

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
Інститут деревообробних технологій і дизайну
Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини
та безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПЛАСТИКІВ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЇХ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Виконав: студент групи ТЗНС-61м/2
спеціальності 183 Технології захисту
навколишнього середовища
Горностай Є.В.

Керівник: ст. викл., к.б.н. Маєвська О.М.

Рецензент: доц., к.х.н. Мякуш О.Р.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

² Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: ТЗНСДБЖД

проф. Кшивецький Б.Я.

"30" Вересня 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРУ**

Горностаю Євгенію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Аналіз технологій перероблення пластиків для мінімізації їх впливу на довкілля

Керівник проекту Маєвська О.М., ст. викл., к.б.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від "17" липня 2024 року №С-469

2. Термін подання студентом роботи 11.12.2024

3. Вихідні дані до проекту: пластикові відходи різного походження

4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)

1. Стан вивчення питання

2. Технології перероблення та утилізації пластиків різного походження

3. Заходи мінімізації негативних впливів від деградованого пластику на довкілля

4. Стан перероблення пластикового упакування в місті Львові

5. Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах

Висновки

Використана література

Презентація доповіді у слайдах

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
5.1.	Доц. Сторожук В.М.	17.11.2024	02.12.2024
5.2.	Доц. Сторожук В.М.	17.11.2024	02.12.2024
5.3.	Доц. Сторожук В.М.	17.11.2024	02.12.2024

7. Дата видачі завдання 4 вересня 2024 року

Керівник проекту О.М.М. — Маєвська О.М.
 (підпис) (прізвище, ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Стан вивчення питання	До 28.09.24	
2	Технології перероблення та утилізації пластиків різного походження	До 22.10.24	
3	Заходи мінімізації негативних впливів від деградованого пластику на довкілля	До 13.11.2024	
4	Стан перероблення пластикового упакування в місті Львові	До 21.11.2024	
5	Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах	До 02.12.2024	
6	Оформлення магістерської роботи	До 11.12.2024	

Студент

С.В.Горностаї Горностаї С.В.
 (підпис)

Керівник роботи

О.М.М. Маєвська О.М.
 (підпис)

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи магістра – «Аналіз технологій перероблення пластиків для мінімізації їх впливу на довкілля»

У цій магістерській роботі розглянуто пластикові відходи та процеси їхнього перероблення. Перший розділ роботи подає класифікацію пластиків і сфери застосування виробів з них. У цьому розділі наводяться шляхи потрапляння таких відходів в атмосферне повітря, водне середовище і ґрунтовий покрив, а також впливи деградованого пластику на живі організми та методи виявлення пластиків.

Другий розділ присвячений аналізу перероблення пластиків за допомогою різних технологій, а також розгляду перспективних технологій, які б могли підвищити ефективність та екологічність процесів перероблення.

У третьому розділі досліджено заходи, які застосовуються для зниження негативних впливів деградованого пластику на навколишнє середовище, зокрема впровадження принципів циркулярної економіки, біорозкладних пластиків, обмеження застосування одноразового пластику тощо.

Четвертий розділ стосується аналізу управління пластиковими відходами у Львові та проблем, що впливають на процеси переробки, а також наведені успішні напрацювання щодо перероблення цього матеріалу.

Останній розділ роботи подає заходи щодо охорони праці та безпеки у випадку надзвичайних ситуацій щодо сфери, пов'язаної із переробкою пластику.

SUMMARY

The topic of the master's thesis is «Analysis of plastics recycling technologies to minimise their environmental impact».

This master's thesis deals with plastic waste and its recycling processes. The first section of the work presents the classification of plastics and the areas of application of products made from them. This chapter describes the ways in which such waste gets into the air, water and soil, as well as the impact of degraded plastics on living organisms and methods of detecting plastics.

The second section is devoted to the analysis of plastic recycling using different technologies, as well as to the consideration of promising technologies that could increase the efficiency and environmental friendliness of recycling processes.

The third section examines the measures used to reduce the negative environmental impacts of degraded plastics, including the introduction of circular economy principles, biodegradable plastics, limiting the use of single-use plastics, etc.

The fourth section analyses the management of plastic waste in Lviv and the problems affecting recycling processes, and presents successful practices in recycling this material.

The last section of the paper presents health and safety measures in case of emergencies in the field of plastic recycling.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ	10
1.1. Класифікація пластиків та їхнє використання в різних сферах економіки	10
1.2. Можливості потрапляння пластиків різного походження до компонентів довкілля	11
1.2.1. Потрапляння деградованого пластику до водного середовища та атмосферного повітря	14
1.2.2. Вплив деградованого пластику на ґрунтовий та рослинний покрив	15
1.2.3. Небезпека деградованого пластику щодо живих організмів	16
1.2.4. Методи детекції деградованого пластику у воді, ґрунті, рослинності, живих організмах	16
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПЛАСТИКІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ	20
2.1. Механічна переробка пластику	22
2.2. Хімічна переробка пластику	26
2.3. Термоліз і спалювання з утилізацією енергії	29
2.4. Біотехнологічні методи перероблення пластику	34
2.5. Перспективи розвитку технологій переробки пластику	37
РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНИХ ВПЛИВІВ ВІД ДЕГРАДОВАНОГО ПЛАСТИКУ НА ДОВКІЛЛЯ	40
3.1. Впровадження принципів циркулярної економіки у використанні пластику	41
3.2. Розвиток біорозкладних матеріалів як альтернативи пластику	43
3.3. Зменшення виробництва та споживання одноразового пластику	46
3.4. Технологічні вдосконалення для підвищення ефективності переробки пластику	52
3.5. Стимулювання зменшення утворення пластикових відходів	54
3.6. Розвиток міжнародної співпраці у вирішенні проблеми пластикових відходів	57
РОЗДІЛ 4. СТАН ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ У ЛЬВОВІ	62
4.1. Сучасний стан переробки пластикового упакування у місті	62
4.2. Проблеми, що ускладнюють переробку пластикових відходів	65

4.3. Можливості для покращення процесів переробки	68
4.4. Приклади успішних ініціатив щодо перероблення пластику у Львові	69
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ	71
5.1. Дотримання охорони праці при заборі і транспортуванні пластикових відходів	71
5.2. Дотримання охорони праці працівниками сортувальних ліній і підприємств з переробки пластикових відходів	71
5.3. Дотримання правил безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій	71
ВИСНОВКИ	73
ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	74

ВСТУП

У сучасному світі пластик та пластикоподібні матеріали відіграють важливу роль у різноманітних галузях та сферах людської діяльності – від різноманітного упакування у харчовій, переробній сферах до використання його як складових будівельних матеріалів, конструкцій в транспортних засобах, компонентів медичного обладнання та інструментів тощо. Забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами є глобальною проблемою, котра вимагає негайних та невідкладних рішень. Прогнозується, що до 2050 року обсяги пластикових відходів зможуть перевищити вагу всього населення нашої планети, що зайвий раз підкреслює та показує масштаби цієї проблеми.

Відсутність ефективної системи переробки пластиків призводить до суттєвого забруднення ним навколишнього середовища. Щороку різними підприємствами та побутовими споживачами викидаються десятком мільйонів тонн різноманітних пластикових відходів, і лише невелика частина їх підлягає переробці або утилізації належним чином. Накопичення пластику в довкіллі призводить до низки екологічних проблем, таких як забруднення водойм, ґрунтів, атмосфери тощо. Особливу небезпеку становить для навколишнього середовища деградований пластик, котрий не тільки довго розкладається, а в результаті дії часу та природних факторів перетворюється на мікропластик, який негативно впливає на різні екосистеми та живі організми.

З огляду на ситуацію з надлишками відходів пластику, важливим є планування та розробка ефективних технологій утилізації, котрі дадуть змогу переробити пластикові відходи та отримати в результаті ресурси, котрі можна буде використати повторно. Також важливо, щоб така переробка була екологічно безпечною. Технології переробки можуть бути реалізовані як на рівні механічної переробки, де пластик очищується і подрібнюється для подальшого використання, так і до різних хімічних і біохімічних процесів, котрі мають можливість перетворити пластик назад у сировину для подальшого виготовлення нових продуктів.

Мета роботи: аналіз сучасних технологій переробки та утилізації пластиків для зменшення обсягів та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Об'єкт дослідження: пластик різного походження та його перероблення з ним (з конкретизацією ситуації щодо ситуації з пластиком у місті Львові)

Предмет дослідження: технології та методи переробки пластику, а також заходи, спрямовані на зменшення негативного впливу пластикових відходів на навколишнє середовище (з деталізованим вивчення утилізації та переробки пластикового упакування в місті Львові).

Завдання роботи:

- Класифікація пластиків та сфера їхнього застосування
- Шляхи потрапляння деградованих пластиків до компонентів довкілля;
- Характеристика існуючих та перспективних технологій перероблення;
- Аналіз заходів мінімізації негативних впливів від деградованого пластику на довкілля
- Аналіз стану перероблення пластикових у Львові та приклади успішних напрацювань щодо розв'язання цієї проблеми

РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ

1.1. Класифікація пластиків та їхнє використання в різних сферах економіки

Пластик – полімерний матеріал, який характеризується стійкістю, гнучкістю, легкістю та відносно низькою собівартістю в порівнянні з іншими матеріалами. Ці властивості вплинули на його популярність та широке використання у багатьох галузях народного господарства, зокрема в виробництві упакування, медицині, будівництві, хімічній, автомобільній, текстильній та інших секторах економіки.

На сьогоднішній день основні різновиди пластиків включають поліетилен (PE), полістирол (PS), полівінілхлорид (PVC), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), полікарбонат (PC) та поліуретан (PU). Кожен з видів пластику має індивідуальні властивості та використовується в різноманітних галузях [1].

- «Поліетилен (PE)» являється одним з найбільш розповсюджених пластиків у світі, котрий має досить високий рівень міцності та має хороші властивості для згину. Такий пластик широко застосовується для виготовлення різноманітного упакування таких як,плівки,каністри,різні труби, пластикові пакети,тощо.
- «Поліпропілен (PP)», як і поліетилен, знайшов своє застосування в пакувальній індустрії, виготовленні харчового упакування та контейнерів, інструментів медичного призначення, текстильній галузі, різних внутрішніх деталей автомобілів тощо.
- «Полівінілхлорид (PVC)» здебільшого використовується в будівництві, зокрема для виготовлення сантехнічних труб, ізоляційних матеріалів і покриттів, віконних профілів.
- «Полістирол (PS)» частіше всього застосовується у виробництві одноразового посуду, пакувальних матеріалів та конструкційних блоків.
- «Поліетилентерефталат (PET)» є головним матеріалом для виробництва пластикових пляшок, пакувань та волокон для текстильного виробництва.

Ці матеріали стали невід'ємною частиною економіки та нашого побуту, що з однієї сторони, сприяє їх повсякденному активному використанню і в той же час вони створюють додаткові екологічні проблеми у зв'язку зі складністю їх подальшого перероблення. На рис. 1 наведена схема класифікації сполук, з яких виробляють пластик та сфери найчастішого їхнього використання.

Рис. 1. Сполуки, за якими асоціюють різновиди пластиків та приклади сфер їхнього застосування

1.2. Можливості потрапляння пластиків різного походження до компонентів довкілля

Плаستي та різні вироби з них здатні потрапляти до навколишнього середовища на всіх етапах життєвого циклу – від їх отримання та використання до подальшої утилізації. Варто зазначити, що процес потрапляння пластиків в навколишнє середовище не є простим, він складний та багатоетапний, включає в себе безліч факторів, котрі можуть по-різному

впливати на екосистеми. Основні способи потрапляння пластикових відходів в екосистему відбувається через неправильну утилізацію, створення стихійних сміттєвих звалищ пластику, потрапляння в екосистему виробничих відходів та інші шляхи.

Найпоширеніший спосіб потрапляння пластиків у навколишнє середовище пов'язаний з неправильною їхньою утилізацією. В основному це трапляється, коли люди не дотримуються правил роздільного сортування сміття. В таких випадках відходи, які містять пластик, через вивезення сміття без належного сортування, потрапляють на загальні сміттєзвалища. До прикладу, багато споживачів викидають пластикові відходи у звичайний загальний смітник, що в нинішніх реаліях збору сміття підрядними компаніями унеможлиблює їхню подальшу переробку. Подібне безвідповідальне ставлення громадян до сортування та вивозу відходів і призводить до того, що весь зібраний та вивезений пластик збирається та накопичується на величезних за обсягом сміттєзвалищах, де він може залишатися та зберігатись протягом сотень років, тим самим забруднюючи довкілля.

Сміттєві полігони – ще одне джерело забруднення пластиком навколишнього середовища. На таких полігонах пластик потрапляє в ґрунт, а далі – у поверхневі водні об'єкти та підземні води, тим самим створюючи екологічні проблеми для водних екосистем. У процесі свого розпаду пластик на сміттєвих полігонах може вивільнити різні небезпечні хімічні речовини, котрі негативно вплинуть на якість ґрунту та підземних вод. Окрім того, під впливом різних атмосферних явищ, значна частина пластикових дрібних відходів може бути деградована, змита з полігону, з подальшим потраплянням в ґрунти, річки, озера моря та океани, до інших екосистем, негативно впливаючи на їхній стан [2-5].

Виробничі процеси на підприємствах, котрі включають в себе використання пластику, також можуть призводити до утворення великого обсягу пластикових відходів та забруднення ними довкілля. Велика кількість

підприємств в Україні не мають належних систем для управління відходами, в тому числі й пластиком, що в свою чергу призводить до їхнього зумисного потрапляння в навколишнє середовище. Випадкове забруднення компонентів довкілля пластиком може трапитися внаслідок транспортних аварій на автомобільних дорогах, залізничних і водних шляхах. Пластик, який потрапляє у природні води під час подібних аварій, становить значну небезпеку для морської флори та фауни [6].

Особливу загрозу становить деградований пластик, котрий може накопичуватися у формі мікропластику та потрапляти в водойми, ґрунти та навіть атмосферу. Під впливом сонячного світла, високої та низької температури та вологи, відбувається деградація пластика. В результаті цього процесу великі пластикові вироби розпадаються на маленькі дрібні частинки. Такий процес може тривати десятками років, і врешті-решт ці частинки стануть настільки дрібними, що їх неможливо буде виявити неозброєним оком. Такий мікропластик здатний потрапляти в організми жителів морських глибин, що вже шкодить екології та морській фауні. Через трофічні ланцюги мікропластик може потрапити до організму людей, спричиняючи серйозні захворювання і погіршення якості життя [4, 5].

Відходи пластику мають значний вплив на природні екосистеми. Мікропластик має здатність поглинати токсини з навколишнього середовища і накопичуватись в живих організмах. Наприклад, у водних екосистемах, така акумуляція різних небезпечних хімічних речовин підсилюється у харчовому ланцюгу «молюски-риби-птахи та інші тварини». Це в свою чергу негативно впливає на здоров'я людей, котрі вживають продукцію, виготовлену із ланок цього харчового ланцюга. Мікропластик має змогу порушувати нормальні фізіологічні функції будь-яких живих організмів, викликає зміни у популяціях та впливає на біорізноманіття в екосистемах [7].

На рис. 2 підсумовані шляхи потрапляння пластику в довкілля та його мікрочастинок до живих організмів

Рис. 2. Шляхи потрапляння пластику в довкілля та його мікрочастинок до живих організмів

Нижче буде детально проаналізовано як деградований пластик потрапляє до конкретних компонентів довкілля і позначається на діяльності живих організмів.

1.2.1. Потрапляння деградованого пластику до водного середовища та атмосферного повітря

Пластикові відходи здатні потрапляти до водойм будь-яким способом: через скидання у водні об'єкти фізичними особами чи промисловими підприємствами, змиваючись із сміттєвих полігонів при аварійних ситуаціях на водному транспорті. Деградуючи до мікропластику, такі частинки поступово розповсюджуються через мережу річкових систем в Світовий океан, де створює великі за розміром сміттєві острови [8]. На фотографії, поданій на рис. 3 представлений такий пластиковий острів [9].

Рис. 3. Плавучий острів із пластикового сміття біля узбережжя Корсики [9]

Атмосферне забруднення пластиком також є серйозною екологічною проблемою, оскільки дрібнодисперсні частинки мікропластику мають змогу вільно підніматися в повітря через транспортні засоби (літаки, гелікоптери, космічні апарати тощо), а також опиняються у повітрі внаслідок діяльності промислових підприємств (викиди внаслідок згорання пластику) [3]. Мікропластик з повітря легко може потрапити на поверхню ґрунту або водою та проникати у дихальні шляхи різноманітних живих організмів, безпосередньо впливаючи на їхній стан [10].

1.2.2. Вплив деградованого пластику на ґрунтовий та рослинний покрив

Серйозною проблемою потрапляння пластику до компонентів довкілля є те, що цілісний виріб з часом зазнає фізичної, хімічної, біологічної дії завдяки чому пластик деградує до дрібніших фрагментів – макропластику, мезопластику, мікропластику та нанопластику [11]. Останні два типи є особливо небезпечними, тому що можуть безпосередньо потрапляти до повітря, ґрунту і води, нагромаджуватись у рослинних і тваринних організмах. Мікропластик накопичується та розчиняється у ґрунтах, може поглинатись рослинами, впливаючи на їхню здатність до росту. Пластик в ґрунті може

перешкоджати потоку повітря та води, тим самим порушуючи процеси зволоження та аерації ґрунтового покриву. Так, дослідження науковців щодо порівняння росту бур'яна *Arabidopsis thaliana* на чистому ґрунті та ґрунті, що містив частинки мікропластику (розміром 0,1 мкм) продемонструвало порушення росту в рослин, що росли в забрудненій землі. Впродовж семитижневого росту рослини, які зазнали впливу мікропластику, були набагато коротшими за висотою і меншими у біомасі в порівнянні з рослинами, що росли в звичайних умовах. Зменшення кількості біомаси негативно впливає на загальний стан врожайності, що становить загрозу для сільськогосподарської галузі [12].

1.2.3. небезпека деградованого пластику щодо живих організмів

Нанопластик, котрий утворюється в процесі деградації мікропластику, має здатність проникати безпосередньо в живі організми, і передаватись від організму до організму через харчові ланцюги [7]. Таким чином, нанопластик потрапляє до риб, морських тварин, птахів, негативно впливає на роботу різних органів і систем органів, спричиняє інтоксикацію, порушення обміну речовин і навіть загибель організму. Окрім того, пластик цілком може стати джерелом різноманітних токсичних та хімічних речовин, які також негативно впливають на здоров'я тварин та людей. Вплив нанопластику на організм людини не вивчений належним чином. Вчені всього світу тільки намагаються зібрати доказову базу, щоб в подальшому можна було оперувати конкретними даними. Проте негативний вплив мікропластиків вже відзначається в експериментальних даних на клітинних культурах [13]. Показано, що мікрота нанопластик наявний у різних біологічних рідинах – від крові, лімфи, сечі, сперми до грудного молока [14]. Припускають, що такі пластикові частинки можуть впливати і на репродуктивну функцію, позначаючись на якості життя майбутніх поколінь. Автори статті підкреслюють, що кількість пластику в організмі подвоюється кожні 10-15 років [15].

1.2.4. Методи детекції деградованого пластику у воді, ґрунті, рослинності, живих організмах

Для знаходження та дослідження мікро- та нанопластику в різноманітних середовищах та екосистемах застосовують кілька основних методів [16-20]:

- «ІЧ-спектроскопія (інфрачервона спектроскопія)» – це різновид молекулярної оптичної спектроскопії, побудований на взаємозв'язку речовин із електромагнітним випромінюванням в інфрачервоному діапазоні, між червоним краєм видимого спектра та початком короткохвильового радіодіапазону. Вона дозволяє виявити пластики у складі води, ґрунту та інших зразків за спектральними характеристиками .

- «Електронна мікроскопія» – це сукупність різноманітних методів застосування мікроскопів різної конструкції та принципів роботи. Вона знайшла своє застосування для візуалізації та фактичного розрахунку часток нанопластику у зразку.

- «Полімерно-ланцюгова реакція (ПЛР) » та мас-спектрометрія надають можливість ідентифікувати присутність пластику у живих організмах на молекулярному рівні. Мас-спектрометрія – це спосіб дослідження іонів, який за основу бере співвідношенні маси до заряду для подальшого визначення кількості в простих та складних сумішах. Мас-спектрометрія втілює чотири головні функції: поділ (фільтрація), іонізація, виявлення і аналіз.

-«Ультрафіолетова спектроскопія» – досить швидка ідентифікація різнобарвних полімерів, однак недоліком цього методу за однакового кольору спектру стає неможливим відсортувати мікрочастинки за типом полімеру,

-« Рентгенофлуоресцентний аналіз» – швидкий, порівняно недорогий спосіб ідентифікації, який досить добре підходить для «складних» індикаторів (зазвичай неорганічних). Дає змогу ідентифікувати присутність бромованих антипіренів; однак різницю можна встановити тільки між ПВХ та різними пластиками, а не між всіма категоріями пластику без індикаторних речовини

-«Флуоресцентна спектроскопія» – швидкий, однак дороговартісний спосіб для відсортування пластиків на основі індикаторів з подальшим використанням органічних та неорганічних індикаторів; проте немає жодних

характерних спектрів для різноманітних полімерів, а от випромінювання високої енергії має здатність впливати на властивості матеріалу

-«Лазерно-іскрова емісійна спектрометрія (LIRS)»: не потрібна тривала підготовка зразків, можна виявити добавки; однак ж небезпека пошкодження матеріалу лазером і низькою є швидкість дослідження

-«Раманівська спектроскопія» – швидкий спосіб, який часто використовують не як основний а додатковий до інших методів спектроскопії, наприклад, таких як NIRS чи LIBS (наприклад, досить часто він використовується для виявлення мікропластику в рідині). Володіє слабкою інтенсивністю, створюється порушення ідентифікацію від кольорового пластику.

-« Часова флуоресцентна спектроскопія »(TGFS) – методика, яка доповнює інші спектрофлуориметричні методи, володіє покращеними співвідношення сигналу і шуму; проте дуже дорога у використанні (необхідне дороге обладнання та обслуговування програмного забезпечення). До недоліків також відноситься обмежена пропускна властивість спектрофотометра;

-«Флуоресцентна спектроскопія з підвищуючим перетворенням» (Up-conversion (UC) fluorescence spectroscopy) – в основі роботи спектрофотометра лежить використання меншої енергії випромінювання та нижчих концентрацій індикаторів. Використання цього методу складне і дороговартісне.

У таблиці 1 підсумовані переваги та недоліки використання різних методів ідентифікації мікро- та нанопластику.

Таблиця 1. Переваги та недоліки використання різних методів детекції мікро- та нанопластику

Назва методу	Переваги	Недоліки
ІЧ-спектроскопія	Виявлення частинок у зразках повітря, води, ґрунту	
Електронна мікроскопія	Візуалізація нанопластиків	Складна для проведення
Мас-спектрометрія	Виявлення в зразках, отриманих із живих організмах	Дороговартісна і складна для проведення
Ультрафіолетова спектроскопія	Швидка для проведення	Складнощі для ідентифікації зразків за однакових довжин хвилі
Рентгенофлуоресцентний аналіз	Ідентифікація наявності бромованих антипіренів	Можливість встановити різницю тільки між окремими пластиками
Флуоресцентна спектроскопія	Швидкий	Використання великої кількості індикаторів, вплив енергії на властивості матеріалу
Лазерно-іскрова емісійна спектрометрія	Відсутність тривалої підготовки зразків	Низька швидкість дослідження
Раманівська спектроскопія	Швидке проведення	Тільки як додатковий спосіб дослідження
Часова флуоресцентна спектроскопія	покращені співвідношення сигналу і шуму	дороговартісне програмного забезпечення, низька пропускна здатність спектрофотометра
Флуоресцентна спектроскопія з підвищуючим перетворенням	менша енергії випромінювання та низькі концентрації індикаторів	складне і дороговартісне обладнання

Всі вищенаведені методи дозволяють виявляти навіть мікроскопічні кількості пластику у будь-яких компонентах навколишнього середовища та проводити моніторинг його поширення. Попри те, що більшість з них є дороговартісними і вимагає складного обладнання, вони є базовими щодо

проведення досліджень виявлення мікро- та нанопластику та встановлення негативного впливу його на екосистеми та функціонування живих організмів.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ПЛАСТИКІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Проблема правильної утилізації пластиків є однією з головних екологічних викликів сьогодення, з якими повсякденно стикається людство. Для навколишнього середовища пластикові відходи становлять потенційну загрозу, оскільки їх концентрація в світі призводить до значного забруднення вод, ґрунтів та атмосфери, і паралельно цьому завдає шкоди флорі та фауні. В залежності від типу пластику та його хімічних і фізичних властивостей, а також його стану (новий, використаний, деградований), існують різні способи обробки та переробки, котрі можуть бути застосовані до них.

У цьому розділі розглянуті основні сучасні технології, які направлені на зменшення кількості пластикових відходів та зменшення їх негативного впливу на навколишній світ [21-25]. Серед різних сучасних технологій переробки пластиків можна окремо виділити механічну та хімічну переробку, термоліз, компостування, розроблені для того, щоб максимально зменшити кількість пластику, що потрапляє в природні екосистеми або на сміттєзвалища. Кожний з цих методів має як переваги, так і недоліки, а також вони можуть по-різному проявляти свою ефективність в залежності від різних умов і конкретних типів пластику, що підлягають утилізації.

Важливо зауважити, що утилізація пластиків не є єдиною технологічною задачею, адже має бути комплексний підхід, що включає в себе зміни в загальному суспільному сприйнятті цієї проблеми. Воно також включає спеціалізоване навчання людей щодо важливості правильного управління з відходами. Також потрібна державна політика, яка б на державному рівні підтримувала і розвивала екологічно безпечні технології та фінансувала різного роду інновації в цій галузі. Колективна соціальна свідомість та відповідальність кожної людини в правильному поводженні з пластиком можуть відігравати ключову роль у зменшенні кількості пластикових відходів та покращенні стану навколишнього середовища.

Необхідно додати, що розробка нових та вдосконалення вже існуючих технологій утилізації будь-якого роду пластиків є важливими для забезпечення стабільного розвитку і збереження задовільного екологічного стану на планеті. Тільки загальними спільними зусиллями можна подолати цю серйозну проблему та зможемо забезпечити безпечне і екологічно чисте майбутнє для наступних поколінь.

Будь-якій переробці передують сортування пластикових відходів та її підготовка до подальшої переробки. Перед початком переробки потрібно правильно відсортувати пластик за типом, оскільки різні види пластику мають різну температуру плавлення та різні фізичні властивості. На рис. 4 зображені контейнери для відсортовування пластикових відходів.

Рис. 4. Контейнери для відсортування пластикових відходів

2.1. Механічна переробка пластику

Механічна переробка – один з найрозповсюдженіших і найефективніших методів утилізації відходів пластику, що використовуються в усьому світі. Такий метод передбачає кілька етапів, які включають: подрібнення пластику на дрібні частини, його фільтрацію та очищення, а

також плавлення для подальшого виготовлення нових виробів. Технологічний процес механічної переробки пластику наведений на схемі, поданий на рис. 5.

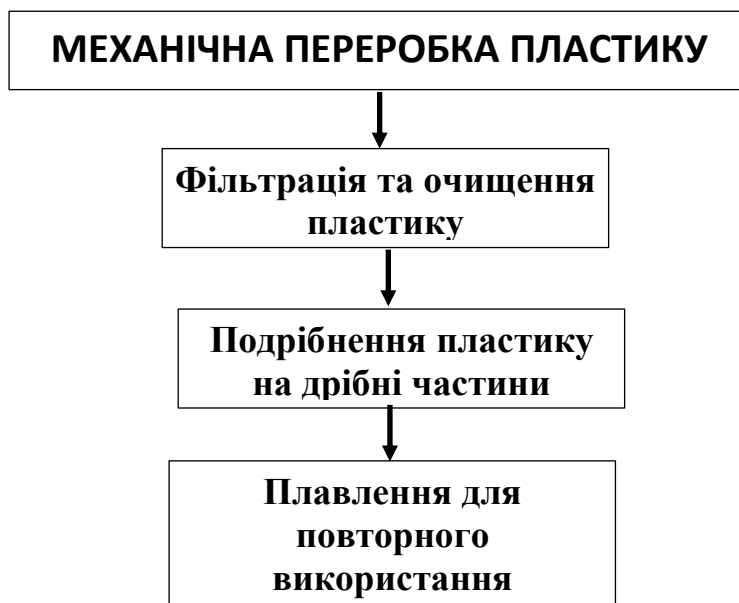


Рис. 5. Схема механічної переробки пластику

Пластикові відходи, які вже були у використанні, зібрані за допомогою різних методів та з будь-яких джерел, наприклад, з контейнерів, у яких містились пляшки, кришки та інші пластикові предмети, проходять первинну стадію подрібнення. Воно здійснюється з використанням спеціалізованих подрібнювальних машин, які ріжучим інструментом перетворюють великі частини пластику на значно дрібні частинки чи фракції. Такий процес є дуже важливий для проведення подальшого перероблення, оскільки чим дрібніші частинки, тим їх краще буде обробляти на наступних етапах переробки.

Наступним кроком є очищення вже подрібненого пластику. В процесі цього етапу проходить видалення забруднення, наприклад етикетки, наклейки, бруд, залишки їжі та інші будь-які сторонні матеріали, котрі заважають подальшій переробці. Очищення є критично важливим етапом, тому що наявність забруднень на пластику має здатність суттєво знизити якість переробленого пластику та придатність його для виготовлення в нових виробів. Очищення здійснюється за допомогою миття водою, а також різних

технологій, які дозволяють відсортувати і відокремити пластик від сторонніх матеріалів чи сміття.

Після очищення подрібнений пластик піддають процесу плавлення. Зазвичай пластик плавлять в екструдері, котрий нагріває дрібні пластикові частинки до високої температури, перетворюючи їх з одного агрегатного стану в інший, а саме в рідку масу. Цю рідку форму пластику використовують для виробництва нових виробів, наприклад пластикових пляшок, контейнерів, упаковок, іграшок та інших виробів з пластику. В залежності від типу пластику та вимог до кінцевого продукту, можуть застосовуватись різні технології формування та температурні режими.

Проте механічна переробка має особливі обмеження. Вона може бути менш результативною для деяких видів пластику, наприклад поліетилену низької щільності (LDPE) або полістиролу, які важче переробляти через їхні фізичні властивості. З часом якість переробленого пластику має здатність змінюватися через таке явище як деградація матеріалу, під час повторних циклів переробки. Це показує важливість досліджень та розробок у цій сфері для покращення технологій та підвищення якості переробленого пластику.

Механічна переробка і надалі залишається важливим складовим компонентом системи утилізації пластиків, що може зменшити кількість відходів та посприяти збереженню природних ресурсів. Вона не лише допомагає знизити негативний вплив пластикових відходів, але дає економічну вигоду, адже вже використаний та в подальшому перероблений пластик часто є недорогою альтернативою новій сировині.

На рис. 6 зображено процес очищення та подрібнення пластику на дрібні фрагменти, а також його плавлення в екструдері.

Рис. 6. Процес очищення, подрібнення та плавлення використаного пластику під час його механічної переробки

Механічна переробка є основною технологією перероблення пластику та свідченням того, що зусилля людства стосовно створення екологічно правильного майбутнього, з мінімальною кількістю пластикових відходів та з можливістю їх повторного використання стане звичною справою для суспільства.

2.2. Хімічна переробка пластику

Хімічна переробка – надзвичайно важливий та перспективний метод утилізації пластикових відходів. Процес хімічної переробки полягає в розщепленні пластикових матеріалів на базові хімічні компоненти, які згодом можуть бути придатні для використані в синтезі нових матеріалів. В той же час як механічна переробка підходить для окремих видів пластику, то хімічна переробка є ефективною для пластику, який не може бути перероблений механічно через їхні фізичні та хімічні властивості.

Для хімічної переробки пластику застосовуються такі методи як:

1. Піроліз

Піроліз – процес, під час якого пластик розкладається на дрібні молекули при високій температурі в умовах повної відсутності кисню. Це дуже важливий етап у хімічній переробці пластику, тому що під час піролізу в результаті різних хімічних реакцій утворюються продукти в різних агрегатних станах (рідкі, газоподібні та тверді продукти). Такі продукти використовують

не тільки як паливо, але й для синтезу новостворених матеріалів. Зокрема, під час піролізу генеруються нафтові фракції, які використовуються для виробництва нових пластиків.

Така технологія є перспективною для утилізації та переробки складних пластиків (поліуретану та полістиролу), які через свої складні молекулярні структури не завжди підлягають механічній переробці. Оскільки піроліз дає змогу перетворювати різні складні матеріали на більш прості і корисні компоненти, він набуває значної популярності у сучасних технологіях переробки та утилізації пластику. На рис. 7 зображений агрегат для проходження процесу хімічної переробки пластику за допомогою піролізу.

2. Гідроліз

Гідроліз – ще один, не менш важливий процес, який використовує рідину для розкладання пластику на елементарні компоненти. Такий процес проходить під дією високих температур та тиску. Гідроліз підходить для утилізації полієфірів (поліетилентерефталат (PET)), завдяки чому отримуються речовини, які використовують для виробництва нових полімерів.

а рис. 7 показані етапи хімічної переробки пластику за допомогою гідролізу

Рис. 7. Етапи процесу хімічної переробки пластиків за допомогою гідролізу

В результаті гідролізу отримуються мономери, які повторно використовуються для синтезу нових полімерів, завдяки чому знижуються об'єми пластикових відходів. Такий метод має свої переваги над іншими технологіями, оскільки дає змогу зберігати структуру мономерів, що в свою чергу робить їх придатними для наступної переробки. Крім того, гідроліз також використовують для переробки брудних пластикових відходів, що є значною перевагою щодо меншого використання водних ресурсів, тобто ця технологія є ресурсоощадною і не отримуються стічні води, які формуються

під час механічної переробки. Таким чином, тиск на водне середовище відсутній, що є дуже важливим.

3. Метаноліз і гліколіз

Метаноліз і гліколіз – спеціальні види хімічної переробки, які застосовуються для переробки поліетилентерефталату, скорочена назва – PET. В процесі метанолізу PET розкладається на мономер, (етиленгліколь та терефталевий спирт). Ці мономер безпосередньо використовуються для синтезу новоутвореного PET. Процеси метанолізу та гліколізу допомагають зменшити обсяг відходів, притому дають можливість повторного використання пластику без суттєвого погіршення його якості.

Такий метод є корисним, оскільки дає змогу зменшити залежність від нової сировини. Завдяки цій особливості використання метанолізу та гліколізу набирає популярність в рамках стратегії циркулярної економіки, котра прагне до максимально ефективного та раціонального використання ресурсів.

4. Плазма-технології

Плазма-технології – один з передових методів, котрий використовує високоенергетичну плазму для розщеплення пластику. Такий метод є унікальним в своєму роді, оскільки він надає змогу утилізувати забруднені та композитні пластики, котрі зазвичай дуже важко утилізувати традиційними способами. Під дією різних електромагнітних полів плазма, котра виникає, перетворює пластикові відходи на базові хімічні компоненти.

Метод Плазма-технології є надзвичайно перспективний, проте в нього теж є ряд своїх недоліків. Плазма-технології є дорогі та потребують спеціалізованого обладнання, що станом на сьогодні обмежує їх широкомасштабне використання. Але завдяки своїй ефективності та змоги переробляти різні типи пластикових відходів, він метод має досить хороший потенціал в майбутньому стати основною частиною системи утилізації.

Як видно з наведених технологій хімічної переробки пластику, вони є ефективними для рециклінгу, але потребують значних енергетичних та фінансових витрат, що на даний час в умовах повномасштабного вторгнення

обмежує масштабне використання. Важливо далі продовжувати дослідження та розробки для того, щоб віднайти способи оптимізації та вдосконалення процесів хімічної переробки, зменшення затрат фінансів та енергії, а також сприяти підвищенню економічної вигоди від використання таких технологій. Синергія між механічною та хімічною переробкою має бути налагоджена належним чином задля досягнення спільної мети.

На рис. 8 наведені основні способи хімічної переробки пластиків.

Рис. 8. Методи хімічної переробки пластиків

2.3. Термоліз і спалювання з утилізацією енергії

Два важливих методи, які дозволяють отримувати енергію з пластикових відходів, називаються термоліз та спалювання пластику. Вони дають змогу отримувати енергію, яка може бути використана для задоволення енергетичних потреб підприємства з переробки пластикових відходів.

Використання цих методів має як недоліки, так і переваги. Нижче буде більш детально розглянуті ці методи

1. Спалювання з утилізацією енергії

Спалювання з утилізацією енергії – один з найлегших і найрозповсюдженіших методів, які використовують відходи з пластику як паливо для отримання енергії. Таке спалювання пластику відбувається в спеціалізованих установках при високих температурах. Під час спалювання пластику в спеціальних установках вивільняється велика кількість теплової енергії, яка може бути перероблена в електричну. Попри високу ефективність цього методу щодо отримання значної кількості енергії, він несе значні екологічні ризики, тому що супроводжується викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин – діоксинів та фуранів. Ці токсичні сполуки мають негативний вплив не тільки на довкілля а і на здоров'я людини.

Діоксин, зокрема, може викликати різні серйозні захворювання. Він здатний провокувати поділ ракових клітин в організмі, а також призводити до порушення роботи ендокринної системи. Для того, щоб зменшити негативні наслідки цих токсичних речовин важливо впроваджувати сучасні технології очищення та фільтрації викидів, котрі можуть значно зменшити викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря та забезпечити безпечне спалювання.

На рис. 9 на фотографії продемонстровані викиди димових газів від виробництва зі спалювання пластикових відходів.

Рис. 9. Викиди димових газів при висотемпературному спалюванні пластикових відходів

2. Термоліз

Термоліз – один із методів утилізації відходів пластику із застосуванням високих температур в анаеробних умовах. Він дозволяє отримувати різноманітні продукти, до прикладу синтез-газ, рідке паливо та залишки вуглець вмісних продуктів. Синтез-газ – це газ, до складу якого входить оксид вуглецю та водень. Він може бути придатним для енергетичних потреб, зокрема для виробництва електроенергії в газових турбінах або двигунах внутрішнього згорання. На рис. 10 зображено устаткування, яке використовують для термолізу пластикових відходів.

Рис. 10. Устаткування, що використовується для процесу термолізу, що застосовується для переробки пластикових відходів

Рідке паливо, отримане в результаті термолізу, використовують в різних промислових процесах на виробництвах або як пальне для транспорту. Вуглецеві залишки, котрі з'являються в процесі термолізу, використовують як сировину для подальшої переробки. Термоліз має високий потенціал використання пластикових відходів для енергетичної сфери, але варто пам'ятати, що даний метод вимагає дуже ретельного контролю за дотриманням умов технологічного та забезпечення відповідними технологіями для забору та обробки утворених газів та рідин.

3. Газифікація

Газифікація є процесом, який дає змогу отримати з пластику горючий газ за застосування високих температурах. Такий метод схожий на термоліз і проходить в умовах обмеженого доступу кисню. Горючий газ, який був отриманий газифікацією, використовують для виробництва електричної енергії, для теплопостачання та для промислових процесів. Газифікація – досить складний технологічний процес котрий вимагає спеціалізованого обладнання та належного контролю над умовами протікання реакції.

Газифікація потребує відповідного суворого контролю для того, щоб унеможливити потрапляння викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря. Цей метод дає змогу забезпечити ефективне використання та подальше перетворення пластикових відходів на джерело енергії, проте без належного контролю та дотримання екологічних норм він здатний завдати колосальної шкоди навколишньому середовищу.

На рис. 11 наведено деякі установки, які використовуються в процесі перероблення пластиків методом газифікації.

Рис. 11. Деяке устаткування, яке використовується для перероблення пластикових відходів шляхом газифікації

Вищенаведені методи утилізації, такі як спалювання, термоліз та газифікація, дають змогу отримати енергію з пластикових відходів, але їхній екологічний вплив на довкілля потребує системного та ретельного контролю. Важливо використовуючи ці методи, дотримуючись екологічних норм та стандартів, застосовуючи сучасні фільтрувальні системи, які призначені для зменшення викидів в атмосферне повітря забруднюючих речовин. Впровадження технологій очищення димових газів може значно зменшити викиди небезпечних сполук, що позначається на якості атмосферного повітря. Хоча термоліз та спалювання пластику можуть виступати як альтернативні джерела енергії, проте необхідно вжити додаткових заходів для безпечного їх використання та зважати на аспекти їх застосування. Інтеграція сучасних технологій очищення та створення безвідходних матеріалів є вирішальним

аспектом для досягнення розвитку переробної галузі, яка займається сегментом пластикових відходів. З метою зниження та подальшої ліквідації шкідливого впливу на екосистеми важливо проєктувати нові стратегії, які здатні поєднувати в собі енергетичну ефективність і екологічну безпеку.

2.4. Біотехнологічні методи перероблення пластику

Проблема пластикового забруднення в сучасному світі стає все актуальнішою, тому зростає потреба у пошуку нових альтернативних безпечних технологій перероблення пластиків. Такими екологоорієнтованими підходами є нові біотехнологічні підходи до методів утилізації пластику, котрі за основу беруть використання мікроорганізмів та ферментів для розпаду різних полімерів. Ці розробки мають суттєвий потенціал з точки зору екологічності, тому що не вимагають високих енергозатрат, не викидають небезпечних побічних продуктів в компоненти довкілля та в недалекому майбутньому можуть стати хорошою альтернативою стандартним методам утилізації (механічній і хімічній переробці). Вони пропонують сучасні можливості для зниження негативного впливу пластикових відходів на довкілля за використання певних груп живих організмів.

1. Використання мікроорганізмів – бактерій і мікроскопічних грибків. Такі групи організмів мають здатність розкласти полімери, наприклад поліетилен, поліуретан. Ці мікроорганізми використовують пластикові відходи як джерело вуглецю, спричиняючи його розпад на безпечні для довкілля компоненти.

Останні дослідження дають змогу побачити, що деякі види бактерій, а саме *Ideonella sakaiensis*, мають змогу перетворювати поліетилентерефталат (PET) на окремі складові, які в подальшому можна використати для синтезу нових полімерів [26].

Окрім того, такі мікроскопічні гриби як *Aspergillus niger*, демонструють високий потенціал у розпаді пластикових відходів. Вони синтезують ферменти, які розщеплюють складні полімери до простих молекул. Це може

бути використано на забруднених пластиком ділянках, де стандартні методи утилізації можуть бути важко реалізовані або ж просто недоступними [27].

На рис. 11 зображені представники вищеописаних бактерій та мікроскопічних грибків, що використовуються з біотехнологічною метод для розкладання пластикових відходів

Рис. 11. Бактерії *Ideonella sakaiensis* та мікроскопічні грибки *Aspergillus niger*, що використовуються у біотехнологічних дослідження для розкладання пластиків

2. Ферментативний розклад

Ферменти, синтезовані мікроорганізмами, здатними досить ефективно розщеплювати різні типи пластику на мономери, які є основними будівельними блоками для утворення нових полімерів. До прикладу, фермент PET-аза, який дає змогу розкласти поліетилентерефталат (PET) на його складові, які в результаті можуть бути застосовані для синтезу нового PET. Це надає можливість повторного використання завдяки чому зменшується попит на нову сировину [29].

Дослідження показують, що покращення умов для роботи ферментів, таких як зміна рН та температури, може суттєво підвищити ефективність їхньої дії. Це дає можливості для створення біотехнологічних підходів, які будуть впроваджені на промислових рівнях для переробки пластикових відходів.

3. Генетична модифікація мікроорганізмів

Завдяки генетичній модифікації і отриманню генномодифікованих організмів, які спеціалізуються на розкладанні конкретних типів полімерів, можна прискорити та покращити ефективність розпаду пластику, утворюючи організми, Цей процес передбачає зміну генетичного коду мікроорганізму, що дає змогу їм виробляти та створювати специфічні ферменти, які мають змогу ефективно розщеплювати пластикові відходи, що важко розкладаються за допомогою стандартних методів. Цей підхід дає змогу біоінженерам та вченим

створювати та впроваджувати розробки різного роду біоінженерні рішення для боротьби з пластиковим забрудненням в планетарному масштабі [30].

На рис. 12 показано генетично модифіковані мікроорганізми, які дають змогу ефективно розщеплювати пластик до елементарних складових.

Рис. 12. Генетично модифіковані мікроорганізми з підвищеною ефективністю щодо розщеплення пластику

Біотехнологічні методи утилізації пластику є інноваційним та сучасним підходом до розв'язання проблем, пов'язаних із переробленням пластикових відходів. Методи генної інженерії щодо зміни генетичного коду та отримання нових штамів мікроорганізмів мають значний потенціал для зменшення негативного впливу пластику на навколишнє середовище. Проте ці методи потребують подальших досліджень, оскільки їхня ефективність залежить від багатьох умов, таких як специфічність пластику та мікроорганізмів, які використовуються для його розкладання.

Зважаючи на сучасну проблему та глобальну кризу, пов'язану з утилізацією пластику та великим обсягом таких відходів, біотехнологічні рішення мають перспективу стати важливим етапом у системі управління пластиковими відходами. З впровадженням сучасних технологій, таких як генна модифікація мікроорганізмів та використання спеціальних ферментів,

можна досягти суттєвих успіхів у зменшенні кількості пластикових відходів та перетворенні їх на корисні ресурси. В майбутньому попит на екологічно правильні та чисті технології у сфері біотехнології може спричинити до створення максимально ефективних систем утилізації, які вирішать проблеми, що стосуються нагромадження пластикових відходів.

2.5. Перспективи розвитку технологій переробки пластику

На сьогодні проблема пластикових відходів є однією з складно вирішуваних завдань, саме тому технології їхньої оптимальної переробки та утилізації перебувають у стані активного розвитку. Різноманітні інноваційні підходи, що розвиваються в цій галузі, спрямовані на підняття екологічної ефективності, економічної доцільності та вирішення критичних проблем, які виникають під час впровадження нових методологій. Головними аспектами цього процесу є створення нових видів біорозкладаних пластиків, які дозволяють уникнути процесу складної утилізації та розробка різних методів, що поєднують кілька видів переробки.

З 1 січня 2023 року в Україні остаточно набрав чинності Закон «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» [31]. В об'єктах роздрібної торгівлі також в сфері громадського харчування та надання послуг на державному рівні забороняється використання пакетів котрі важко розкладаються. Альтернативою їм мають стати біорозкладні пакети. Це приклад інноваційного підходу до проблеми на законодавчому рівні, однак він є достатньо незначним на шляху до екологічно правильного використання пластиків.

Також впровадження концепції циркулярної економіки є одним із найперспективніших напрямів розвитку. Така модель економіки передбачає, що пластикові продукти, котрі потрапляють у відходи, не просто утилізуються, а повторно переробляються для подальшого використання або перетворення його інші види сировини чи продукції. Циркулярна економіка дає змогу зменшити обсяг відходів, заощаджує природні ресурси та знижує викиди вуглецю, що позитивно впливає на загальний стан навколишнього

середовища [32-35]. Прикладом використання таких підходів є ефективні рішення, які використовуються окремими компаніями щодо своєї продукції. Наприклад, компанія Canon приймає назад пластмасову продукцію в кінці її життєвого циклу. Також компанія з виробництва одягу та взуття Adidas створила бігові кросівки, які на 100% складаються із перероблених матеріалів. Усе це приклади циркулярної (або кругової) економіки, яка є вигідною з точки зору правильного використання сировини та є екологоорієнтованою. Найближчим часом можна спостерігати нову тенденцію на екологічно правильне виробництво, завдяки чому можливим буде розв'язати питання пластикових відходів та їхнього вторинного застосування, опираючись на принципи кругової економіки.

Різні наукові дослідження у сфері переробки пластикових відходів охоплюють широкий спектр технологій, включаючи механічну, хімічну, біотехнологічну та термічну переробку відходів. Основна увага приділяється створенню нових ферментів та мікроорганізмів, які матимуть здатність ефективно розщепити будь-які типи пластикових відходів. Інтеграція біотехнологій в процес переробки також може суттєво підвищити їх користь та ефективність, оскільки організми здатні перетворити пластикові відходи на корисні матеріали із значно малим енергетичним споживанням.

В Україні в 2024 році було реалізовано перший проєкт управління відходами під керівництвом європейської компанії НЕФКО. Модернізація процесів управління відходами спрямований на поліпшення управління відходами в Україні [36]. Цей проєкт можна масштабувати на всю Україну, що може стати впевненим кроком до чистішого та екологічного майбутнього держави.

Фінансування подібних досліджень та інвестування в інновації у цій сфері, а також безпосередня підтримка з боку держав та різних міжнародних організацій, відповідальних за покращення екологічної ситуації, має на меті просування ефективних технологій. Запровадження нових та сучасних рішень щодо утилізації пластику дає змогу стати поштовхом до економічного

зростання, створюючи додаткові робочі місця та різного роду можливості для бізнесу в екологічно чистих секторах, сприяючи таким чином сталому розвитку країни.

Таким чином, перспектива та розвиток технологій переробки пластику виглядають обнадійливими. Завдячуючи постійному розвитку та прогресу в науці, можна розраховувати на суттєве зменшення обсягів пластикових відходів та впровадження сталих рішень для їх подальшої їхньої утилізації. Циркулярна економіка та використання біорозкладних матеріалів можуть доповнити існуючі методи перероблення пластиків і стати ще одним ключем для збереження чистоти довкілля та забезпечити екологічно чисте майбутнє нашим поколінням.

РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНИХ ВПЛИВІВ ВІД ДЕГРАДОВАНОГО ПЛАСТИКУ НА ДОВКІЛЛЯ

Зниження будь-якого негативного впливу пластику на навколишнє середовище є надзвичайно складною проблемою, яка потребує нагального вирішення та комплексного підходу. Він має охоплювати заходи, котрі мають вплив на всі етапи життєвого циклу існування пластикових матеріалів, починаючи з їх первинного виробництва, закінчуючи їх утилізацією або ж переробкою. Варто враховувати, що проблематика існування пластику в екосистемах не обмежується лише стадією використання, адже вплив на природу починається ще на етапі виготовлення, коли для того використовують різноманітні природні ресурси та енергію. В процесі використання пластику він піддається обробці, яка в свій час мала значний екологічний вплив на довкілля. Нарешті, останній етап – утилізація, завдяки якій відходи пластику мають бути правильно оброблені або перероблені для подальшого використання також відіграє одну з головних ролей у запобіганні забрудненню навколишнього середовища.

У даному розділі будуть розглянуті основні заходи та стратегії, які можуть бути розроблені і застосовані для зменшення шкідливого впливу пластику на довкілля. До таких заходів можна віднести:

- впровадження на виробництвах нових сучасних технологій,
- загальне покращення систем утилізації,
- навчання та популяризація екологічних альтернатив пластику,
- підвищення загальної свідомості населення про шкідливість пластику на навколишнє середовище,
- розв'язання проблеми щодо зменшення використання пластикових матеріалів на законодавчому рівні

Такі заходи мають на меті враховувати всі аспекти проблеми та сприяти зменшенню кількості вже існуючого пластику в екосистемах, забезпечуючи безпечне та екологічно чисте середовище для наступних поколінь.

3.1. Впровадження принципів циркулярної економіки у використанні пластику

Для зменшення негативного впливу пластику на екосистеми важливо здійснити перехід до принципів циркулярної економіки, яка є однією з найважливіших стратегій майбутнього. Ця концепція передбачає створення закритого циклу використання здобутих ресурсів, в межах якого пластикові матеріали після використання не викидаються, а потрапляють на переробку та використовуються повторно. Такий підхід дозволить максимально правильно та ефективно використовувати ресурси та зменшувати загальну кількість відходів [32-34].

Головним елементом циркулярної економіки є науковий прогрес та розвиток технологій вторинної переробки пластиків, які забезпечують максимальну можливість багаторазового використання без втрати якості матеріалу. Виробники пластику повинні інвестувати в розвиток нових технологій, які дадуть змогу перетворювати відходи пластику в високоякісну вторинну сировину, яку можна використати у виробництві нових продуктів. тим самим, це не лише знизивши потребу у виготовленні нового пластику, але й зменшити кількість відходів, що потрапляють в навколишнє середовище. Завдяки повторному використанню ресурсів можна також знизити енергетичні витрати, пов'язані зі створенням нових пластикових виробів, що також позитивно впливає на довкілля.

До механізмів управління відходами в країнах ЄС відносяться як методи стимулювання (знижки, ваучери), так і обмеження (податки, збори, штрафи). Основними інструментами щодо управління відходами є: податки на певні операції поводження з відходами (спалювання, захоронення), збори за певні види товарів, схема повернення коштів, схеми розширеної відповідальності виробника за утилізацію використаного пластику (звільнення від ПДВ тощо) [37].

Багаторазове використання

По всій Європі широко розповсюджене багаторазове використання пластику супроти одноразового використання. Держави сприяють використанню таких альтернатив, а не застосування заміників одноразового посуду, створеного з іншого матеріалу. Відхід від пластикових виробів одноразового використання та перехід на багаторазове є чіткою метою Директиви, яка діє в країнах ЄС [38]. Наприклад, заміна пластикових матеріалів одноразового використання на предмети одноразового використання з деревини або паперу була б провальною для встановлення ієрархії управління відходами та підтримання ідей циркулярної економіки. Варто надати перевагу столовим приборам багаторазового використання, а не зробленим з деревини, але використаним одноразово. Різні країни повинні вживати заходів щодо зобов'язання (або принаймні стимулювати) використання пластиків багаторазового використання [39].

Впровадження систем повернення:

В країнах, які змогли успішно реалізувати в себе принципи кругової економіки щодо пластикових відходів, існують різні системи повернення тари, які дозволяють споживачам повертати пластикові упаковки, отримуючи за це компенсацію або певну винагороду в грошовому еквіваленті. Це дає змогу мотивувати людей здавати використані пластикові матеріали для повторної переробки, що, в свою чергу, зменшує вірогідність потрапляння пластику до довкілля. Подібні системи включають в себе автоматизовані пункти прийому, що створює процес збору пластику зручним, швидким та доступним для населення. Коли самі споживачі бачать безпосередньо вигоду для себе, отримуючи кошти від повернення пластикової тари, вони стають більш свідомими щодо своїх дій та активніше приймають участь у процесі утилізації, опираючись на фінансову економію та можливість часткового повернення своїх коштів. Такий підхід сприяє формуванню екологічної свідомості серед громадян та підвищує загальний рівень відповідальності за стан навколишнього середовища [40].

На рис. 13 показаний автомат, за допомогою якого здійснюють повернення пластикової тари з можливістю її подальшого перероблення. Натомість споживачі мають змогу повернути кошти, що закладались у чек, при купівлі товару у пластиковій тарі.



Рис. 13. Фандомати для повернення пластикової тари

3.2. Розвиток біорозкладних матеріалів як альтернативи пластику

Біорозкладні пластики є сучасним та перспективним альтернативним пластиковим матеріалам. Вони мають змогу зменшити негативний екологічний вплив у випадку, якщо повторне використання матеріалу не може бути виконане з різного роду причин. Прогрес щодо розвитку сучасних технологій біодеградації дає змогу створювати пластики, які природним шляхом розкладатимуться у ґрунті та воді, тим самим зменшуючи негативний вплив на ці компоненти довкілля. Такі матеріали можуть бути виготовлені з відновлюваних ресурсів, що робить їх більш екологічно привабливими в порівнянні з традиційними пластиковими продуктами. Впровадження у виробництво пластику біорозкладних матеріалів не тільки допоможе зменшити кількість пластику в довкіллі, але й підтримує концепцію сталого розвитку, оскільки вони можуть бути інтегровані в існуючі економічні системи без значних змін у виробничих процесах [41, 42].

Пластик – відносно сучасний матеріал і його вплив на здоров'я людини досі знаходиться на стадії вивчення. Проте ряд досліджень показує, що біорозкладний пластик та пластик, створений на біологічній основі може бути не менш токсичний, ніж звичайний пластик. Для того, щоб біорозкладні пластики мали такі ж фізико-механічні властивості, як і традиційний пластик, до їхнього складу можуть додавати антиоксиданти, стабілізатори, пластифікатори, барвники. Як наслідок, більшість такого пластику на біологічній основі стає токсичною та генерує шкідливі сполуки в процесі створення або містить токсичні домішки в своєму складі. Аналогічно, як і традиційний пластик, біорозкладний пластик не розчиняється у природних умовах, накопичуючись на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). Будь-який пластик, потрапляючи на полігон ТПВ, перекриває доступ кисню для органічних відходів, що запобігає їх розкладанню. Як наслідок, органічні речовини виділяють значну кількість парникових газів, що спричиняє парниковий ефект, який сприяє зміні клімату. Тому біорозкладні пластики мають бути безпечними для довкілля і швидко розкладатись. Зокрема, нещодавно був створений біопластик на рослинній основі, котрий розкладається і може стати екологічною альтернативою справжньому пластику [43]. Також розроблені біополімерні пластики на основі водоростей та компосту [44, 45]. Останній показав хороші результати, оскільки його включення в полімер показав швидке розкладання впродовж 90 днів дослідження. Було досягнуто 68% розкладання такого біопластику, тоді як склад звичайного пластику за цей час суттєво не змінився. За 200 днів було досягнуто 97% розкладання пластику, тоді як звичайний пластик продемонстрував стійкість до розпаду та розкладання. Подальші аналізи показують, що бактерії здатні використовувати полімер як джерело вуглецю та розщеплювати його.

На рис. 14 показано зразок полімерного біопластику, який може використовуватись для виготовлення пластикового упакування, що швидко розкладатиметься.



Рис. 14. Зразок полімерного біопластику

Перспективними є нещодавно проведені наукові дослідження щодо поєднання використання органічних відходів та міцелію, кореневої системи грибів. Ця маса поміщається у форму, необхідну замовнику, і залишається у теплій темній кімнаті на тиждень. За цей час міцелій розростається і створює повітряну павутинну структуру, яка набуває потрібної форми з білою гладкою поверхнею. Органічні відходи майже повністю розщеплюються міцелієм. Потім Мусо-Materials (назва нового матеріалу) піддається повітряному сушінню та термообробці. Таким чином, створений новий інертний пакувальний матеріал, який активно розповсюджується в Австралії. Його виробництвом займається компанія Fungi Solutions. Найголовнішою перевагою Мусо-Materials виробники називають його повне біопоходження та подальшу повну переробку шляхом компостування. Це дуже точно вписується у глобальні національні цілі Австралії, де вирішили відмовитися від усієї одноразової пластикової упаковки вже до 2025 року. Судячи з характеристик, цей матеріал відмінно підійде для пакування крихких товарів типу електроніки, скла, кришталю тощо. Зрозуміло, що матеріал навряд чи придатний великого масштабного виробництва. Однак, його використання для упаковки брендівих, преміальних товарів може зайвий раз не лише

підкреслити статус продукту, а й додати балів компанії як прихильнику екологічних пакувальних рішень [47].

Останні дані вказують на те, що світовий ринок біорозкладної упаковки має величезний потенціал зростання і на кінець 2022 року оцінювався приблизно у 87 мільярдів доларів. До 2029 року прогнозується, що середньорічний темп його зростання становитиме приблизно 7%. Серед усіх сегментів біопластик є найбільш прибутковим і, за прогнозами, поширюватиметься швидше, ніж будь-який інший тип матеріалу. Біопластик як перспективна альтернатива полімерам на основі нафти, потенційно може зменшити як залежність від викопного палива, так і викиди, які спричиняють зміни клімату.

Найбільш поширені біорозкладні пластики, доступні в даний час, виробляються з крохмалю або целюлози, включаючи полімолочну кислоту (PLA), полі-3-гідроксибутират (PHB) та полігідроксиалканоати (PHA). Ці матеріали часто використовуються у виробництві упакування для напоїв, фармацевтичних препаратів, засобів особистої гігієни та товарів для дому, оскільки вони придатні для вторинної переробки та біорозкладаються.

Технології створення біорозкладного пластику існують, але на сьогодні технології по виготовленню пластику, що швидко розкладається і не є токсичним для довкілля, тільки починають свій розвиток. Наразі вони не здатні цілком замінити традиційний пластик. Проте тривають пошуку і дослідження завдяки яким такий перспективний матеріал буде створений незабаром.

3.3. Зменшення виробництва та споживання одноразового пластику

Виробництво та використання одноразових пластикових виробів є однією з наймасштабніших загроз для навколишнього середовища, оскільки їхнє застосування сприяє суттєвому забрудненню, яке негативно впливає на різні екосистеми та живі організми. Відповідно до різних даних, наданих екологічними організаціями, основна частка пластикових відходів на планеті формується від одноразового пластику. Такі одноразові пластикові матеріали

(пакети, пакування, пляшки, посуд, столові прибори), часто викидаються в довкілля без належної утилізації. Уряди та різного роду організації у всьому світу намагаються запровадити директиви та обмеження на його використання, для того, щоб зменшити негативний вплив на довкілля.

Вони зокрема передбачають:



1. Заборону та обмеження використання одноразового пластику. Запровадження законодавчих обмежень на створення та використання одноразового пластику є основним заходом, що допоможе зменшити потрапляння його до навколишнього середовища. Значна кількість країн, усвідомлюючи усі наслідки та серйозність проблеми, вже на законодавчому рівні заборонили використання пластикових матеріалів, пакетів, одноразового посуду, столових приборів та інших одноразових виробів, які після разового використання стають відходами та довго розкладаються у природі. Подібні заходи не тільки зменшують кількість сміття, але й мотивують підприємства виготовляти альтернативні матеріали, котрі не завдають такої шкоди природі як пластикові матеріали. Досвід країн, котрі впровадили такі заборони, показує значне зниження забруднення пластиком у місцях, де подібні закони діють, що свідчить про їхню ефективність. До прикладу, у серпні 2019 року на Тайвані було заборонено ресторанам, торговим центрам та супермаркетам

пропонувати одноразовий посуд відвідувачам. Ця заборона охопила 150 гіпермаркетів, 180 універмагів та торгових центрів. Як наслідок, за рік показник забруднення пластиком в цій острівній державі скоротився в 40%, що є досить великим показником в масштабах країни [48]. У січні 2019 року в місті Берклі (штат Каліфорнія, США) було прийнято рішення, яке вимагало, щоб ресторани та кафе надавали своїм гостям виключно посуд багаторазового використання. За порушення були передбачені серйозні фінансові покарання. Ця ситуація позитивно вплинула на екологічну ситуацію щодо зменшення пластикового упакування в штаті [49]. У бельгійському регіоні Фландрія в 2019 році було прийнято закон, котрий забороняє місцевим органам влади продавати напої в одноразових склянках, пластикових банках та пляшках. Ця заборона стосується не лише сфери харчування, а поширюється на проведення муніципальних заходів, таких як ярмарки, шкільні вечірки, фестивалі. Як виключення дозволяється використовувати одноразовий посуд за умови, що організатори заходів зможуть забезпечити роздільне збирання та переробку щонайменше 90% цих предметів.

2. Пропаганда сталих альтернатив:

Станом на сьогодні існує різноманіття екологічних замінників пластику, котрі можуть використовуватися для створення одноразових продуктів. Серед таких альтернатив картон, скло, папір, бамбук, метал. Ці матеріали є не тільки являються безпечними для навколишнього середовища, але й більш стійкими до розпаду, що знижує їх вплив на довкілля.

Нижче наведено приклади великих компаній та зразки їхнього упакування, зробленого з біорозкладного матеріалу. Ці компанії одні з перших відмовились від пластикових матеріалів для збереження навколишнього середовища (рис. 15).

Американський підприємець Бенджамін Едгар розробив упаковку для води з паперового біорозкладного матеріалу, яку назвав *Boxed Water is better.*,

а компанія Компанія Stranger & Stranger розробила картонну пляшку для вина Paperboy.



Рис. 15. Приклади упакування з біорозкладного матеріалу

Розроблена в Китаї упаковка кросівок фірми Nike зроблена з макулатурного картону. На цій своєрідній коробці друкується тільки логотип компанії, а решта інформації прописується від руки. Американська компанія Ecovative Design створила у 2010 році упаковку із грибів EcoCradle. Її виробляють з грибного міцелію, що володіє клейкою властивістю, з додаванням бавовняного лушпиння. Грибний «біопенопласт» не містить хімічних речовин, повністю розкладається у ґрунті та абсолютно нешкідливий для навколишнього середовища [50]. На відміну багатьох інших варіантів еко-упаковки, виробництво “грибної піни” вже поставлено на потік. Компанія ІКЕА заявила про плани заміни пінопласту на грибне впакування у своїх відділеннях по всьому світу вже найближчим часом (рис. 16).

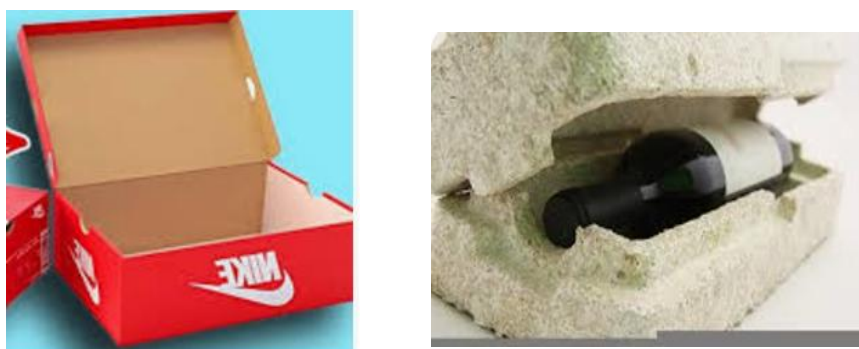


Рис. 16. Упакування з макулатурного картону і грибного міцелію

Українські супермаркети також починають переходити на використання біорозкладного упаковання. Так, у мережі супермаркетів "АТБ" з'явився біорозкладний пакет із кукурудзяного крохмалю з додаванням полімолочної кислоти, має сертифікат "OK COMPOST" home (рис. 17). Такий пакет повністю біорозкладається протягом 12 місяців при розміщенні його в ґрунт, і при цьому не шкодить навколишньому середовищу. Необхідні умови для повного розкладання такого виду упаковки – це волога, наявність біомаси та доступ до повітря для акумуляції із нього CO₂.



Рис. 17. Біорозкладний пакет з кукурудзяного крохмалю

Компанія JOHNSON'S Baby представила нові еко-упаковки для кількох своїх продуктів – картонні пакети з пластиковою кришкою замість традиційних пластикових пляшок. Ці пакети є так званими «запасками» для поповнення вже куплених споживачем коштів JOHNSON'S Baby у пластику. Упакування випускають ємністю 1 л, що дає змогу щонайменше двічі наповнити наявну тару після попередньої купівлі. Крім цього, ціна на таке упакування буде вигіднішою для покупців порівняно з товаром у пластику. За попередніми розрахунками, кожні 11000 проданих картонних паків дозволяють заощадити компанії близько тонни пластику (рис. 18).



Рис. 18. Еко-упакування компанії JOHNSON'S Baby

Варто відзначити, що лише 76% матеріалу паку – це паперова складова. 24%, що залишилися, припадають на пластики, до використання яких довелося вдаватися для захисту формули всередині та збереження структури упаковки. Незважаючи на використання невеликої кількості пластиків, JOHNSON'S Baby стверджує, що пакет повністю підходить для переробки стандартними технологіями переробки картону. У дизайн еко-упаковки включено покрокову графічну інструкцію, яка пояснює, як наповнити існуючу пластикову пляшку, а також QR-код, який споживачі можуть відсканувати, щоб отримати відеоінструкції з цього питання та інформацію про утилізацію порожньої коробки. Зараз ці паки вже надійшли у продаж у Великій Британії, а до кінця року компанія планує вийти з ними на ринки Європи, Близького Сходу та Африки [51].

Успішне впровадження та реалізація цих альтернатив вимагає співпраці між урядом та виробниками для подальшої популяризації та стимулювання використання лише екологічних матеріалів. Також важливим етапом є підтримка у вигляді інновацій для підтримання виробництва екологічно чистих матеріалів, які дадуть змогу зменшити вартість і збільшити доступність цих товарів для споживача.

3. Збільшення загальної обізнаності громадськості

Соціальні кампанії та різноманітні освітні програми суттєво впливають на свідомість населення, надаючи допомогу людям зрозуміти, який негативний вплив має одноразовий пластик на природу. Ці програми мають змогу переконати громадян вибирати екологічні багаторазові матеріали та продукти замість традиційних одноразових. В країнах, де такі програми активно використовуються, зазвичай спостерігається суттєве збільшення використання багаторазових сумок, посуду, столових приборів та упаковки. Зміна особистих звичок є важливим кроком у боротьбі із забрудненням пластиком. Підвищена обізнаність має перспективу призвести до зниження попиту на одноразовий пластик.

В цілому зниження виробництва та використання одноразового пластику є важливим етапом на шляху до сталого розвитку та охорони довкілля. Це вимагає значних зусиль як з боку держав та бізнесу, так і кожної особи окремо, для того, щоб підвищити загальну екологічну обізнаність та зменшити використання матеріалів, котрі здатні нанести шкоду компонентам довкілля.

3.4. Технологічні вдосконалення для підвищення ефективності переробки пластику

Ефективність способів переробки пластику є надзвичайно важливою складовою для зменшення кількості відходів, покращення якості вторинного матеріалу і збереження природних ресурсів. Сьогодні технологічні досягнення в даній сфері надають нові можливості для збільшення продуктивності, а також зниження негативного впливу пластиків на довкілля. Нижче будуть розглянуті основні напрямки вдосконалення технологій переробки пластику.

1. Розвиток селективного сортування.

Останні передові технології, такі як штучний інтелект та робототехніка, активно застосовуються для автоматизації процесу сортування відходів з пластику. Це не лише прискорює швидкість роботи, але й суттєво збільшує точність та ефективність сортування. Завдяки системам із штучним інтелектом

різні типи пластиків можуть бути відокремлені з потоку відходів, а це в свою чергу забезпечує їхню кращу переробку, ніж би цей процес виконувався неавтоматизовано. Системи, які використовують сучасний комп'ютерний зір, мають змогу розпізнавати різні відтінки та текстури матеріалів, знижуючи кількість домішок, і, як результат, забезпечуючи отримання якісної вторинної сировини. З таким підходом зменшується ризик забруднення перероблених матеріалів, що покращує їх конкурентоспроможність на ринку переробки і вторинного використання. Сортування відходів революціонується за допомогою систем, що застосовують штучний інтелект. Наприклад, компанія Cortex від AMP Robotics сортує перероблені матеріали за допомогою машинного навчання та комп'ютерного зору з небаченою раніше швидкістю – 160 одиниць за хвилину. Це ефективно знижує забруднення в потоках переробки та підвищує рентабельність процесу переробки [52].

Данські вчені з Орхуського університету навчили штучний інтелект виявляти сигнали, що відповідають основним видам пластмаси: поліетилену, поліпропілену, полістиролу та інших матеріалів. Він аналізує інформацію, одержану з даних гіперспектральних зйомок в інфрачервоному діапазоні. У результаті дослідження система навчилася розпізнавати 12 видів пластику (PE, PP, PET, PS, PVC, PVDF, POM, PEEK, ABS, PMMA, PC та PA12) побутового та промислового призначення з точністю до 96%. Вчені вже закінчили пілотні випробування та починають апробацію технології на місцевих підприємствах з переробки відходів [53].

2. Вдосконалення методів хімічної переробки

Хімічні методи переробки, такі як піроліз, гідроліз та метаноліз, мають великий потенціал для утилізації пластику, який не підлягає механічній переробці. Оптимізація та покращення цих технологій надають змогу більш ефективно переробляти забруднені пластикові відходи. Піроліз здатний перетворювати пластик у синтез-газ або олію, котра може бути використана як сировина для нового пластику. Покращення та удосконалення умов реакції, таких як тиск і температура, можуть суттєво покращити вихід цінних

продуктів, мінімізуючи обсяги неутилізованого пластику, котрий викидається на звалища або потрапляє до компонентів навколишнього середовища.

Наприклад, відомо, що ензими – природні каталізатори, що впливають на перебіг біохімічних реакцій в клітинах живих організмів, можуть залучатись до процесів розкладання пластику. Прикладом успішного використання є PET-аза, який бере участь у реакціях розкладу компонентів PET-пляшок. Проводяться дослідження для пришвидшення протікання реакцій за участю PET-ази [29].

Команда вчених з Паризького університету ESPCI працює над створенням ензимів, які можуть розкладати полімери на основні складові-мономери. Вони залучили можливості штучного інтелекту, який прискорює процес пошуку потенційно успішної формули серед незліченної кількості варіантів.

3. Інноваційні рішення для біотехнологічної переробки:

Технологічні вдосконалення у галузі переробки пластику можуть значною мірою покращити ефективність та якість утилізації відходів. Інтеграція сучасних технологій у процеси переробки є важливою умовою для утворення стійкої економіки, де пластик не лише переробляється та утилізується, але й отримує нове життя в інших продуктах. Це не тільки дає змогу зменшити навантаження на природу екосистем, але й надає нові можливості для інновацій у промисловості. Революційна новація - перетворення непереробних відходів на енергію. За допомогою процесів анаеробного зброджування переробляються органічні відходи на біогаз, а піроліз перетворює пластик на низьковуглецеве паливо. Енеркем та ГрінМантра Технології Компанії є прикладами фірм, які впроваджують інновації та просувають концепцію рішення щодо переробки відходів в енергію з метою зниження залежності від використання звалищ та скорочення викидів парникових газів.

3.5. Стимулювання зменшення утворення пластикових відходів

Попередження про відповідальність за утворення пластикових відходів є складовою стратегії зниження негативного впливу пластику на природу. Цей процес вимагає комплексного підходу, та включає в себе заходи, котрі спонукають громадян та підприємства зменшувати кількість використання пластикових виробів. У цьому контексті є сенс розглянути декілька ключових стратегій, які здатні ефективно повпливати на зниження кількості утворення пластикових відходів.

1. Екологічне оподаткування

Пропонується введення податку на використання одноразового пластику, яке може значно стимулювати підприємства та установи зменшити його споживання, паралельно цьому збільшити фінансування різних екологічних проєктів. У багатьох країнах, які вже запровадили подібні заходи, було помічено суттєве зменшення використання пластикових пакетів. Такі податки не тільки спонукають споживачів до заміни одноразового пластику на багаторазові альтернативи, але й надають можливість спрямувати додаткові кошти з податку на фінансування різноманітних програм, які розроблені для захисту довкілля, зокрема програми освіти населення стосовно екологічних проблем, очищення територій від пластику та впровадження технологій утилізації та переробки.

2. Екологічне маркування та стандартизація.

Надання споживачам можливості вибору продукції з екологічною маркою, яка вказує на те, що товар виготовлено з переробленого або біорозкладного матеріалу, може значно підвищити обізнаність населення про важливість зменшення пластикових відходів. Впровадження таких стандартів та їхня підтримка на рівні держави дозволяє споживачам усвідомлено підходити до вибору товарів, зокрема віддавати перевагу екологічно чистим альтернативам. Ця практика також може спонукати виробників до впровадження сталих практик у своїх бізнес-моделях, що, в свою чергу, зменшить кількість відходів [54].

Так, у Греції з 1 січня 2018 року запровадили екологічний податок на використання одноразових пластикових пакетів. Відтоді за кожен пакет потрібно було доплачувати 4 євроценти, з 2019 року податок зріс до 9 євроцентів. Введенням екологічного податку Греція намагається скоротити кількість поліетиленових пакетів, які стали одним із головних чинників забруднення навколишнього середовища. Влада країни вирішила стимулювати утилізацію пакетів та використання багаторазових сумок.

3. Підтримка екологічних стартапів:

Залучення інвестицій та підтримка інноваційних стартапів, які пропонують рішення для зменшення пластикових відходів, мають перспективу стати потужними засобами у боротьбі з проблемою забруднення пластиком. Стартапи та подібні проєкти можуть розробити нові технології для переробки, які будуть ефективними та сучасними, матимуть змогу створювати екологічно чисті матеріали, що є альтернативами традиційним пластиковим матеріалам. Окрім того, нові стратегії та бізнес-моделі, що передбачають сучасний підхід, враховуючи тенденцію екологічного розвитку з повторним використанням матеріалів, яка дає змогу суттєво зменшити кількість відходів. Підтримка подібних ініціатив, зокрема завдяки програмам фінансування та партнерству з державою, може значною мірою пришвидшити запровадження інновацій у сфері утилізації відходів [55-59].

Впровадження різноманітних стимулів, які можуть заохотити до зменшення утворення пластикових відходів, є відповідальним та перспективним кроком в напрямку розвитку екологічно здорового суспільства. Це потребує не лише співпраці між урядами та бізнесом, а і з суспільством у цілому. Для того, щоб створити сприятливі умов, котрі в свій час допоможуть зменшити негативний вплив пластику на довкілля та сприятимуть формуванню свідомого використанню. Прикладом може бути програма від ЄС, яка пропонує 50000 євро за екологічний стартап, який передбачав би розробку дієвих методів щодо управління відходами з пластику [60].

Єврокомісія проголосила боротьбу з пластиком сміттям основною темою конкурсу, що проводився у 2019 році і стосувався соціальних інновацій – European Social Innovation Competition. Засновники проаналізували подані на конкурс проекти, бізнес-моделі, сервіси та окремі рішення для зниження кількості пластикового сміття. Три найбільш інноваційні та революційні ідеї отримали по 50000 євро на їхню реалізацію. Н конкурсі відзначили тих учасників, які запропонували значну оптимізацію переробки або повторного використання пластикового сміття, а також працюючий механізм зменшення появи пластикових відходів.

Таким чином, тільки об'єднанням зусиль на всіх рівнях – від державного до особистого – можна досягти суттєвих змін у використанні пластику та утилізації пластикових відходів і покращити якість життя сьогоdnішнім та майбутнім поколінням

3.6. Розвиток міжнародної співпраці у вирішенні проблеми пластикових відходів

Проблематика пластикового засмічення є однією з найбільших екологічних загроз сьогоdnення, відповідно вона не може стосуватись тільки окремо взятої країни. Це масштабний виклик, який вимагає докладання надзвичайних зусиль на міжнародному рівні для координації подальших дій, направлених на зниження утворення пластикових відходів та поліпшення технології їх переробки та утилізації. У цьому контексті міжнародна співпраця та її розвиток є надзвичайно важливим аспектом. Вирішення проблеми забруднення пластиком потребує комплексного підходу, що включає не тільки регулювання та контроль щодо пластику, а й обмін досвідом у боротьбі з проблемою забрудненням цим матеріалом. Сюди ж доєднуються і програми фінансової підтримки та обмін знаннями та технологіями з країнами, у яких є значні проблеми щодо вирішення викликів використання та перероблення пластику.

1. Міжнародні угоди і ініціативи

На міжнародних рівнях активна робота відбувається через різні угоди та програми, основною метою яких є зменшення пластикового забруднення. Зокрема, Організація Об'єднаних Націй та інші міжнародні організації створюють та впроваджують численні ініціативи, які мають на меті зменшити кількість пластикових відходів у глобальному масштабі. Важливим документом у цьому напрямку є Глобальна угода по пластику (Plastic Treaty). Ця угода включає в собі комплексні заходи, котрі охоплюють обмеження виробництва одноразового пластику, поліпшення систем його утилізації та спонукає до розвитку екологічних альтернатив [61].

Глобальна угода – це не тільки зобов'язання країн-учасниць, а й робочі механізми контролю за виконанням або не виконанням зобов'язань, що включає регулярні моніторинги та звітування перед країнами. Це дає змогу оцінити прогрес у реалізації заходів та своєчасно коригувати стратегію для досягнення поставлених цілей. Окрім того, ініціативи на зразок вищезгаданих, сприяють укладенню різноманітних угод між окремими країнами про співпрацю, що покращує ефект боротьби із пластиковим забрудненням на регіональних рівнях.

У 2022 році 175 країн проголосували на Асамблеї ООН про підписання Глобальної угоди щодо припинення пластикового забруднення [38]. З огляду на терміновість країни прагнули затвердити юридично обов'язковий договір до 2025 року. З того часу пройшло більше чотирьох переговорних зустрічей, включаючи останню у квітні 2024 року в Канаді. Багато країн та коаліція союзників наполягають на укладенні цього договору, незважаючи на опір деяких країн, адже він має вирішальне значення для здорового та сталого майбутнього.

2. Обмін технологіями та знаннями

Міжнародна співпраця країн має важливе значення у сфері обміну знаннями та технологіями. Країни, що мають доступ до новітніх технологій переробки пластмас, можуть ділитися своїм досвідом з іншими державами, яким потрібна допомога у запровадженні новітніх ефективних методів

утилізації. Співпраця відбувається через двосторонні та багатосторонні угоди, в межах яких країни обмінюються досвідом, технологіями та науковими досягненнями.

Подібні ініціативи дають змогу країнам із слабкою економікою та обмеженими ресурсами, які нездатні самостійно вводити сучасні технології, отримувати доступ до протестованих на практиці рішень. До прикладу, країни з добре розвинутою галуззю переробки пластику можуть надати технічну документацію та провести навчання для спеціалістів з країн, які лише починають поступово впроваджувати програми з переробки та утилізації пластикових відходів. Подібний обмін знаннями та досвідом підвищує ефективність переробки, та формує національні стратегії управління відходами, які враховують своєрідні умови та вимоги кожної країни.

3. Фінансова підтримка програм утилізації

Фінансова підтримка – ще один важливий аспект міжнародної співпраці для вирішення проблеми пластикових відходів. Розвинуті країни можуть надавати фінансову підтримку для розвитку інфраструктури збору та переробки пластику в країнах, що тільки почали розвивати цей напрямок. Це може включати в себе гранти, кредити або інвестиції, направлені на створення переробних підприємств, модернізацію вже існуючих систем або розробку нових програм по управлінню відходами пластиків.

Такі ініціативи сприяють зменшенню пластикового сміття та стимулюють економічний розвиток країни, яка отримує цю підтримку. Інвестиції у систему збору та переробку відходів можуть надати нові робочі місця громадянам, покращити екологічну ситуацію в регіоні та поліпшити якість життя населення за рахунок зменшення забруднення. Це впливає на глобальну екологічну ситуацію, тому що покращення інфраструктури навіть точково в одній країні може значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище в усьому світі.

4. Глобальні освітні програми

Міжнародна співпраця у виявленні та вирішенні проблеми пластикових відходів включає в себе і реалізацію глобальних освітніх програм, які створені для того, щоб підвищити обізнаність населення на рахунок проблематики пластикового забруднення довкілля. Подібні програми проводяться як на рівнях міжнародних організацій, так і на рівнях окремих країн. Вони включають кампанії з оповіщення та інформування громадськості про шкоду пластикового забруднення природи, а також освітні ініціативи, направлені на формування екологічної свідомості серед підростаючого покоління.

Інформуванням населення можна досягти зміною думок, поведінки та дій громадян та заохотити їх до свідомого зменшення використання пластику. Подібні освітні програми включають в себе тренінги, семінари, конференції, інтерактивні курси, які здатні допомогти людям усвідомити, як їхні щоденні рішення та дії здатні впливати на навколишнє середовище.

5. Партнерство між державами та приватним сектором

Одним із основних аспектів міжнародної співпраці є розвиток партнерства з державами та приватним сектором. Підприємства мають змогу відігравати ключову роль в зменшенні кількості пластикових відходів, впроваджуючи нові технології, які значно знижують використання пластику в їхніх продуктах. Паралельно цьому розробляються екологічно чисті альтернативи. Уряди мають змогу на державному рівні стимулювати ці процеси через податкові пільги, гранти або будь-які інші доступні форми фінансової підтримки.

Співпраця між державою та бізнесом включає в себе суспільні ініціативи з утилізації відходів пластиків, які сприяють утворенню кругової економіки. Компанії можуть запроваджувати різні програми повернення вже використаних продуктів для їхньої подальшої переробки, а уряди мають підтримувати подібні програми на рівні законодавства. Це надасть можливість значно зменшити кількість відходів, котрі потрапляють на звалища та зможе покращити ефективність утилізації.

6. Виклики та перспективи

Попри всі зусилля проблема світового пластикового забруднення залишається досить складною та вимагає продовження міжнародної співпраці. Виклики, з якими людство зіткнулось щодо проблеми утилізації або переробки пластику, досить складні. Вони вимагають невідкладного вирішення вже зараз, оскільки відкладання цих проблем та їхнє невирішення може обернутись катастрофічними наслідками. Перед людством стоїть ряд проблем, такі як нерівномірний розвиток інфраструктури в різних країнах, економічні обмеження, які обумовлені статусом країни, а також різні політичні інтереси, можуть суттєво ускладнити досягнення глобальних цілей.

Перспективи для посилення подальшої міжнародної співпраці у вирішенні проблеми пластикових відходів присутні. Посилення ролі на міжнародних аренах різних організацій, таких як ООН, ВООЗ, ЮНЕСКО та інші, можуть допомогти в правильній, з точки глобального рівня, координації зусиль. Систематичне вивчення та покращення знань, обмін інформацією про успішні практики та розвиток технологій, а також інвестиції у стійкі рішення зможуть стати запорукою вдалої боротьби з пластиковим забрудненням у навколишньому середовищі.

Вирішення проблеми пластикових відходів вимагає спільних зусиль усіх країн, міжнародних організацій, приватного сектора та суспільства. Лише через суспільну відповідальність та консолідацію об'єднаних зусиль, реалізацію спільних стратегій можна зменшити масштаби пластикового забруднення та зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь. Міжнародна співпраця, незважаючи на політичні неузгодження у цій сфері, є ключем, що дозволяє відкрити двері до екологічного майбутнього та забезпечити стале майбутнє планети та її мешканців.

РОЗДІЛ 4. СТАН ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ У ЛЬВОВІ

Переробка пластикового пакування в містах є надзвичайно важливим аспектом стратегії управління відходами та охорони навколишнього середовища. Це питання стоїть на передньому плані екологічної політики багатьох країн світу, оскільки пластикові відходи становлять серйозну загрозу для екосистем і здоров'я людей. З кожним роком зростає обсяг виробництва пластику, і, відповідно, збільшується кількість пластикових відходів, які потрапляють у навколишнє середовище. Особливо це питання актуальне для міст, де щільність населення висока, а отже, й обсяги споживання різних товарів у пластиковій упаковці також значні.

Місто Львів, яке є одним з найбільших і найрозвиненіших міст України, стикається з багатьма викликами, пов'язаними з утворенням пластикових відходів. У Львові, як і в багатьох інших містах, спостерігається стрімке зростання кількості одноразових пластикових виробів, що потребують своєчасного та ефективного вирішення проблеми їх утилізації. Незважаючи на певні досягнення в цій галузі, існуюча система збору та переробки пластикового пакування все ще має значні недоліки, які потребують термінового вирішення.

У цьому розділі ми докладно розглянемо сучасний стан переробки пластикового пакування у Львові, проаналізуємо проблеми, з якими стикається місто у цій сфері, а також визначимо можливості для покращення існуючих процесів. Важливо зрозуміти, що ефективна переробка пластику не тільки зменшує негативний вплив на довкілля, а й сприяє економічному розвитку міста через створення нових робочих місць, підвищення рівня життя населення та формування свідомості щодо важливості екологічних ініціатив [1]. Зрештою, успішна реалізація стратегії переробки пластикового пакування у Львові може стати прикладом для інших міст України, заохочуючи до впровадження інноваційних підходів у сфері екології та управління відходами.

4.1. Сучасний стан переробки пластикових відходів у місті

У Львові функціонує система збору та переробки відходів, яка передбачає кілька важливих етапів обробки пластикового упакування, включаючи його збір, сортування, очищення, подрібнення та повторне використання для виробництва нових матеріалів, що значно зменшує негативний вплив на навколишнє середовище, зокрема, щодо меншого обсягу кількості відходів, що потрапляють на звалища.

Основні пункти:

1. Система збору. У Львові працює система збору вторинної сировини, яка включає спеціально організовані контейнери для пластикового упакування. Ці контейнери розміщені у різних районах міста, що робить їх легкодоступними для всіх мешканців. Завдяки такій організації збору, жителі можуть без зусиль викидати пластикові відходи у спеціалізовані місця, що сприяє підвищенню рівня переробки та зменшенню забруднення довкілля (рис. 19).



Рис. 19. Контейнеру для збору побутового пластикового упакування у місті Львові

Зручність доступу до контейнерів мотивує громаду активно долучатися до екологічних ініціатив, а також підвищує свідомість населення про важливість вторинного використання матеріалів. Система збору вторинних сировини є важливим кроком у напрямку до сталого розвитку міста та покращення його екологічної ситуації, створюючи умови для більш ефективного управління відходами.

2. **Обробка відходів.** На сьогодні у Львові працюють різні компанії та лабораторії, які займаються переробкою пластику. Наприклад, лабораторія рециклінгу Zelenew перероблений пластик використовує для виробництва посуду, зокрема пластикових підставок (рис. 20).



Рис. 20. Продукція із вторинного пластику, яку виготовляє компанія Zelenew

Компанія “ПЛАСТ ЛОМ” відповідає у Львові за переробку зібраних відходів, збір яких забезпечує ЛКП «Зелене місто» (рис. 21). Вони здійснюють механічну переробку, при якій пластикові відходи подрібнюються, очищуються та переплавляються у вторинну сировину. Це дозволяє зменшити обсяг відходів, що потрапляють на звалища.



Рис. 21. Збір пластикових відходів для перероблення

3. Обсяг переробки пластикових відходів у Львові

Переробка пластикових відходів є критично важливою частиною стратегії управління відходами у Львові. За даними місцевих екологічних організацій, на сьогоднішній день у місті переробляється близько 20-30% пластикових відходів. Цей показник суттєво нижчий порівняно з багатьма європейськими містами, де рівень переробки пластику сягає 50% і більше. Це викликає стурбованість серед екологів і місцевих активістів, адже недостатня переробка пластикових відходів призводить до збільшення обсягів сміття на звалищах та забруднення навколишнього середовища.

4.2. Проблеми, що ускладнюють переробку пластикових відходів

Переробка пластикового упакування в Україні, і зокрема у Львові, є важливою частиною стратегії зменшення екологічного впливу пластикових відходів. Однак навіть за наявності системи збору та переробки, місто стикається з низкою серйозних проблем, які ускладнюють ефективність цього процесу. У цьому розділі ми детально розглянемо основні труднощі, що заважають підвищити обсяги переробки пластикових відходів [63].

1. Низька обізнаність населення

Однією з ключових проблем, що ускладнюють переробку пластикового упакування у Львові, є низька обізнаність населення щодо правил сортування відходів. Багато мешканців міста не знають, які саме пластикові вироби

підлягають переробці, а які – ні. Як наслідок, пластик часто змішується з іншими видами сміття, що ускладнює процес переробки (рис. 22).



Рис. 22. Приклад змішування пластикових відходів із іншими відходами

Відсутність освіти щодо екологічних практик

Екологічні знання та практики повинні впроваджуватися вже з раннього віку, починаючи з шкільної програми. Однак у Львові ця проблема залишається невирішеною. В школах недостатньо уваги приділяється екологічному вихованню, а наявні матеріали зазвичай не актуалізовані. Таким чином, діти не отримують належних знань, які б потім могли впливати на їхні звички у дорослому житті.

Неправильні уявлення про переробку

Додатковою проблемою є неправильні уявлення про переробку. Багато людей вважають, що якщо пластик потрапляє до контейнера для переробки, він обов'язково буде перероблений, незалежно від того, чи був він правильно відсортований. Це призводить до недооцінки важливості дотримання правил сортування, що, в свою чергу, впливає на якість вторинної сировини.

2. Неправильне сортування

Наступною серйозною проблемою є неправильне сортування відходів. Відсутність чітких вказівок на контейнерах для збору пластикових відходів призводить до того, що в них потрапляють небезпечні або несортовані

матеріали. Це значно знижує якість вторинної сировини і, як наслідок, ускладнює подальшу переробку.

Однією з причин неправильної практики сортування є відсутність єдиної системи маркування на контейнерах для збору вторинної сировини. Мешканці можуть бути не впевнені, який пластик приймається для переробки, а які матеріали слід викидати у звичайне сміття (рис. 23). Залучення кольорового кодування та зрозумілих символів могло б полегшити цей процес.



Рис. 23. Приклади несвоєчасного вивезення побутових відходів

Для ефективної переробки пластикових відходів необхідно розвивати інфраструктуру, яка включає не лише контейнери для збору, але й підприємства для обробки відходів. На сьогоднішній день у Львові існує недостатня кількість таких підприємств, що ускладнює переробку пластикового упакування.

Ситуація з недостатньою кількістю переробних заводів є серйозною перешкодою для ефективної переробки. Багато відходів, які могли б бути перероблені, просто відправляються на звалище, оскільки немає можливостей для їх обробки. Це, в свою чергу, сприяє збільшенню обсягів пластикового сміття на території міста.

Переробка пластику потребує інвестицій у технології та обладнання. Брак фінансування часто заважає впровадженню нових, більш ефективних технологій переробки. Це, в свою чергу, впливає на якість вторинних матеріалів і їх придатність для повторного використання.

Один з основних викликів, з яким стикаються органи місцевого самоврядування, — це обмежений бюджет. Часто кошти, що виділяються на утилізацію відходів, є недостатніми для фінансування необхідних заходів, таких як модернізація обладнання чи розширення інфраструктури.

Окрім технічних і фінансових аспектів, слід також звернути увагу на економічні та соціальні фактори, які впливають на переробку пластикового упакування. В умовах економічної нестабільності багато людей просто не можуть собі дозволити купувати екологічні альтернативи до пластикових продуктів, а також звертати увагу на правильне сортування відходів.

Соціальна відповідальність підприємств також має значення. Компанії, які виробляють пластикову упаковку, повинні усвідомлювати свій вплив на навколишнє середовище і вживати заходів для зменшення відходів.

Проблеми, що ускладнюють переробку пластикового упакування у Львові, є багатогранними та вимагають комплексного підходу для їх вирішення. Низька обізнаність населення, неправильне сортування відходів, обмежена інфраструктура, брак фінансування та економічні фактори є основними перепонами на шляху до підвищення обсягів переробки. Проте зусилля у напрямку освітніх кампаній, розвитку інфраструктури, залучення інвестицій та міжнародної співпраці можуть суттєво покращити ситуацію, допомагаючи Львову стати більш екологічно відповідальним містом.

4.3. Можливості для покращення процесів переробки

Для підвищення ефективності переробки пластикового упакування у Львові існують кілька можливостей:

1. Проведення освітніх кампаній

Реалізація програм, спрямованих на підвищення обізнаності населення про важливість роздільного збору відходів, може суттєво покращити

ситуацію. Інформаційні кампанії, семінари та освітні програми в школах і громадах можуть допомогти зміцнити відповідальність мешканців.

2. *Запровадження нових технологій.*

Інвестування в нові технології переробки, такі як автоматизовані системи сортування, можуть покращити якість переробленої сировини та зменшити витрати на обробку. Використання новітніх технологій дозволить підвищити ефективність збору і переробки відходів.

3. *Розвиток інфраструктури.*

Збільшення кількості пунктів збору вторинної сировини та створення нових підприємств з переробки можуть сприяти збільшенню обсягів перероблених пластикових відходів. Важливо також розвивати інфраструктуру для збору та транспортування відходів до місць переробки.

4. *Партнерство з бізнесом.*

Співпраця з місцевими підприємствами може сприяти розвитку сталих практик у використанні пластикового упакування. Бізнес може брати активну участь у програмах по переробці, а також впроваджувати альтернативні рішення, такі як багаторазова упаковка.

5. *Залучення міжнародної допомоги.*

Львів може скористатися досвідом інших міст і країн, залучаючи міжнародні інвестиції та програми, спрямовані на поліпшення екологічної ситуації. Участь у міжнародних проектах та ініціативах може забезпечити фінансування та технічну підтримку.

4.4. Приклади успішних ініціатив щодо перероблення пластику у Львові

У Львові також реалізуються кілька ініціатив, які сприяють поліпшенню переробки пластикового упакування:

1. Кампанії з збору вторинної сировини.

Місцеві екологічні організації проводять акції з метою збору пластикових відходів. Ці акції залучають мешканців до активної участі у процесі переробки.

2. Партнерство з освітніми установами.

Деякі школи та університети беруть участь у програмах екологічного виховання, які включають практичні заняття зі збору та переробки пластиків.

3. Співпраця з бізнесом.

Місцеві компанії все частіше впроваджують екологічні практики у своїй діяльності, наприклад, переходять на багаторазові упаковки або надають знижки на повторне використання упаковки.

Таким чином, стан переробки пластикового упакування в місті Львові демонструє як досягнення, так і проблеми, з якими стикається місто. Важливість підвищення обізнаності населення, розвитку інфраструктури, впровадження нових технологій та партнерства з бізнесом є ключовими факторами для покращення ситуації. Успішна реалізація цих заходів може суттєво зменшити обсяги пластикових відходів та їх негативний вплив на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ

При написанні розділу 5 використовувались положення, наведені у [64].

5.1. Дотримання охорони праці при заборі і транспортуванні пластикових відходів.

Пластикові відходи у місті Львові забираються з окремих контейнерів, розташованих у різних районах за допомогою сміттєзбиральних машин. Їхні водії та особи, що обслуговують ці машини повинні дотримуватись правил щодо руху транспортних засобів у житлових кварталах, зокрема рухатись з невисокою швидкістю, а під'їзд чи від'їзд до/від сміттєвих контейнерів здійснювати тільки переконавшись, що поблизу немає людей. Скидання сміття у відділення сміттєзбиральних машин потрібно проводити так, що не завдати шкоди працівникам, що залучені до цього процесу. Працівники мають мати спецодяг і засоби індивідуального захисту, щоб убезпечити себе від неприємних запахів і потрапляння бруду на їхній одяг.

5.2. Дотримання охорони праці працівниками сортувальних ліній і підприємств з переробки пластикових відходів

Працівники, що відповідають за сортування пластикових відходів мають проводити ці роботи у спеціальному одязі та рукавицях. При роботі на сортувальних лініях слідкувати за справністю електричних мереж для запобігання ураження струмом. Працівники, відповідальні за виконання певних операцій на підприємстві, повинні досконало знати процес і обладнання, щоб своєчасно виявляти поломки і усувати їх.

5.3. Дотримання правил безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій.

Надзвичайні ситуації можуть бути спричинені масштабними пожежами у виробничих приміщеннях підприємств, які переробляють пластикові відходи, або внаслідок обстрілів ракетами. Останнє може привести до руйнування будівель і потрапляння людей під завали. Тому при повітряній тривозі потрібно припинити виробничі процеси там, де це можливо, а персонал має

перемістися в укриття, покинете яке можна тільки після закінчення повітряної тривоги і оголошення відбою

ВИСНОВКИ

1. Класифікація пластиків за їхнім хімічним походженням вказує на специфіку способу використання визначених пластикових матеріалів у певній сфері людської діяльності.

2. Пластик може потрапити до навколишнього середовища різними шляхами: з організованих полігонів, стихійних сміттєзвалищ чи при виникненні аварійних ситуацій на транспорті.

3. Утворення деградованих частинок пластику і потрапляння їх у водні об'єкти, ґрунти чи підземні води відбувається під дією зовнішніх факторів – механічного тиску чи атмосферних впливів.

4. Продукти деградації пластиків негативно впливають на природні екосистеми та порушують функціонування живих організмів.

5. Існуючі технології переробки пластику включають механічне, хімічне та високотемпературне перероблення.

6. Ефективна стратегія щодо управління пластиковими відходами є реалізації принципів циркулярної економіки і зведення до мінімуму можливостей його потрапляння до довкілля.

7. Проблема з пластиковими відходами у місті Львів вирішуються недостатньо ефективно: переробляються приблизно 20-30% всіх існуючих пластикових відходів.

8. Вирішення проблеми пластикових відходів потребує комплексного підходу, який поєднує технології, можливості бізнесу для підтримання інноваційних рішень, соціальну відповідальність населення та активну державну політику щодо мінімізації впливу пластику на довкілля.

ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Types of Plastic: Guide to Different Plastic Types- Plastic Pollution Blogger | Apr 17, 2024 | PC Blog Post // <https://www.plasticcollective.co/types-of-plastic-guide-to-different-plastic-types/>
2. Merlin NI Balasubramanian K Effect of microplastics in water and aquatic systems *Environmental Science and Pollution Research* (2021) 28:19544–19562.
3. Mintenig, S.M., Loder, M.G.J., Primpke, S., Gerdts, G. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Sci. Total Environ.* 2019. 648, 631–635.
4. Kuok Ho Daniel Tang, Tony Hadibarata, Microplastics removal through water treatment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management, *Environmental Challenges*, Volume 5, 2021, 100264, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100264>
5. Magalhães S., Alves L., Medronho B., Romano A., da Graça Rasteiro M. Microplastics in Ecosystems: From Current Trends to Bio-Based Removal Strategies. *Molecules*. 2020;**25**:3954. doi: 10.3390/molecules25173954.
6. Пустовалов, О. В. (2022). Пластикові відходи та їх вплив на довкілля: стан і тенденції. «Екологічний моніторинг», 4(2), 36-40.
7. Brigitte Toussaint, Barbara Raffael, Alexandre Angers-Loustau, Douglas Gilliland, Vikram Kestens, Mauro Petrillo, Iria M. Rio-Echevarria & Guy Van den Eede (2019) Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain, *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36:5, 639-673, DOI: 10.1080/19440049.2019.1583381
8. Скупчення пластикових відходів утворюють у світовому океані нові острови // <https://cikavosti.com/skupchennya-plastykovyh-vidhodiv-utvoryuyut-u-svitovomu-okeani-novi-ostrovy/>
9. Гігантський "острів" з пластикового сміття утворився в морі біля Корсики // <https://vinbazar.com/journal/nshe/gigantskiy-ostriv-z-plastikovogo-smittyu-utvorivsyu-v-mori-bilya-korsiki>
10. Campanale C, Massarelli C, Savino I, Locaputo V, Uricchio VF. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(4):1212. doi:10.3390/ijerph17041212.
11. Pico Y, Barcelo D. Analysis and Prevention of Microplastics Pollution in Water: Current Perspectives and Future Directions. *ACS Omega* 2019, 4, 6709–6719: <http://pubs.acs.org/journal/acsodf>.
12. Zhefu Yu, Xiaolu Xu, Liang Guo, Seyit Yuzuak, Yin Lu, Physiological and biochemical effects of polystyrene micro/nano plastics on *Arabidopsis thaliana* // *Journal of Hazardous Materials*, Volume 469, 2024, 133861, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133861>.

13. Damià Barceló, Yolanda Picó, Ahmed H. Alfarhan, Microplastics: Detection in human samples, cell line studies, and health impacts, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Volume 101, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104204>.
14. Yue Li, Liping Chen, Nonglin Zhou, Yuyuan Chen, Zhichen Ling, Ping Xiang, Microplastics in the human body: A comprehensive review of exposure, distribution, migration mechanisms, and toxicity, *Science of The Total Environment*, Volume 946, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174215>.
15. Zurub RE, Cariaco Y, Wade MG, Bainbridge SA. Microplastics exposure: implications for human fertility, pregnancy and child health. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2024 Jan 4;14:1330396. doi: 10.3389/fendo.2023.1330396. PMID: 38239985; PMCID: PMC10794604.
16. Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2020). Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources. *Science of The Total Environment*, 141948. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1419.
17. Schymanski, D., Oßmann, B.E., Benismail, N. et al. Analysis of microplastics in drinking water and other clean water samples with micro-Raman and micro-infrared spectroscopy: minimum requirements and best practice guidelines. *Anal Bioanal Chem* 413, 5969–5994 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03498-y>.
18. Zhang, B., Chao, J., Chen, L., Liu, L., Yang, X., & Wang, Q. (2020). Research progress of nanoplastics in freshwater. *Science of The Total Environment*, 143791. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.14371.
19. Valsesia A, Parot J, Ponti J, Mehn D, Marino R, Melillo D, Muramoto Sh, Verkouteren M, Hackley VA, Colpo P. Detection, counting and characterization of nanoplastics in marine bioindicators: a proof of principle study. *Microplastics and Nanoplastics* (2021) 1(5):1-13/<https://doi.org/10.1186/s43591-021-00005-z>.
20. Tagg AS, Sapp M, Harrison JP, Sinclair CJ, Bradley E, Ju-Nam Y and Ojeda JJ (2020) Microplastic Monitoring at Different Stages in a Wastewater Treatment Plant Using Reflectance Micro-FTIR Imaging. *Front. Environ. Sci.* 8:145. doi: 10.3389/fenvs.2020.00145.
21. Існюк С. & Радовенчик, Я. (2021). Сучасні технології переробки пластикових відходів в Україні. 169-172. DOI: 10.20535/EHS.2021.232578
22. Вакуленко, О. В. (2020). Переробка пластикових відходів: досвід України та світу. «Екологічний журнал», 6(2), 45-52.
23. В.М. Сторожук, О.В. Мельник, Б.Я. Кшивецький, Г.В. Сомар, І.А. Соколовський, О.М. Маєвська Технології захисту навколишнього середовища. Поводження з відходами. Підручник. М-во освіти і науки України. Нац. лісотехн. ун-т України. - К. Вид. дім «Професіонал» 2023. - 354 с. ISBN978-966-570-837-7.

24. Державна екологічна інспекція України. (2022). «Звіт про стан довкілля в Україні за 2021 рік». Київ: Держекоінспекція України.
25. Єфремова, І. Г. (2019). Екологічні аспекти утилізації пластикових відходів. «Науковий вісник НЛТУ України», 29(3), 50-55.
26. Walter A, Sopracolle L, Mutschlechner M, Spruck M, Griesbeck C. Biodegradation of different PET variants from food containers by *Ideonella sakaiensis*. *Arch Microbiol.* 2022 Nov 16;204(12):711. doi: 10.1007/s00203-022-03306-w. PMID: 36385587; PMCID: PMC9668955.
27. Srikanth, M., Sandeep, T.S.R.S., Sucharitha, K. *et al.* Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresour. Bioprocess.* **9**, 42 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
28. Yi Lin Lee, Nardiah Rizwana Jaafar, Jonathan Guyang Ling, Fahrul Huyop, Farah Diba Abu Bakar, Roshanida A. Rahman, Rosli Md. Illias,
29. Cross-linked enzyme aggregates of polyethylene terephthalate hydrolyse (PETase) from *Ideonella sakaiensis* for the improvement of plastic degradation, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 263, Part 1, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130284>.
30. Martín-González D, de la Fuente Tagarro C, De Lucas A, Bordel S, Santos-Beneit F. Genetic Modifications in Bacteria for the Degradation of Synthetic Polymers: A Review. *Int J Mol Sci.* 2024 May 19;25(10):5536. doi: 10.3390/ijms25105536. PMID: 38791573; PMCID: PMC11121894.
31. Закон України Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2021, № 31, ст.252 // <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1489-20#Text>
32. Patrício Silva A.L. Future-proofing plastic waste management for a circular bioeconomy. *Curr. Opin. Environ. Sci.* 2021; **22**:100263. doi: 10.1016/j.coesh.2021.100263.
33. Zaman, A. U. (2017). Circular Economy and Waste Management: Emerging Trends in Waste Management. «Waste Management», 70, 16-26. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.08.013.
34. European Commission. (2021). «A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe». Brussels: European Union.
35. Prata JC, Silva ALP, da Costa JP, Mouneyrac C, Walker TR, Duarte AC, Rocha-Santos T. Solutions and Integrated Strategies for the Control and Mitigation of Plastic and Microplastic Pollution. *Int J Environ Res Public Health.* 2019 Jul 7;16(13):2411. doi: 10.3390/ijerph16132411. PMID: 31284627; PMCID: PMC6651478
36. Кабінет Міністрів України. (2021). «Національна стратегія управління відходами в Україні на період до 2030 року». Київ.
37. Організаційно-економічні засади формування систем управління відходами в регіонах України: науково-аналітична доповідь / наук. ред.

- д.е.н., с.н.с. Колодійчук І. А. Львів, ІРД НАНУ. 2022. 170 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»)
38. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance)
 39. Fetner H. Environmental Payback Periods of Reusable Alternatives to Single-Use Plastic Kitchenware Products By: A thesis for the degree of Master of Science (Natural Resources and Environment) in the University of Michigan 04/2021. 79 p.
 40. Здати пляшку і повернути кошти: досвід країн ЄС у поводженні з тарою // <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/zdati-plyashku-i-povernuti-koshti-dosvid-krain-ies-u-povodzhenni-z-taroju/>
 41. Литвин, Ю. О., & Червоненко, Т. М. (2023). Інноваційні технології переробки пластикових відходів: тенденції та перспективи. «Екологічна безпека», 3(1), 12-20.
 42. Emran, Mohammed & Miran, Waheed & Gomaa, Hassanien & Ibrahim, Islam & Belessiotis, George & Abdelwahab, Adel & Ben Othman, Mahmoud. (2023). Biowaste Materials for Advanced Biodegradable Packaging Technology. In book: Handbook of Biodegradable Materials (pp.861-897). DOI:10.1007/978-3-031-09710-2_46.
 43. Karan, Hakan et al Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy. Trends in Plant Science, Volume 24, Issue 3, 237 – 249
 44. Wai Yan Cheah, Ah Choy Er, Kadaruddin Aiyub, Nazlina Haiza Mohd Yasin, Sue Lin Ngan, Kit Wayne Chew, Kuan Shiong Khoo, Tau Chuan Ling, Joon Ching Juan, Zengling Ma, Pau Loke Show Current status and perspectives of algae-based bioplastics: A reviewed potential for sustainability, Algal Research, Volume 71, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103078>.
 45. Ruggero F, Gori R, Lubello C. Methodologies to assess biodegradation of bioplastics during aerobic composting and anaerobic digestion: A review. *Waste Management & Research*. 2019;37(10):959-975. doi:[10.1177/0734242X19854127](https://doi.org/10.1177/0734242X19854127)
 46. Myco-materials // <https://myceliumatters.org/myco-materialsF>
 47. Fungi Solutions <https://www.fungisolutions.com.au/ngi> Solutions // <https://focustaiwan.tw/society/201912070013>
 48. Ban on disposable tableware at restaurants, food courts to start Jan. 1 // <https://focustaiwan.tw/society/201912070013>
 49. How Berkeley passed the nation's first foodware reduction law // <https://ecologycenter.org/zerowaste/disposable-free-berkeley/>
 50. EcoCradle packaging: renewable and biodegradable // <https://www.fairplanet.org/story/ecocradle-packaging-renewable-and-biodegradable/>
 51. Johnson's Baby Refill Cartons Cut Plastic, Cost // <https://www.packworld.com/sustainable->

- packaging/article/22893735/johnsons-introduces-range-of-baby-refill-cartons
52. Artificial intelligence for recycling: AMP Robotics // <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/artificial-intelligence-for-recycling-amp-robotics>
53. Breakthrough in separating plastic waste: Machines can distinguish 12 different types of plastic // <https://bce.au.dk/en/currently/news/show/artikel/gennembrud-i-plastsortering-maskiner-kan-nu-se-forskel-paa-12-forskellige-typer-plastik>
54. What biodegradable materials are used in eco-friendly clothing labels? // <https://indetgroup.com/en/what-biodegradable-materials-are-used-in-eco-friendly-clothing-labels>
55. The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures . Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs Directorate-General for Internal Policies PE 658.279 - October 2020.
56. World Economic Forum. (2020). «The Global Plastic Action Partnership: A Framework for Action». Geneva: WEF.
57. Plastic Pollution Coalition. (2022). «Solutions to Plastic Pollution». Retrieved from [plasticpollutioncoalition.org] (<https://www.plasticpollutioncoalition.org>)
58. Intergovernmental Oceanographic Commission. (2021). «Oceanography and Marine Biology: An Annual Review». Boca Raton: CRC Press.
59. United Nations Environment Programme. (2022). «Marine Plastic Pollution: A Global Challenge». Nairobi: UNEP.
60. Ukrainian entrepreneurs can receive a grant of up to EUR 50,000 to develop climate innovations // <https://greencubator.info/en/ukrainian-entrepreneurs-can-receive-a-grant-of-up-to-eur-50000-to-develop-climate-innovations>
61. The Global Plastics Treaty // <https://plasticseurope.org/changingplasticsforgood/global-plastics-treaty/>
62. Розенблат, О. М., & Гомонай, Т. С. (2021). «Екологічна свідомість населення як фактор зменшення пластикових відходів». Житомир: Видавництво ЖДТУ.
63. ТОВ "Екологічні інвестиції". (2022). «Проблеми утилізації пластикових відходів у Львові та шляхи їх розв'язання». Львів.
64. Кшивецький Б.Я., Сторожук В.М., Маєвська О.М., Соколовський І.Я., Гайда С.В. Методичні рекомендації для підготовки магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». – Львів: НЛТУ України, 2023. – 44 с.