырьё непосредственно по назначению. Также рассмотрены особенности физических, химических, биологических и комбинированных методов переработки, в частности, сжигания, газификации, пиролиза, плазменного разложения ПЭТ-бутылок, а также их разложения под действием микроорганизмов. Предложены основные пути решения проблемы использованных ПЭТ-бутылок. *Библ. 84, рис. 1.*

Ключевые слова: твёрдые отходы, бутылки, полиэтилентерефталат, обращение с отходами, утилизация отходов.

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

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: i.mikulionok@kpi.ua

A State of Art and Prospects of Handling Used PET Bottles

The main data on the production volume of bottles from polyethylene terephthalate (PET) in the world are presented. The main ways of handling used PET bottles as one of the hazardous types of waste for the environment, but promising from the point of view of using their properties, are analyzed. The main methods of handling used PET bottles are considered and a critical analysis of each of them is given. Particular attention is paid to the methods of recycling PET bottles, which made it possible to efficiently use recycled PET raw materials directly for their intended purpose. The features of physical, chemical, biological and combined processing methods are also considered, in particular, combustion, gasification, pyrolysis, plasma decomposition of PET bottles, as well as their decomposition under the influence of microorganisms. The main ways of solving the problem of used PET bottles are proposed. *Bibl. 84, Fig. 1.*

Keywords: solid waste, bottles, polyethylene terephthalate, waste management, recycling waste.

References

1. Kostiuk V.S., Sokolenko A.I., Vasylykivskyi K.V., Kostiuk Ye.V., Piddubnyi V.A. (2013). Fizyko-khimichni vlastyivosti pakovalnykh materialiv. [Physico-chemical properties of packaging materials]. Kyiv : Kondor-Vydavnytstvo. 402 p. (Ukr.)
2. Mikulionok I.O., Radchenko L.B. (2005). Polimerni kompozytni materialy y vyroby z nykh. Oderzhannia, pereroblennia ta vlastyivosti. [Polymer composite materials and products from them. Obtaining, processing and properties]. Kyiv : IVTs «Vydavnytstvo "Politehnika"». 179 p. (Ukr.)
3. Mikulionok I.O., Sokolskyi O.L. (2015). Polimerni materialy i vyroby z nykh (oderzhannia, pereroblennia, vlastyivosti). [Polymer materials and products from them (obtaining, processing and properties)]. Kyiv : NTUU «KPI». 208 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632> (Ukr.)
4. Tournier V., Topham C. M., Gilles A., David B., Folgoas C., Moya-Leclair E., Kamionka I.E., Desrousseaux M.-L., Texier H., Gavalda S., Cot M., Guimard E., Dalibey M., Nomme J., Cioci G., Barbe S., Chateau M., Andrii I., Duquesne S., Marty A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580 (7802), pp. 216–219. doi: 10.1038/s41586-020-2149-4
5. 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/Moharaj-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf (Accessed June 13, 2021)
6. Ji L.-n. (2013). Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET). *Applied Mechanics and Materials*, 312, pp. 406–410. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.312.406
7. Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V. (2005). Tekhnicheskiye svoystva polimernykh materialov. [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Peterburg : Professiya. 248 p. — URL: <http://www.professija.ru/pdf/tehsvois.pdf> (Rus.)
8. Mikulionok I.O. (2015). Tekhnologichni osnovy pereroblennia polimeriv, plastmas i gumovykh sumishei. [Technological bases of processing of polymers, plastics and rubber mixtures]. Kyiv : NTUU «KPI». 312 p. (Ukr.)
9. Mikulionok I.O. (2020). Tekhnologichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv. [Technological bases of processing of polymeric materials]. Kyiv : KPI im. Igora Sikorskoho. 292 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (Ukr.)
10. Mikulionok I.O. (2021). Stan i perspektyvy povodzhennia z tverdymy polimernymy vidkhodamy. [A state of art and prospects of plastic solid waste management]. *Energotekhnologii ta resursozberezhennia*, No. 2, pp. 52–73. doi: 10.33070/etars.2.2021.05 (Ukr.)
11. 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> (Accessed June 13, 2021).
12. 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/> (Accessed June 13, 2021).
13. 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 (Accessed June 13, 2021).
14. Vollmer I., Jenks M.J.F., Roelands M.C.P., White R.J., Harmelen van T., de Wild P., Laan van der G.P., Meirer F., Keurentjes J.T.F., Weckhuysen B.M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59, pp. 15402–15423. doi:10.1002/anie.201915651.
15. 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. — <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01084-7>
16. DSTU 4462.0.01:2005. Okhorona pryrody. Povodzhennia z vidkhodamy. Terminy ta vyznachennia poniat. [Environment protection. Wastes management (handling). Terms and concepts definitions]. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukrainy, 2007. 15 p. (Ukr.)
17. GalPET: Pererobka vidkhodiv PET. [GalPET: Recycling of PET waste]. — URL: http://www.galpet.com.ua/?page_id=3 (Accessed June 13, 2021).
18. Mikulionok I.O. (2014). Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsessy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii. [Mechanical, Hydromechanical, and Mass-Exchange Processes and Equipment in Chemical Engineering]. Kyiv : NTUU «KPI», 340 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>. (Ukr.)
19. Tan Z., Fei Z., Zhao B., Yang J., Xu X., Wang Z. (2021). Identification for Recycling Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Bottles by Polarization Vision. *IEEE Access*, 9, pp. 27510–27617. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050816.
20. Hamade R., Hadchiti R., Ammouri A. (2020). Making the Environmental Case for Reusable PET Bottles. *Procedia Manufacturing*, 43, pp. 201–207. doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.137.
21. 15 idey, kak mozno ispolzovat plastikovyye butylki na dache. [15 ideas on how to use plastic bottles in the country]. — URL: <https://www.ogorod.ru/ru/main/inspiration/15033/15-idey-kak-mozno-ispolzovat-plastikovyye-butylki-na-dache.htm> (Accessed June 13, 2021).

22. Sharma H. (2017). Innovative and Sustainable Application of PET Bottle a Green Construction. Overview. *Indian Journal of Science and Technology*, 10 (16). 7 p. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i16/114307.
23. Ceja Soto F. R., Páirez Bueno J. de J., Mendoza Lypez M. L., Páirez Ramos M. E., Reyes Araiza J. L., Ramáñez Jiménez R., Manzano-Ramírez A. (2019). Sustainability Metrics for Housing and the Thermal Performance Evaluation of a Low-Cost Prototype Made with Poly (Ethylene Terephthalate) Bottles. *Recycling*, 4 (3), pp. 30–45. doi: 10.3390/recycling4030030.
24. 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. (2021). Exploring shredded waste PET bottles as a biofilter media for improved on-site sanitation. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, pp. 370–381. — <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.066>
25. Gaita E., Evangelisti C., Panzarasa G. (2018). A Proof-of-Concept Portable Water Purification Device Obtained from PET Bottles and a Magnetite-Carbon Nanocomposite. *Recycling*, 3 (3), pp. 31–41. doi: 10.3390/recycling3030031.
26. Gubanova E., Kupinets L., Deforzh H., Koval V., Gaska K. (2019). Recycling of polymer waste in the context of developing circular economy. *Architecture Civil Engineering Environment*, No. 4, pp. 99–108. doi: 10.21307/ACEE-2019-055.
27. Mikulionok I.O. (2011). Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 83 (6), pp. 1105–1113. doi: 10.1134/S1070427211060371.
28. Кьпперс B., Chen X., Seidler I., Friedrich K., Raulf K., Pretz T., Feil A., Pomberger R., Vollprecht D. (2019). Influences and consequences of mechanical delabelling on pet recycling. *Detritus*, 6, pp. 39–46. — <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13816>
29. Mikulionok I.O. (2009). Oblasnannia i protsessy pererobky termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny. [Processes and the equipment of processing of thermoplastics with use of secondary raw materials]. Kyiv : NTUU «KPI». 264 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259> (Ukr.)
30. Mikulionok I.O. (2015). Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (1–2), pp. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6.
31. Mikulyonok I.O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, 48 (11–12), pp. 658–661. doi: 10.1007/s10556-013-9676-x.
32. ITS 15-2016. Utilizatsiya i obezvrezhivaniye ot-khodov (krome obezvrezhivaniya termicheskimi sposobom (szhiganiye otkhodov). Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. [Recycling and disposal of waste (except for thermal treatment (waste incineration). Information and technical guide to the best available technologies]. Moscow : Biuro NDT, 2016. 198 p. (Rus.)
33. Benavides P.T., Dunn J.B., Han J., Biddy M., Markham J. (2018). Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6 (8), pp. 9725–9733. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b00750.
34. Tylman I., Dzierżek K. (2020). Filament for a 3D Printer from Pet Bottles – Simple Machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9 (10), pp. 1386–1392. doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.
35. Little H.A., Tanikella N.G., Reich M.J., Fiedler M.J., Snabes S.L., Pearce J.M. (2020). Towards Distributed Recycling with Additive Manufacturing of PET Flake Feedstocks. *Materials*, 13 (19), Article 4273, 22 p. doi: 10.3390/ma13194273.
36. Ragaert K., Delva L., Geemb van K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, pp. 24–58. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
37. Mikulionok I.O., Radchenko L.B. (2006). Pererobka vtorynnoi syrovyny ekstruziiei. [Processing of secondary raw materials by extrusion]. Kyiv : NTUU «KPI», 184 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062> (Ukr.)
38. Eriksen M.K., Christiansen J.D., Dugaard A.E., Astrup T.F. (2019). Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Management*, 96, pp. 75–85. doi: 10.1016/j.wasman.2019.07.005.
39. Schyns Z.O.G., Shaver M.P. (2020). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, Article 2000415. 27 p. — <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
40. Majumdar A., Shukla S., Singh A.A., Arora S. (2020). Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, Article 104915, 10 p. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104915.
41. Sarioğlu E. (2017). Ecological Approaches in Textile Sector: The Effect of r-PET Blend Ratio on Ring Spun Yarn Tenacity. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 5 (2), pp. 176–180. doi: 10.21533/pen.v5i2.110.
42. Albini G., Brunella V., Placenza B., Martorana B., Guido Lambertini V. (2018). Comparative study of mechanical characteristics of recycled PET fibres for automobile seat cover application. *Journal of Industrial Textiles*, 48 (6), pp. 992–1008. doi: 10.1177/1528083717750887.
43. Duong V., Ahmed A., Farook O. (2018). A Model Template Green Environment Initiative for Recycling Plastic Bottles with Progressive Entrepreneurship Partnership. *Portland International Conference on*

Management of Engineering and Technology (PIC-MET), 5 p. doi: 10.23919/PICMET.2018.8481786.

44. Kusumocahyo S. P., Ambani S. K., Kusumadewi S., Sutanto H., Widiputri D. I., Kartawiria I. S. (2020). Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, Article 104381, 11 p. doi: 10.1016/j.jece.2020.104381.

45. Mikulionok I.O. (2005). Termoplastychni kompozytni materialy ta yikh napovniuvachi. Klasifikatsiia ta zagalni vedomosti. [Thermoplastic composite materials and their fillers. Classification and general information]. *Himichna promyslovisť Ukrainy*, No. 5, pp. 30–39. (Ukr.)

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

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

48. Jassim A.K. (2017). Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. *Procedia Manufacturing*, 8, pp. 635–642. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.081.

49. Ricardo J.R.C. (2019). 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, pp. 251–263. — https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_29

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

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

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

53. Aghayan I., Khafajeh R. (2019). 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. pp. 269–285. doi: 10.1016/b978-0-08-102676-2.00012-8.

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

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

56. Ronkay F., Molnar B., Gere D., Czigan T. (2021). Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies. *Waste Management*, 119, pp. 101–110. doi: 10.1016/j.wasman.2020.09.029.

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

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

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

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

61. Shojaei B., Abtahi M., Najafi M. (2020). Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability. *Polymers for Advanced Technologies*, 31 (12), pp. 2912–2938. — <https://doi.org/10.1002/pat.5023>

62. Thiounn T., Smith R.C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58 (10), pp. 1347–1364. doi: 10.1002/pol.20190261.

63. Raheem A.B., Noor Z.Z., Hassan A., Abd Hamid M.K., Samsudin S.A., Sabeen A.H. (2019). Current Developments in Chemical Recycling of Post-Consumer Polyethylene Terephthalate Wastes for New Materials Production: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 225 (29), pp. 1052–1064. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.019.

64. Rahimi A., Garsna J.M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1 (6), Article 0046, 11 p. doi: 10.1038/s41570-017-0046.

65. Pudack C., Stepanski M., Füssler P. (2020). PET Recycling — Contributions of Crystallization to Sustainability. *Chemie Ingenieur Technik*, 92 (4), pp. 452–458. doi: 10.1002/cite.201900085.

66. Igdöbler S., Van Geem K.M., Denolf R., Roosen M., Mys N., Ragaert K., De Meester S. (2020). Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis. *Green chemistry*, 22 (16), pp. 5376–5394. doi: 10.1039/d0gc00894j.
67. Cavalcante S., Vieira D., Melo I. (2019). Chemical Recycling: Comparative Study about the Depolymerization of PET Waste-Bottles to Obtain Terephthalic Acid. *Proceedings*. 41 (1), pp. 78–86. — <https://doi.org/10.3390/ecsoc-23-06650>
68. Sun C., Chen X., Zhuo Q., Zhou T. (2018). Recycling and depolymerization of waste polyethylene terephthalate bottles by alcohol alkali hydrolysis. *Journal of Central South University*, 25 (3), pp. 543–549. doi: 10.1007/s11771-018-3759-y.
69. Singh S., Sharma S., Umar A., Mehta S.K., Bhatti M.S., Kansal S.K. (2018). Recycling of Waste Poly(ethylene terephthalate) Bottles by Alkaline Hydrolysis and Recovery of Pure Nanospindle-Shaped Terephthalic Acid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18 (8), pp. 5804–5809. doi: 10.1166/jnn.2018.15363.
70. Lee H.L., Chiu C.W., Lee T. (2021). Engineering terephthalic acid product from recycling of PET bottles waste for downstream operations. *Chemical Engineering Journal Advances*, 5, Article 100079, 14 p. — <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100079>
71. Spasojević P.M., Panić V.V., Džunuzović J.V., Marinković A.D., Woortman A.J.J., Loos K., Popović I.G. (2015). High performance alkyd resins synthesized from postconsumer PET bottles. *RSC Advances*, 5 (76), pp. 62273–62283. doi: 10.1039/c5ra11777a.
72. Bal K., Ёнль K.C., Acar I., Ёзль G. (2017). Epoxy-based paints from glycolysis products of postconsumer PET bottles: synthesis, wet paint properties and film properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14 (3), pp. 747–753. doi: 10.1007/s11998-016-9895-0.
73. Kaliveer V., Ramachandra R., Kumar P., Prajwal, Shetty M.S., DSilva R. (2020). Recycling and conversion of waste PET bottles into acrylic paints. *AIP Conference Proceedings*, 2236 (1), Article 040019, 7 p. — <https://doi.org/10.1063/5.0007730>
74. El Essawy N.A., Konsowa A.H., Elnouby M., Farag H.A. (2016). A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67 (3), pp. 358–370. doi: 10.1080/10962247.2016.1242517.
75. Ellessawy N.A., Elnouby M., Gouda M.H., Hamad H.A., Taha N.A., Gouda M., Mohy Eldin M.S. (2019). Ciprofloxacin removal using magnetic fullerene nanocomposite obtained from sustainable PET bottle wastes: Adsorption process optimization, kinetics, isotherm, regeneration and recycling studies. *Chemosphere*, 239, Article 124728, 10 p. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124728.
76. Jabłońska B., Kiełbasa P., Korenko M., Dryżdz T. (2019). Physical and Chemical Properties of Waste from PET Bottles Washing as A Component of Solid Fuels. *Energies*, 12 (11), Article 2197, 17 p. doi: 10.3390/en12112197.
77. Mikulionok I.O. (2021). Stan ta perspektyvy povodzhennia z pnevmatychnymy shynamy, shcho vtratyly svoi spozhyvchi vlastyvoli. [A state of art and prospects of used pneumatic tires management (Review)]. *Energotekhnologii ta resursozberezhennia*, No. 3, pp. 63–83. doi: 10.33070/etars.3.2021.06
78. Li S. (2019). PET recycling via gasification - Influence of operating conditions on product distribution: Master's thesis. Gothenburg (Sweden): Chalmers University of Technology. 100 p. — URL: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/257443/257443.pdf>
79. Koshti R., Mehta L., Samarth N. (2018). Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 26 (8), pp. 3520–3529. doi: 10.1007/s10924-018-1214-7.
80. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351 (6278), pp. 1196–1199. doi: 10.1126/science.aad6359.
81. Ministerstvo rozvytku gromad ta terytorii Ukrainy: Stan sfery povodzhennia z pobutovymy vidkhodamy v Ukraini za 2019 rik. [Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine: The state of the sphere of household waste management in Ukraine in 2019]. — URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teretoryi/stan-sfery-povodzhennia-z-pobutovymi-vi/> (Accessed June 13, 2021) (Ukr.)
82. Shcho robyty z vykorystanymy plashkamy z PETF dlia napoiv? [What to do with used PET bottles for drinks?]. *Upakovka*. 2020. No. 5, pp. 42–43.
83. Direktyva № 94/62/ES Yevropeyskogo Parlamenta i Soveta ob upakovke i otkhodakh ot upakovki (Bryussel, 20.12.1994). [Directive (EU) 94/62 of the European Parliament and of the Council on packaging and packaging waste (Brussels, 20 December 1994)]. — URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text (Accessed June 13, 2021) (Rus.)
84. Direktyva № 2019/904/ES Yevropeyskogo Parlamenta i Soveta ot 5 iyunya 2019 g. o sokrashchenii vliyaniya nekotorykh plastikovykh produktov na okruzhayushchuyu sredyu. [Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the environmental impact of certain plastic products]. — URL: <http://ecoportus.ru/node/968> (Accessed June 13, 2021) (Rus.)