ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему:

Підвищення екологічної безпеки підприємства полімерного виробництва шляхом залучення природоохоронних технологій

Виконав: студент 2 курсу, групи *МТЗНС 2024-1*
спеціальності *183 ТЗНС*
Клушин С.С.

Керівник *к.техн. н., доц. Мельникова О.Г*

Рецензент *к.техн. н., доц. Косенко Н.О.*

м. Харків – 2025 рік

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

Інститут, факультет *ННІ БЗЦІ*
Кафедра *Інженерної екології міст*
Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*
Галузь знань *10 Природничі науки*
(шифр і назва)
Спеціальність *183 ТЗНС*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
канд. техн. наук доц. Дядін Д. В.
_____
"____" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу магістра
студента

Клушина Станіслава Сергійновича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) *Підвищення екологічної безпеки підприємства полімерного виробництва шляхом залучення природоохоронних технологій*
керівник проекту (роботи) *Мельнікова О.Г., к. т. наук, доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджена наказом вищого навчального закладу від "02" 10 2025 року
№ 914-03
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.12.2025
3. Вихідні дані до проекту (роботи) *карти, схеми, супутникові знімки земної поверхні (джерело – веб-застосунок Google Maps, Googl Planet) та інші веб сервіси екологічного спрямування*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *життєвий цикл пластикових виробів, екологічні небезпеки пов'язані з виробництвом пластикових виробів, експериментальне дослідження забруднення мікропластиковими часточками річкових систем урбанізованих територій, екологічна оцінка мікропластикових полютантів, технології захисту компонентів довкілля від забруднення відходів полімерної промисловості*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація – 17 слайдів

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання вида	завдання прийняв
1	*Мельнікова О.Г. к.т.н., доцент*	*03.10.2025*	*03.10.2025*
2	*Мельнікова О.Г. к.т.н., доцент*	*08.10.2025*	*09.10.2025*
3	*Мельнікова О.Г. к.т.н., доцент*	*13.10.2025*	*14.10.2025*
4	*Мельнікова О.Г. к.т.н., доцент*	*16.10.2025*	*17.10.2025*
5	*Мельнікова О.Г. к.т.н., доцент*	*21.10.2025*	*23.10.2025*

7. Дата видачі завдання___*03.10.2025 р*_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	*Життєвий цикл пластикових виробів*	*03.10.2025 – 28.10.2025*	
2.	*Екологічні небезпеки пов'язані з виробництвом пластикових виробів*	*09.10.2025 – 23.10.2025*	
3.	*Експериментальне дослідження забруднення мікропластиковими часточками річкових систем урбанізовани територій*	*14.10.2025 – 12.11.2025*	
4.	*Екологічна оцінка мікропластикових полютантів*	*17.10.2025 – 05.11.2025*	
5.	*Технології захисту компонентів довкілля в забруднення відходів полімерної промисловості*	*23.10.2025 – 19.11.2025*	

Студент _____ Клушин С.С.

Керівник проекту (роботи) _____ *Мельнікова О.Г.*

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка : 82 ст., 18 рис., 13 табл., 52 джерела.

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ПОЛІМЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО, МІКРОПЛАСТИКОВІ ЧАСТОЧКИ, ПРИРОДНІ ВОДОЙМИ, БІОДЕГРАДАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

Об’єкт дослідження – екологічна безпека підприємства полімерного виробництва як система взаємодії технологічних процесів, факторів впливу на довкілля та заходів щодо їх регулювання.

Мета роботи – оцінити екологічний вплив на довкілля, що створює підприємство полімерної промисловості та розробити підходи до підвищення екологічної безпеки підприємства шляхом впровадження сучасних природоохоронних технологій та заходів спрямованих на мінімізацію шкідливого впливу на довкілля.

Виробництво полімерів є однією з базових галузей промисловості, що забезпечують велике число споживчих та промислових потреб: упаковку, будівельні матеріали, автомобільні деталі, трубопроводи, електротехніку тощо. Полімерне виробництво може спричиняти викиди летких органічних сполук (ЛОС), хімічних додатків, важких металів, що мають токсичний вплив на здоров’я людей, біоти та екосистем. Також неконтрольоване поширення полімерних відходів веде до довгострокового забруднення, що може мати кумулятивні наслідки. У зв’язку з цим зростає важливість запровадження природоохоронних технологій, які дозволяють мінімізувати шкідливі викиди, зменшити утворення відходів, підвищити безпеку виробництва. Також важливий системний підходу до управління екологічною безпекою, моніторингу, впровадження замкнутих або «чистих» циклів виробництва.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ПЛАСТИКОВИХ ВИРОБІВ 9
1.1 Загальна характеристика полімерних матеріалів 9
1.1.3 Життєвий цикл пластику 10
1.2 Первинне виготовлення пластикових виробів 12
1.2.1 Сировині матеріали для виготовлення первинного пластику 12
1.2.2 Модифікація полімерів 15
1.2.3 Обробка пластмас 17
1.3 Технологічний процес вторинної переробки пластикових виробів 23
1.3.1 Методи сортування виробів із полімерних матеріалів, для подальшого використання 24
1.3.2 Етап подрібнення полімерних виробів, як підготовка до рециклінгу .. 34
РОЗДІЛ 2 ЕКОЛОГІЧНІ НЕБЕЗПЕКИ ПОВ'ЯЗАНІ З ВИРОБНИЦТВОМ ПЛАСТИКОВИХ ВИРОБІВ 35
2.1 Вплив виробничої галузі полімерних виробів на атмосферне повітря 35
2.1.1 Вплив мікропластикових часточок на якість повітря 37
2.1.2 Хімічні речовини, що викидаються в результаті спалення полімерних виробів 38
2.2 Вплив виробничої галузі по виготовленню пластикових виробів на зміни клімату 40
2.3 Вплив пластмас на біорізноманіття гідросфери 43
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКОВИМИ ЧАСТОЧКАМИ РІЧКОВИХ СИСТЕМ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ 47
3.1 Шляхи надходження мікропластикових полютантів до природних водойм 47
3.2 Основні небезпеки мікропластику для водного середовища 48
3.3 Об'єкт експериментальних досліджень 48
3.4 Методи відбору проб та методика дослідження вмісту мікропластикових чатсочок у донних відкладеннях 49
3.5 Результати експериментальних досліджень 50

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МІКРОПЛАСТИКОВИХ ПОЛЮТАНТІВ52
4.1 Визначення об’єкта екологічної оцінки..... 52
4.1.1 Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) 52
4.1.2 Ключові показники екологічної небезпеки..... 53
4.2 Інтегральна оцінка 53
4.2.1 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для поліетиленових пакетів (LDPE або HDPE) 55
4.2.2 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для пластикових пляшок, зокрема з поліетилентерефталату 56
4.2.3 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для полівінілхлориду (ПВХ, PVC)..... 58
РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ КОМПОНЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ……..62
5.1 Технології захисту атмосферного повітря…….60
5.2 Технології захисту гідросфери 62
5.2.1 Методи видалення та контролю мікропластику у стічних водах 62
5.2.2 Видалення мікропластику зі стічних вод з використанням різних технологічних схем очистки..... 63
5.2.3 Мікропластик у шламі..... 67
5.3 Технології захисту ґрунтового середовища 68
5.4 Сучасні технології переробки пластикових виробів..... 68
5.4.1 Біодеградація пластику 68
5.4.2 Сучасні альтернативи пластиковим матеріалам – біопластик..... 71
ВИСНОВКИ..... 74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 75

ВСТУП

Актуальність теми. Світове виробництво пластичних матеріалів упродовж останніх десятиліть зросло експоненційними темпами й нині перевищує 359 млн тонн на рік. Значна частка цієї продукції – майже 40%, використовується в пакувальній галузі і розрахована на короткочасне застосування та швидку утилізацію. Унаслідок цього приблизно дві третини всього пластику, виготовленого за період існування полімерної промисловості, зрештою потрапляють у навколишнє середовище, де під дією зовнішніх чинників поступово фрагментуються, утворюючи мікро- та нанорозмірні частинки. Ці фрагменти все частіше виявляють у морських і прісноводних екосистемах, атмосферному повітрі, ґрунтах, а також у водопровідній воді та у живих організмах.

Ситуацію ускладнює той факт, що мікро- й нанопластик надходять у довкілля не лише внаслідок деградації більших полімерних об’єктів, але й у формі первинних частинок, які спеціально додають до косметичної, фармацевтичної чи побутової продукції. Незважаючи на інтенсивний розвиток досліджень, досі зберігаються значні прогалини у знаннях щодо токсикокінетики, екологічної поведінки та довгострокових наслідків впливу цих матеріалів на живі організми й екосистеми. Наявність такої невизначеності ускладнює формування фундаментально обґрунтованої нормативної бази та стратегій екологічної безпеки.

Мінімізація токсичного впливу пластикових відходів у всіх їх проявах потребує багаторівневого підходу, що поєднує добровільні ініціативи, міжнародну співпрацю та жорсткі законодавчі механізми. Оптимальним шляхом вирішення проблеми є глобальна координація дій, оскільки сучасні виробничі й логістичні ланцюги постачання охоплюють кілька континентів і перетинають державні кордони. Ефективна політика у сфері поводження з пластиком має охоплювати весь життєвий цикл матеріалу – від виробництва та використання до утилізації чи перероблення – із залученням принципів

циркулярної економіки, інновацій у матеріалознавстві та систем комплексного моніторингу впливу на довкілля

Мета роботи – оцінити екологічний вплив на довкілля, що створює підприємство полімерної промисловості та розробити підходи до підвищення екологічної безпеки підприємства шляхом впровадження сучасних природоохоронних технологій та заходів спрямованих на мінімізацію шкідливого впливу на довкілля.

Для досягнення мети були поставленні для вирішення такі завдання:

1. Розглянути життєвий цикл полімерних виробів і виявити найбільш екологічно небезпечні етапи.
2. Визначити всі можливі екологічні наслідки для довкілля пов’язані з виробництвом полімерних матеріалів.
3. Провести експериментальне дослідження стану природних об’єктів гідросфери щодо вмісту мікропластикових часточок.
4. Зробити екологічну оцінку потенційної небезпеки полімерних відходів для довкілля
5. Розглянути сучасні технології захисту навколишнього середовища від забруднення відходами полімерної промисловості та запропонувати найбільш перспективні для впровадження.

Об’єкт дослідження – екологічна безпека підприємства полімерного виробництва як система взаємодії технологічних процесів, факторів впливу на довкілля та заходів щодо їх регулювання.

Предмет дослідження – природоохоронні технології та інженерно-технічні рішення, що забезпечують зниження екологічних ризиків і підвищення рівня екологічної безпеки на підприємствах полімерної промисловості.

.

РОЗДІЛ 1. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ПЛАСТИКОВИХ ВИРОБІВ

Мало яка галузь, крім пластикової, за останні 60 років зазнала такого зростання як за обсягами виробництва, так і за використанням практично в усіх сферах нашого повсякденного життя.

Однак зараз пластик став жертвою власного успіху. Хоча мешканці найбільш розвинених країн зараз чітко усвідомлюють цю проблему, у країнах з перехідною економікою та країнах, що розвиваються, це усвідомлення ускладнюється проблемами міського управління, пов'язаними з бурхливим зростанням населення в мегаполісах.

1.1 Загальна характеристика полімерних матеріалів

Лео Хендрік Бекеланд, був одним з перших хто використав термін «пластикові матеріали» для опису виробів, виготовлених з макромолекул (смол, еластомерів та штучних волокон). Це було в 1909 році. Двома роками раніше він винайшов перший синтетичний пластик: бакеліт. Але насправді пластик був винайдений значно раніше. У 1833 році француз Анрі Браконо виготовив нітроцелюлозу, яку брати Хаятт з 1868 року виробляли промисловим способом у США для виготовлення більярдних куль. Але оскільки їх виробляли з целюлози, ці вироби не можна віднести в повній мірі до сфери синтетичних матеріалів [1, 2].

Основні винаходи у світі пластмас відбулися між двома світовими війнами: целофан у 1913 році, потім полівінілхлорид у 1927 році, полістирол і нейлон у 1938 році та поліетилен у 1942 році. Між 1950 і 1970 роками виробництво зросло у двадцять разів і перевищило 25 мільйонів метричних тонн. На той час воно було зосереджене на Заході: 8 мільйонів метричних тонн у США, 4 мільйони в Японії та Англії, 1,3 мільйона у Великій Британії, Італії та Франції. СРСР, який все ще був другою за величиною економікою світу, виробляв лише 1,45 мільйона метричних тонн [1].

Перші пластикові пляшки з'явилися в 1968 році (мінеральна вода Vittel у Франції). У 1980 році у світі було вироблено 60 мільйонів метричних тонн пластику. До 2000 року виробництво досягло 187 мільйонів метричних тонн, потім 265 мільйонів у 2010 році і 348 мільйонів у 2017 році. Це середній темп зростання 8,5% на рік з 1950 року, коли він становив 1,5 мільйона метричних тонн [1, 2].

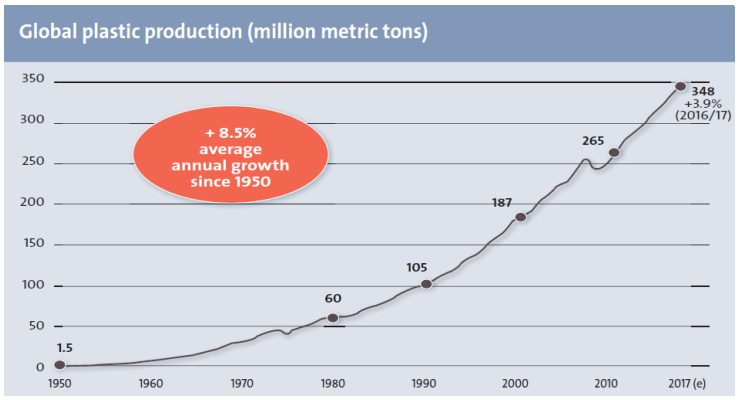


Рисунок 1.1 – Світові темпи зростання виробництва пластикових виробів [1]

1.1.3 Життєвий цикл пластику

Життєвий цикл пластикових виробів складається з таких основних етапів, як: видобуток сировини, виробництво пластикових виробів у первинному процесі, споживання, утилізація, або вторинна переробка пластикових виробів.

Видобуток сировини. Пластик виготовляється переважно з вичерпних ресурсів: нафти та природного газу. Ці копалини видобуваються з надр землі, а потім переробляються у хімічні сполуки – етилен, пропілен та інші мономери, з яких формуються полімери [3].

Виробництво пластику. На хімічних заводах відбувається полімеризація – хімічна реакція, під час якої мономери з’єднуються в довгі молекулярні ланцюги, утворюючи пластикові гранули (пелети). Ці гранули використовуються для виготовлення різних виробів: пляшок, упаковки, одягу, побутової техніки тощо [3].

Споживання. Пластикові вироби потрапляють до споживачів. Тут важливий поділ [3, 4]:

- одноразовий пластик – упаковка, пакети, посуд. Використовується кілька хвилин, але розкладається сотні років;
- довготривалий пластик – техніка, меблі, автозапчастини, будівельні матеріали.

Утилізація або переробка. Після використання пластик потрапляє [4]:

- на переробку – якщо його правильно відсортовано. Але переробляється лише 9–15% світового пластику;
- на сміттєзвалище – велика частка;
- спалюється – може спричиняти викиди токсичних речовин;
- потрапляє в природу – особливо в океани. Утворює мікропластик, який потрапляє в харчові ланцюги.

Розкладання. Більшість пластикових матеріалів не біорозкладні [4].

- вони можуть розпадатися на мікропластик під дією сонця, вітру та води;
- повне руйнування може тривати сотні або тисячі років.

Життєвий цикл пластикових виробів представлений на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Життєвий цикл пластикових виробів

[https://depositphotos.com/ua/vector/plastic-recycling-process-scheme-life-cycle-of-plastic-bottle-recycling-simplified-scheme-illustration-in-cartoon-451418132.html]

1.2 Первинне виготовлення пластикових виробів

1.2.1 Сировині матеріали для виготовлення первинного пластику

Більшість сучасних пластмас отримують з природних матеріалів, таких як нафта, вугілля та природний газ, причому сира нафта залишається найважливішою сировиною для їх виробництва. Відправною точкою для виробничого процесу є дистиляція сировини на фракції (різні частини) на нафтохімічних заводах [5, 6].

Важки фракції дають мастила та важкі олії, що використовуються для опалення. Легші фракції дають нам газ, бензин, парафін та нафту. Хімічні будівельні блоки для виробництва пластмас походять переважно з нафти (рис. 1.3).

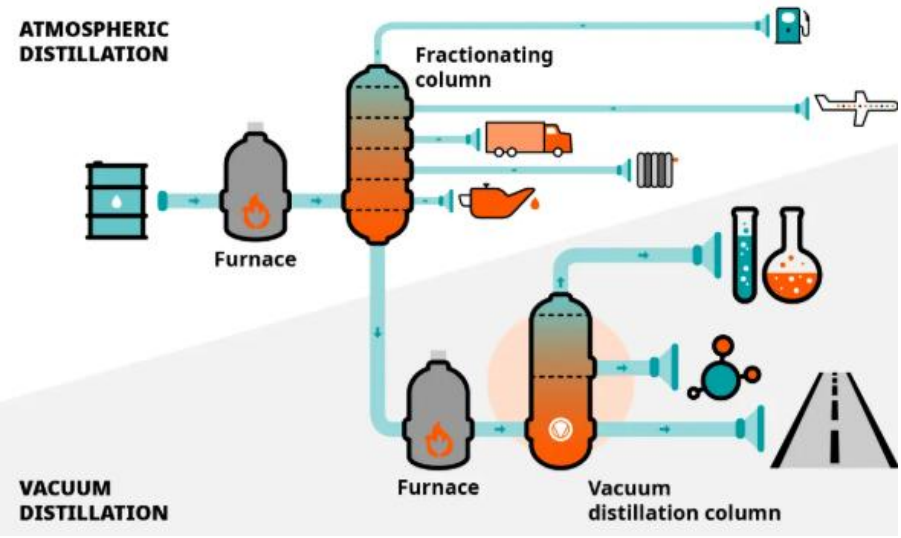


Рисунок 1.3 – Схема перегонки нафти та продукти, що утворюються при її переробці

[https://www.buschvacuum.com/ee/en/applications/crude-oil-distillation/]

Початок виробництва пластмас полягає в підданні нафти процесу крекінгу (рис. 1.4), в ході якого складні органічні хімічні сполуки розділяються на менші молекули залежно від їх молекулярної маси. Ці менші молекули включають етилен, пропілен, бутен та інші вуглеводні [5 – 7].

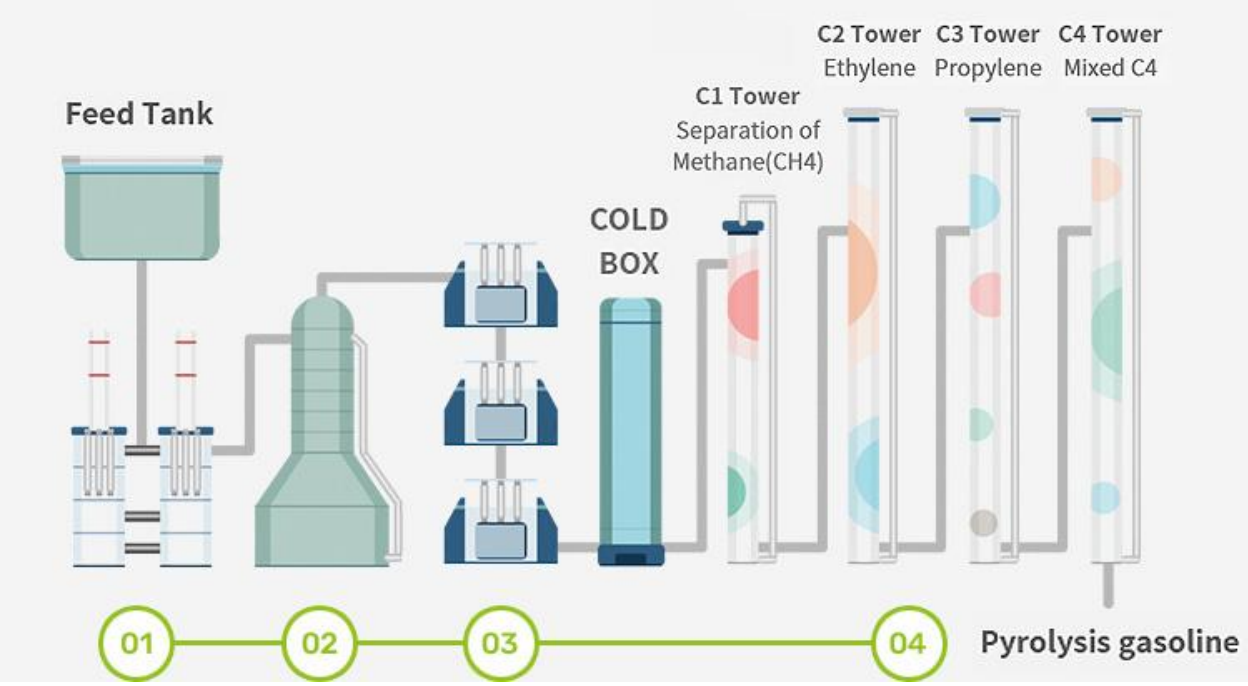


Рисунок 1.4 – Крекінг процес

[https://product.lottechem.com/en/basic_materials/nccecc.do;jsessionid=DCD8B6950D446205AADBF2873667B317]

Згідно рис. 1.4 крекінг процес складається з наступних стадій [5, 7]:

Перша стадія – Процес термічного крекінгу. Нафта, сировина, проходить термічний крекінг за високої температури понад 1000°C та розділяється на вуглеводневі сполуки з різними компонентами. Водень, метан та C4LPG, що утворюються в результаті цього процесу, використовуються як паливо.

Друга стадія – Процес гасіння. Речовина, що піддається термічному крекінгу в установці крекінгу, гаситься для запобігання утворенню коксу та смол, а також для відділення середньої сирої нафти (термічно крекінгованого мазуту, термічно крекінгованого газу). Речовина проходить другий процес гасіння в гартівній башті для отримання термічно крекінгованого бензину, який постачається на установку BTX як сировина. Відокремлений легкий крекінгований газ направляється на процес стиснення.

Третя стадія – Процес стиснення. Загартований крекінг-газ стискається під високим тиском (38 кг), що забезпечує економічне розділення.

Четверта стадія – Процес рафінування. Стиснутий та висушений крекінговий газ охолоджують до -167°C у холодильній камері. Потім

крекінговий газ розділяється, проходячи через дистиляційну вежу, реактор, абсорбційну вежу та ректифікаційну вежу.

Сполуки, отримані в результаті процесу крекінгу, потім піддаються подальшій переробці для отримання базових пластмасових матеріалів.

Отже, що представляють собою пластмасові вироби, перш за все вони є полімерами. Це великі молекули, що складаються з багатьох менших молекул. Ці менші одиниці називаються мономерами і з'єднуються між собою шляхом полімеризації, утворюючи полімери. Полімер містить сотні тисяч мономерів.

Полімеризація, тобто з'єднання мономерів з утворенням полімерів, є результатом двох видів хімічних реакцій, які називаються конденсацією та адицією. Полімери поділяються на дві окремі групи: термореактивні пластмаси та термопласти. Термореактивні полімери перетворюються на свою кінцеву форму під дією тепла і після затвердіння не можуть бути пом'якшені подальшим нагріванням. Термопласти, навпаки, пом'якшуються і стають розплавленими або «пластичними» під дією помірного нагрівання, а потім знову тверднуть при охолодженні. Цей процес можна повторювати багато разів, не змінюючи радикально термопластичні властивості.

У мономері атоми з'єднані подвійними зв'язками, які необхідно розірвати і створити нові зв'язки між сусідніми атомами, щоб утворити довгі ланцюгові молекули полімеру шляхом полімеризації (рис. 1.5).

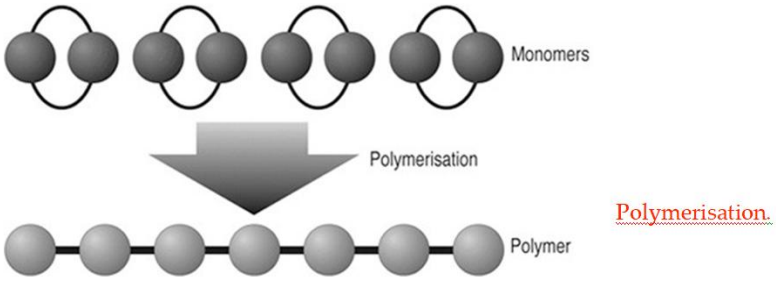


Рисунок 1.5 – Модель формування зв'язків між молекулами в процесі полімеризації [5]

Якщо ланцюги розташовані паралельно один до одного, структура вважається кристалічною (складена з кристалів). Це контрастує з безладом заплутаних ланцюгів в аморфній (безформенній) структурі. Багато полімерів мають як кристалічні, так і аморфні ділянки, а пропорція кристалічних і аморфних ділянок в полімері залежить від його хімічного складу, молекулярної структури та способу обробки. Кристалізація є одним із двох принципів, які використовуються для виробництва міцних, жорстких полімерів (наприклад, поліетилену та нейлону), іншим є утворення міцних зв'язків між ланцюгами, що є процесом, відомим як зшивання. Полімери, такі як бакеліт та сечовина-формальдегід, мають багато міцних зшивок, які не розм'якшуються при підвищенні температури, а остаточно застигають після початкового формування. Так ми отримуємо «затвердіння» в термореактивних матеріалах. Ці пластмаси залишаються порівняно міцними, поки перегрів не призведе до руйнування поперечних зв'язків і хімічного розкладу. На відміну від цього, в термопластичних полімерах ланцюги утримуються разом лише слабкими силами, і ці матеріали можуть бути пом'якшені нагріванням і, якщо необхідно, переформовані. При охолодженні вони відновлюють свої початкові властивості і зберігають будь-яку нову форму [5].

1.2.2 Модифікація полімерів

Полімери спочатку виробляються у вигляді порошків, гранул або мережив (наприклад, соломинок). Однак їх рідко використовують у чистому вигляді, а змінюють, додаючи інші матеріали, щоб надати їм особливих властивостей. Наприклад, вони можуть бути стійкими до сонячного світла, дуже гнучкими або дешевими. Використовуючи різні типи добавок, властивості базового полімеру можна модифікувати різними способами, щоб розширити діапазон його використання. Деякі з можливих добавок [7]:

Пороутворювачі. Багато пластикових виробів мають комірчасту структуру. Якщо придивитися до них уважніше, вони виглядають як шоколадний батончик Aero. Ці розширені або спінені вироби можна виготовити

з базових полімерів шляхом додавання так званих «пороутворювачів». Це робиться в процесі формування шляхом додавання наповнювача, який спінюється по всьому гарячому полімеру, наповнюючи його бульбашками. Гарним прикладом цього є пінополістирол [5, 7].

Барвники. Пластмаси можна забарвлювати за допомогою барвників або пігментів. Барвники надають прозорих кольорів, а пігменти — непрозорих. Дуже широкий спектр кольорів можна отримати від прозорого до непрозорого чорного за допомогою природно прозорого матеріалу, такого як акрил [5].

Наповнювачі. Термін «наповнювач» – це назва, дана низці матеріалів, які додаються до полімерів для зміни їхніх властивостей. Їх також можна додавати до базового полімеру, щоб знизити вартість виробництва продукту, виготовленого з нього. Гарним прикладом цього є один з перших прикладів використання наповнювачів – додавання деревного борошна до фенол формальдегіду [5, 6].

Захисні агенти. Багато пластмас руйнуються під впливом тепла та світла, особливо ультрафіолетового випромінювання сонячного світла. Ви могли бачити докази цього, наприклад, коли пластмаси «відбілюються» сонцем. Додавання захисних агентів зупинить це. Спеціальна форма полівінілхлориду називається UPVC, яка використовується у виробництві водостічних труб, щоб труби не руйнувалися під сонячним світлом.

Модифікатори ударної міцності. Деякі пластмаси розроблені для високої ударної міцності; наприклад, ABS, який використовується у виробництві автомобільних бамперів. Модифікатори ударної міцності – це полімери, які при додаванні до інших полімерів покращують ударостійкість виробу. Модифікатори ударної міцності на основі акрилових полімерів використовуються разом з ПВХ для отримання прозорих жорстких пляшок з хорошою ударною міцністю [6].

Мастила. Ці добавки широко використовуються для покращення текучості пластмас у формах. Зазвичай це воскоподібні матеріали, які зменшують липкість пластику до поверхні форми [5, 6].

Пластифікатори. Пластифікатори, такі як діоктилфталат, додаються до полімерів, щоб зробити отримані матеріали більш гнучкими. Вони роблять пластмаси більш пластичними. Пластифікатори можуть перетворити непластифікований полівінілхлорид (ПВХ) з твердого, жорсткого матеріалу, придатного для водостічних труб, на м'який, гнучкий матеріал, придатний для оббивки [5, 7].

1.2.3 Обробка пластмас

Завдяки властивостям полімерів їх можна формувати та змінювати їхню форму за допомогою низки різних повторюваних виробничих процесів. Найважливішими з них є екструзія, лиття під тиском, видувне формування, вакуумне формування, екструзійне видування, ротаційне формування, каландрування, спінювання та компресійне формування.

Екструзія. Екструзія – це процес, який можна порівняти з видавлюванням зубної пасти з тюбика. Термопластичні гранули проштовхуються через нагрітий циліндр, а потім розплавлений полімер видавлюється через матрицю, яка є профілем екструдованого компонента (рис. 1.6) [5, 8].

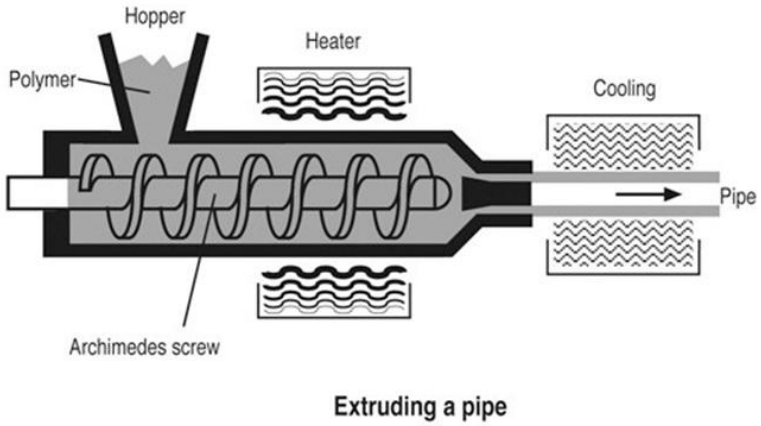


Рисунок 1.6 – Схема екструзійної труби [5]

Екструзійний виріб охолоджується водою або повітрям, коли він виходить з матриці, і нарешті розрізається на потрібну довжину. Форма матриці може бути різноманітною: від простого отвору з центрально підтримуваним

осердям для виготовлення труб, таких як труби, до дуже складних секцій для карнизів для штор або порожнистих віконних рам [5, 8].

Видувне формування. Видувне формування – це простий процес, коли стиснене повітря подається під нагрітий лист термопластичного матеріалу, втискаючи матеріал у порожнину форми або дозволяючи йому вільно розширюватися у формі півсфери. Це хороший спосіб формування великих куполів, які, виготовлені з прозорого акрилового листа, часто використовуються у вітринах магазинів (рис 1.7).

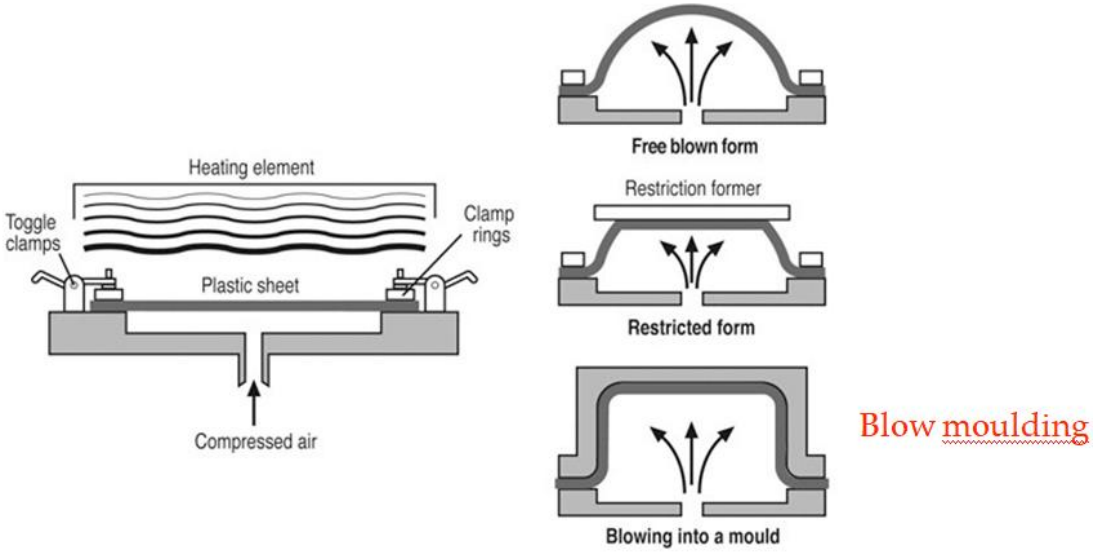


Рисунок 1.7 – Схема формування купольних форм пластику з використанням технології повітряного видуву [5]

Вакуумне формування [5, 8]. Це дуже поширений виробничий процес, який використовується, наприклад, для виготовлення різноманітної пластикової упаковки. Уявіть собі коробки, в яких постачаються сендвічі, або внутрішню частину коробки з-під цукерок, або вашу акрилову ванну. Це фактично протилежність видувному формуванню. Замість того, щоб нагрітий пластиковий лист за допомогою тиску повітря вдавлювався у форму, під час вакуумного формування повітря витягується з-під розм’якшеного пластикового листа, тому його закачують у форму під тиском атмосферного тиску.

Вакуумне формування – це дуже поширений та ефективний спосіб виготовлення складних форм з термопластичних листів (рис. 1.8) [5, 9].

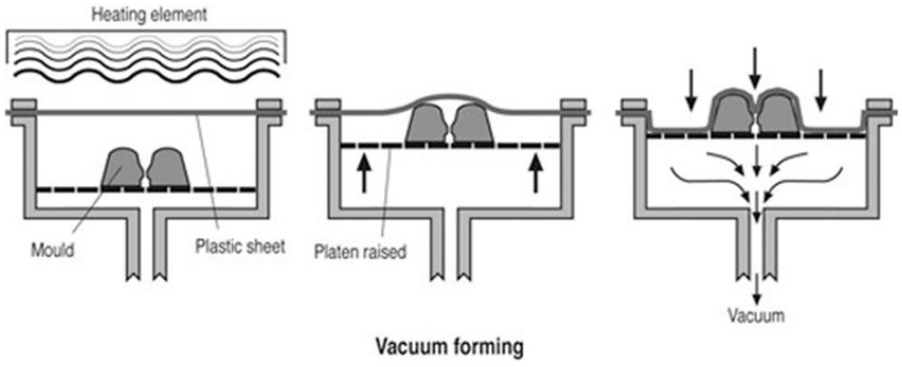


Рисунок 1.8 – Схема технологічного процесу вакуумного формування пластикових виробів [5]

Екструзійне видування [5, 9]. Це поєднання екструзії та видування, яке часто використовується там, де виріб має вузьку шийку, наприклад, пляшка. Пластиковий матеріал спочатку екструдується у формі трубки у відкриту матрицю. Потім матрицю закривають, щоб герметизувати кінці трубки, і вдувають повітря, змушуючи пластикову трубку приймати форму порожнини матриці. Оскільки матеріал спочатку екструдується, а потім піддається видуванні, цей процес відомий як екструзійне видування (рис. 1.9) [5, 9].

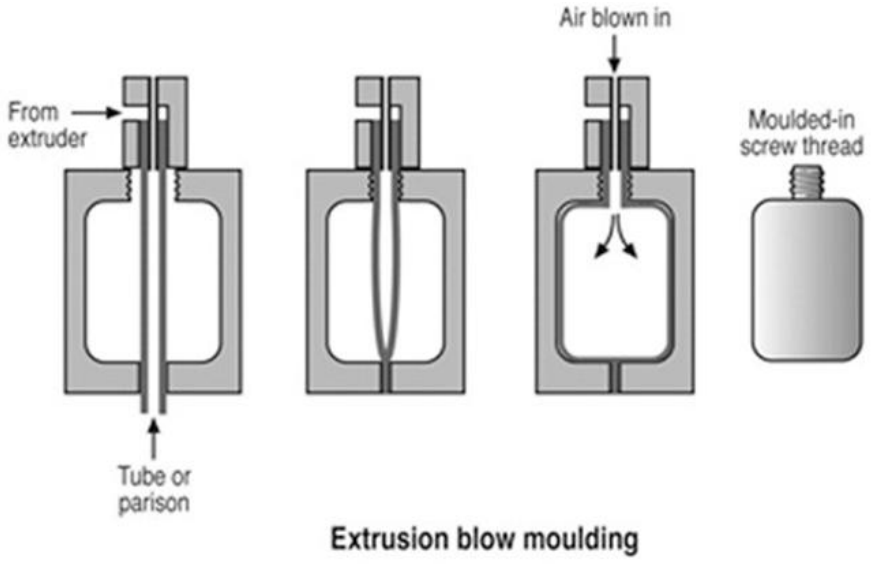


Рисунок 1.9 – Технологічна схема екструзійного видування [5]

Лиття під тиском. Цей процес є одним з найпоширеніших серед усіх процесів виробництва пластмас. Полімер у формі гранул нагрівають до плавлення та закачують у закриту форму. Через в'язку (густу, сиропоподібну) природу плавленого полімеру, для його течії потрібен дуже високий тиск, а це означає, що машина та форма повинні бути дуже міцними, щоб витримувати діючі сили (рис. 1.10) [5. 8. 9].

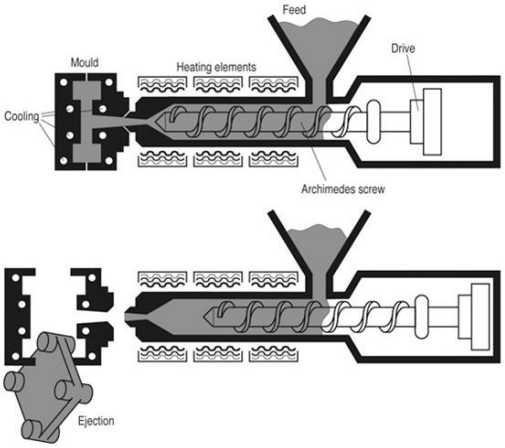


Рисунок 1.10 – Схема технологічного процесу лиття під тиском [5]

Типова промислова машина для лиття під тиском використовує шнек для просування гранул по нагрітому циліндру, а коли гранули плавляться, шнек використовується як поршень для просування полімеру в форму. Форми зазвичай виготовляються з високоякісної сталі, щоб витримувати дію сил, і також повинні бути ретельно відполіровані, щоб забезпечити дуже хорошу обробку поверхні виробу, оскільки будь-які подряпини будуть видні на поверхні формованого пластику. Завдяки здатності пластику відображати навіть найдрібніші сліди, на поверхні форми можна вигравіювати дуже дрібні деталі, наприклад, у вигляді торгових марок, написів або текстур [5, 7 – 9].

Ротаційне формування. Ротаційне формування використовується для виробництва порожнистих термопластичних виробів, таких як барабани, резервуари для зберігання та сміттєві баки. Ретельно розрахована кількість пластику поміщається в закриту форму, яка нагрівається в печі і повільно

обертається навколо вертикальної та горизонтальної осей. Пластиковий матеріал плавиться і прилипає до гарячої поверхні форми, утворюючи необхідну товщину. Потім форма поступово охолоджується повітрям або водою, продовжуючи обертатися. Форма відкривається, готовий виріб виймається, а форма завантажується знову і закривається для наступного циклу. Час, необхідний для виготовлення одного виробу, називається циклом виробництва виробу (рис. 1.11) [5, 9].

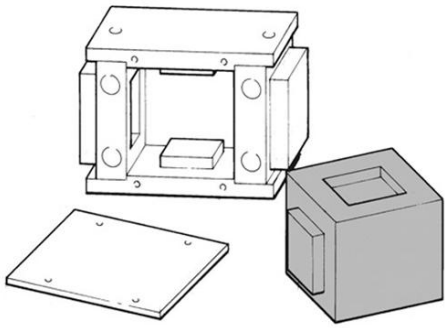


Рисунок 1.11 – Ротаційний модуль [5]

Піноутворення. Пластикові піни, що використовуються в упаковці та оббивній промисловості, можуть бути виготовлені з використанням піноутворювачів, які змішуються з базовим полімером. При нагріванні ці речовини виділяють газ, який утворює бульбашки в пластику. Інший метод полягає у введенні стисненого азоту в розплавлений пластик під час процесу формування. Третій метод полягає у заморожуванні газу в гранулах пластику, який потім розширюється під дією тепла під час процесу формування [5, 9].

Каландрування. Каландрування використовується для виробництва пластикових листів і таких виробів (рис. 1.12), як підлогова плитка, тканини з покриттям і оббивка для салонів автомобілів. Розплавлений термопластик екструдується на нагріті обертові валки, які стискають матеріал у суцільний лист або плівку. Плівка охолоджується струменями повітря або води, після чого розрізається на відрізки потрібної довжини або намотується на рулони [9].

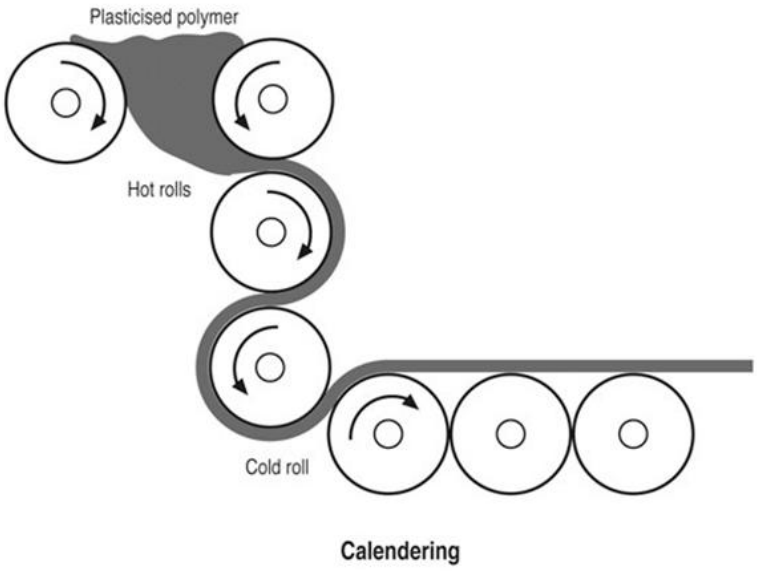


Рисунок 1.12 – Схема каландрування [5]

Формування під тиском. Формування під тиском є однією з найстаріших технологій виробництва (рис. 1.13), пов'язаних з пластмасами, і використовувалося, наприклад, у 1854 році Самуелем Пеком для виготовлення рамок для картин з шелаку, змішаного з деревним борошном.

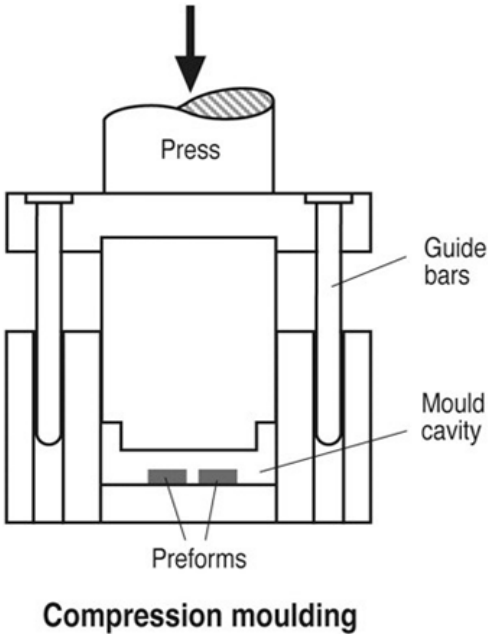


Рисунок 1.13 – Формування пластикових виробів під тиском [5]

Цей процес майже завжди використовується з термореактивними пластмасами. Ретельно зважену кількість термореактивного полімеру

поміщають у попередньо нагріту нижню порожнину форми. Потім форму закривають, накриваючи верхньою половиною, і піддають подальшому нагріванню та тиску за допомогою преса, часто потужністю у кілька сотень тонн. Тиск і нагрівання викликають полімеризацію та течію пластифікованого матеріалу всередині форми.

Сирі термопластичні матеріали, що містять наповнювачі, можуть бути спресовані в холодному стані в невеликі блоки заданої ваги, які називаються преформами. Використання преформ у пресових формах дозволяє уникнути необхідності зважувати порошкоподібний матеріал кожного разу, коли форма заповнюється, і скорочує час циклу, оскільки преформи можуть бути попередньо нагріті.

Розвиток пресування є трансферне формування. У цьому процесі термореактивний полімер спочатку завантажується в нагрівальну камеру над порожниною форми і залишається для полімеризації. Потім він видавлюється через канали в порожнину форми під дією потужного преса. Трансферне формування використовується, коли потрібні складні виливки і полімер повинен швидко текти навколо порожнини форми [9].

Багато пластикових виробів під час процесу формування містять металеві деталі. Ці металеві деталі називаються вставками і можуть, наприклад, мати форму нероз'ємних гайок, що використовуються разом з болтами для кріплення інших деталей кінцевого продукту. Вставки розміщуються в поглибленнях нижньої форми вручну або за допомогою завантажувальних пристосувань перед введенням полімеру в форму. Формування стисненням і трансферне формування — це технології виробництва, які дозволяють включати формовані вставки. При використанні вставок ця технологія часто називається формуванням з вставками [5, 7 – 9].

1.3 Технологічний процес вторинної переробки пластикових виробів

Вторинна переробка пластикових виробів — це технологічний процес, що дозволяє повторно використовувати відходи полімерних матеріалів для

виготовлення нової продукції. Типовий процес переробки охоплює кілька послідовних етапів, кожен з яких має своє функціональне призначення. Але оскільки вироби з пластику мають надзвичайно велике різноманіття за хімічний складом, найважливіший етап у вторинній переробці виробів із полімерних матеріалів це сортування їх класам хімічної будови, бо це є ключовий фактор, що впливатиме на подальшу переробку і можливості використання цих матеріалів у подальшому рециклінгу.

1.3.1 Методи сортування виробів із полімерних матеріалів, для подальшого використання

На цьому етапі здійснюється механічне або ручне розділення пластикових відходів за типами полімерів (наприклад: PET, HDPE, LDPE, PP, PS, PVC). Це важливо, оскільки різні типи пластику мають різні температури плавлення і фізико-хімічні властивості [12 – l4].

Відділення пластику від різних типів потоків відходів є одним з основних проблемних процесів у рекуперації енергії за допомогою різних термохімічних процесів. Сортування пластику є дуже важливим кроком у різних технологіях управління відходами. Ручне сортування підходить, коли пластикові компоненти присутні у великій кількості, але це трудомісткий процес. В автоматизованій техніці сортування NIR (ближнє інфрачервоне випромінювання) пропонує велику перевагу серед усіх методів хвильового сортування, але не підходить для темного пластику та може використовуватися на прозорих тілах. При повітряному сортуванні легші частинки відокремлюються від важчих на основі питомої ваги. При електростатичному методі сортування матеріали розділяються на основі електростатичного заряду [12]. При методі розділення з поплавком-поглинанням пластик знаходиться в рідині, яка має щільність між матеріалами, що дозволяє менш щільному матеріалу плавати, а важчому опускатися, тоді як сортування методом селективного розчинення базується на пакетному розчиненні змішаних пластиків за допомогою розчинників. Гідроциклони збільшують різницю

питомої ваги за допомогою відцентрової сили, тому також можна розділяти матеріали з невеликою різницею. У цій статті розглядається доступна література в галузі сортування пластикових відходів для ефективної переробки [12].

Методи розділення пластикових відходів. Відділення пластику є одним з основних проблемних процесів у системі управління пластиковими відходами, наприклад, дуже важко відрізнити подрібнені пляшки з ПВХ від подрібнених ПЕТ-пляшок, і цей процес розділення необхідно проводити перед наступним процесом, оскільки наявність ПВХ може знизити якість усієї партії [13]. Однак механічне розділення дозволяє відокремити пластик від інших матеріалів. У багатьох випадках також потрібно відокремити різні типи пластику (такі як ПВХ, ПЕТ, поліетилен). У деяких випадках пластик також сортують за кольором, щоб покращити фізичний вигляд продуктів, отриманих з матеріалу після використання. Змішані пластикові відходи, що містять до 15% ПВХ, не вважаються такими, що створюють технічні проблеми. Через наявність добавок та забруднюючих речовин, а також через модифікацію початкової полімерної структури під час її першого використання (зазвичай реакції зшивання ланцюгів), механічно перероблені пластики знаходять застосування лише в нижчих класах. У процесі крекінгу така попередня обробка складається з етапу сортування або розділення використаної сировини, що дозволяє регулювати вміст хлору в основному потоці відходів. Друга можливість – це термічне або хімічне дегалогенування перед подальшою обробкою попередньо обробленого продукту, і це можна зробити в рідкому або псевдозрідженому шарі піролізу. У цьому процесі утворюється HCl, який нейтралізується або відділяється для промислового використання. Відносно низький вміст ПВХ/хлору, який міститься у змішаних пластикових відходах (з упаковки), є прийнятним для існуючих процесів переробки сировини, за умови належної попередньої обробки пластикових відходів. При розділенні змішаних пластмас не всі пластикові матеріали чутливі до сторонніх речовин, таких як ПЕТ, або

забруднюючих речовин, таких як ПВХ [13, 14]. Деякі методи сортування обговорюються нижче.

Ручне сортування. Метод ручного сортування матеріалу (рис. 1.14) передбачає ідентифікацію за формою, кольором, зовнішнім виглядом, торговою маркою пластику, що відрізняє його для візуальної ідентифікації операторами [12]. Методи ручного сортування корисні в таких ситуаціях, коли пластикові компоненти достатньо великі, щоб виправдати затрачений час і зусилля, оскільки вони дуже трудомісткі, мають погане робоче середовище та є економічно невигідними [13]. Цей метод базується на кодах ідентифікації матеріалів, але не можна нехтувати можливістю людської помилки. Він має велику перевагу в ціні, оскільки є відносно дешевим методом.

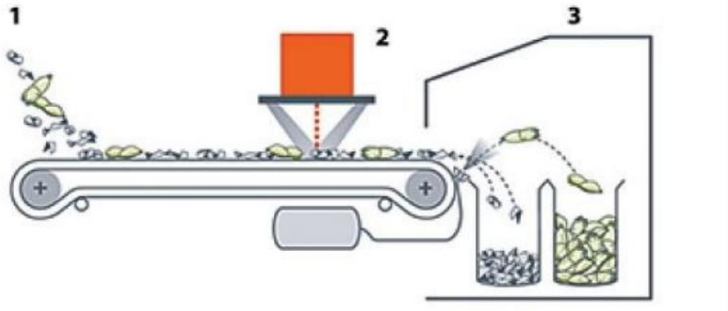


Рисунок 1.14 – Ручне сортування пластикових відходів [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTRUdpprksvbx954FkcjeKpsTuX2Q3HXzzxWQ&s]

Метод автоматичного сортування. Метод сухого сортування за допомогою (N-) ІЧ, рентгенівські промені. Згідно з дослідженням переробки змішаного пластику, проведеним Програмою дій щодо ресурсів відходів (WRAP), ближнє інфрачервоне випромінювання (NIR) може ефективно видаляти біопластики PLA та вуглецевий картон із потоку змішаної упаковки. Цей метод передбачає опромінення несортованого, неідентифікованого

пластику хвилями ближнього інфрачервоного випромінювання (довжина хвилі від 600 до 2500 метрів). Це забезпечує дуже високу швидкість ідентифікації. Під впливом хвиль ближнього інфрачервоного випромінювання різні полімери відбивають спектр ідентифікації, цей метод може точно ідентифікувати різні полімери [15]. Спектроскопія відбиття NIR пропонує багато переваг для ідентифікації та сортування пластикових смол, хоча цей метод не підходить для ідентифікації темних пластмас.

Подібно до методів інфрачервоної спектроскопії, які піддають невідомий пластик впливу хвиль та вивчають реакцію об'єктів, але в рентгенівській флуоресценції унікальні характеристики походять від органічної природи полімерів, а не від окремого іона чи елемента. Більшість цієї технології застосовується для сортування ПВХ. Атоми хлору в ПВХ дають унікальний пік у рентгенівському спектрі, який легко виявити. Гіперспектральні камери, що постачаються Stemmer Imaging (Imaging and Machine Vision Europe), можуть бути використані для розділення пластику. Загальна ідея полягає в тому, щоб створити спектральний відбиток пластику, що проходить конвеєром, щоб ідентифікувати його за хімічним складом та відсортувати за типом пластику (рис. 1.15) [16].



1 – надходження сміття, 2 – зона сенсорів, 3 – пневмомодуль

Рисунок 1.15 – Автоматичне сортування пластикових відходів – принцип роботи лінії оптико-механічного сортування

https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c1563e36-e4c5-4da8-ab49-0779c08de9f6/content

Повітряне сортування. Тут пластівці змішаного матеріалу, подрібнені до розміру від ¼" до ½", подаються вертикально в повітря, що призводить до відділення легших частинок від важчих, а матеріал сортується на основі питомої ваги [15].

Інша техніка, що базується на поєднанні трибоелектростатичного розділення та повітряного столу, в якій трибоелектростатичний сепаратор спочатку використовувався для збору пластівців ABS як позитивно зарядженої фракції та для отримання негативно зарядженої фракції пластівців PP та PVC для подальшої обробки на повітряному столі, що є ефективним методом розділення матеріалів різної щільності [14].

Техніка електростатичного сортування. Розділення також може бути досягнуто за допомогою електростатичного заряджання різних пластмас. Цей метод розділяє пластикові матеріали через їх різницю в електростатичних зарядах. Матеріали сортуються, дозволяючи їм вільно падати через електричне поле, що створюється між двома паралельними наборами протилежно заряджених електродів, і збираються окремо відповідно до трибоелектричного заряду, який вони мають. Одна з проблем полягає в тому, що важко контролювати силу тяжіння, що діє на частинки, що падають. Тому, якщо частинки занадто малі або дуже низько заряджені, між електродами повинна бути дуже довга зона розділення. Електростатичне розділення може уникнути проблем із забрудненнями, такими як бруд, і може розділити полімери подібної щільності, наприклад, PE та PP. У трибоелектростатичній техніці розділення, яка полягає в трибозарядженні матеріалів та розділенні заряджених матеріалів в електричному полі, ефективність розділення головним чином залежить від селективного заряджання та оптимальної щільності заряду матеріалів при трибозарядженні. Однак ефективність вищезазначеного процесу низька при обробці грубих гранульованих сумішей ізоляційних матеріалів з розміром частинок >2 мм. У цьому випадку більш доцільними є методи трибоелектростатичної сепарації роликового типу [14]. Дослідження виявило новий тип трибозарядника вертикального зворотно-поступального типу, з якого

було встановлено трибоелектричний ряд, який може бути використаний як важливий індикатор для розділення матеріалів з пластмас, відповідно до співвідношення полярності заряду та щільності заряду між пластмасами та зарядженими матеріалами: (негативний) HPVC-SPVC-COPP-HOMOPP-LDPE-HDPE-PET-Rubber-HIPS-Calibre-ABS-GPPS-PMMA (позитивний) [15]. Вони отримали цей трибоелектричний ряд та кілька властивостей заряджання, які можуть впливати на ефективність розділення та ефективність заряджання пластмас, використовуючи нещодавно розроблений вертикально-поступальний зарядний пристрій.

Механічне сортування. Метод механічного сортування успішно використовується в гірничодобувній промисловості, але дуже мало роботи було зроблено в розробці систем механічного сортування для переробки пластмас. Метод механічного сортування включає відцентрову силу, питому вагу, еластичність, форму частинок, селективне подрібнення та механічні властивості. Сортування за допомогою відцентрової сили передбачатиме розробку центрифуги чашового типу, яка розділятиме пластмаси відповідно до їх питомої ваги з покращеною продуктивністю розділення та нижчим вмістом залишкової вологи [12, 13]. Сортування за допомогою центрифуги відбувається набагато швидше, а відсортовані фракції пластику набагато сухіші, ніж при розділенні під дією сили тяжіння. В галузі механічного сортування пластмас розроблено новий метод Hybrid-Jig, який базується на відсаджуванні та флотації, де бульбашки повітря вводяться в шар частинок під час відсадження для зміни видимої питомої ваги шляхом прикріплення частинок, щоб частинки з різними поверхневими властивостями могли бути розділені відсадженням, навіть якщо їхня питома вага подібна [12].

Сортування плавленням. Цей метод сортування підходить для сортування лише двох видів пластмас одночасно. Для використання цього методу важливо, щоб температури плавлення пластмас суттєво відрізнялися. Цей метод полягає в використанні нагрітого роликового стрічкового сепаратора. Сортування

відбувається шляхом селективної термоадгезії розм’якшених частинок до валків або стрічки. Він має низькі експлуатаційні витрати [15].

Метод мокрого сортування. Метод сортування з поплавком. Ті, що не змінюються, збираються внизу. Отже, за цією методикою зібрані матеріали зверху та знизу можна розглядати як розділені (Едвард).

Принаймні одна пластикова поверхня повинна бути гідрофільною, тоді можна спостерігати лише розділення за допомогою пінної флотації. Це робить пінну флотацію дуже складною, оскільки всі пластики мають природно гідрофобні поверхні та легко спливають з додаванням бульбашок повітря. Метод пінної флотації для розділення пластику, який передбачає утворення гідрофільних частинок на поверхні пластику під впливом полум'яної обробки, може бути використаний для розділення пластику. У дослідженні спостерігається, що за допомогою кутового полум'я можна зробити обидві сторони пластикових пластівців гідрофільними. Обробка полум'ям призводить до збільшення вмісту кисню в поверхневому шарі [13, 14]. Оскільки метод пінної флотації вимагає змочування пластику, одним із поширених методів змочування пластику є хімічне кондиціонування змочувальними агентами. Молекули метилцелюлози (МС) як зволожувальний агент розділяють сім видів пластику, а саме POM, PVC, PET, PMMA, PC, PS та ABS, на три групи відповідно до флотації. Молекули МС, абсорбовані на поверхні пластику, оголюють деякі зі своїх полярних груп, орієнтованих у напрямку водної фази, роблячи поверхню пластику гідрофільною [14]. У процесі мокрого розділення гідрофільні частинки змочуються водою, тоді як гідрофобні частинки змочуються оліями та бульбашками повітря. Пінова флотація працює належним чином, коли є різниця у властивостях поверхні. Однією з головних переваг пінної флотації є те, що вона відокремлює ПЕТ від ПВХ. Як ПВХ, так і ПЕТ є гідрофобними, і додавання деяких відповідних реагентів, які абсорбуються на поверхні ПВХ та ПЕТ, може зробити ПЕТ гідрофільним, зберігаючи гідрофобність ПВХ [15].

Таким чином, ПВХ плаває, а пластівці ПЕТ тонуть. Нова техніка пінної флотації, що включає серію з шести резервуарів, кожен з яких працює безперервно, має певну функцію, залежно від пластику, що видобувається. Єдина різниця між ними полягає в хімічному складі їхнього вмісту. Відповідно до наших потреб у продукті, ми можемо вибрати найбільш підходящу хімічну речовину для використання в даному резервуарі (Trans Forum, vol.4). Спочатку вона була розроблена для відділення акрилонітрил-бутадієн-стиролу (ABS) від ударостійкого полістиролу (HIPS). Один із методів, що використовує флотаційну техніку для відділення ПЕТ та ПВХ із сумішей двох полімерів, може бути досягнутий шляхом використання дубильної кислоти як змочувального агента для ПЕТ та метилізобутилкарбінолу (MIBC) як піноутворювача [14].

Гідроциклон. Ця техніка базується на принципі відцентрового прискорення для розділення пластикових сумішей [17]. Вона не має рухомих частин. Гідроциклони складаються з конічного та з'єднаного циліндричного корпусу, в якому є тангенціальний вхід для подачі суспензії. Гідроциклони перетворюють енергію тиску рідини на обертальний рух рідини. Цей обертальний рух викликає відносний рух матеріалів, зважених у рідині, що дозволяє розділяти матеріали один від одного. Гідроциклонний пристрій має дуже високу пропускну здатність, але він забезпечує високоточне розділення за щільністю, якщо розмір пластику малий (номінальний розмір <6 мм) і приблизно однакова форма. Подібним процесом сортування подрібненого пластику є відцентрове сортування. Для цієї мети використовується циліндрична центрифуга, заповнена водою. Ця техніка дозволяє вибірково відокремлювати, промивати та зневоднювати пластикові пластівці із суміші полімерних відходів [17].

Вибіркове розчинення. Це пакетне розчинення змішаних пластмас за допомогою розчинників. Полімери мають різну розчинність в органічних розчинниках (відмінності посилюються дією температури). Різні етапи включають розчинення, потім осадження, потім фільтрацію та, нарешті,

випаровування розчинників [17, 18]. Ця техніка допомагає повністю розділити полімери шляхом ретельного контролю температури та вибору відповідного розчинника. Окремий полімер можна відокремити від складної суміші, забруднень, таких як бруд або ґрунт. Недоліком цієї техніки є кількість використовуваних розчинників, хоча більшість розчинників переробляються в процесі. Дослідження, проведене в Політехнічному інституті Ренессела, використовує один розчинник (ксилол) для окремого вилучення різних видів пластмас (ПВХ, ПС, ПЕНЩ, ПВД, ПП). У цьому процесі ксилол знову і знову відновлюється та повертається назад у систему пластикової стружки. У цьому випадку ПЕТ потрібно видаляти за допомогою окремого розчинника (Едвард). У дослідженні було використано метод селективного розчинення/осадження для розділення полімерної суміші (СДП) та переробки, де було досягнуто відмінних результатів, а якість перероблених полімерів залишилася практично незмінною, коли цей метод застосовувався в пілотній установці для розділення/переробки суміші ПЕНЩ/ПП [18]. Інше дослідження, проведене в Корнельському університеті, показує, що одного розчинника недостатньо. Вони використовують комбінований технологічний процес для сортування пластмас. Спочатку вони відокремлюють неолефіни від поліолефінів за допомогою простої системи флотації, а потім селективного розчинення з використанням різних розчинників для кожної групи пластмас. У цьому сенсі ця техніка поєднує економічну ефективність системи флотації з низькою чистотою та високу вартість селективного розчинення з високою вартістю, але високою чистотою. Розчинником, що використовується для цього методу, є n-метил-2-піролідинон (NMP) [18].

Методи хімічного сортування. Гідроліз, гліколіз, гідрогліколіз. У хімічному процесі молекули полімеру перетворюються назад на сирі мономери. Це пропонує перевагу, оскільки їх можна повторно використовувати у виробництві нового полімеру. Результати дослідження показують, що пластикові відходи, як відходи після споживання, так і промислові відходи, забруднені целюлозним компонентом, можна ефективно та економічно

переробляти за допомогою гідролізу [19]. У цьому процесі незмішані пластмаси, отримані в результаті реакцій конденсації (поліуретани, поліаміди, поліефіри, полікарбонати), можуть бути розділені на їхні вихідні матеріали (мономери). У процесі розділення гліколізом довгі полімерні ланцюги розриваються на коротколанцюгові облігомери, які реполімеризуються в чистий полімер. Повна деполімеризація в цьому процесі не відбувається.

Високотемпературний метод видалення фарби на водній основі спирається на гідроліз багатьох покриттів у гарячій воді, таким чином видаляючи покриття з пластику. Це підходить для пластмас на основі олефінів, оскільки вони не можуть бути розкладені в цих умовах. Помічено, що традиційні методи сортування, які базуються на фізичних характеристиках, таких як питома маса, розмір, хімічні властивості, але всі ці методи мають деякі труднощі, пов'язані з ними, схожа питома маса більшості пластмас і забруднюючих речовин у відходах, зокрема, робить сортування менш ефективним [19]. Італійські дослідники розробили інноваційний пристрій під назвою «Multidune». Цей пристрій дуже чутливий до невеликих відмінностей у масі, тому долає проблему сортування пластмас, які мають подібну щільність. Він здатний відокремлювати пластмаси з низькою питомою масою (близько 1 г/см^3) [19].

Європейський проект W2 plastics (FP7) спрямований на фундаментальну зміну сучасного стану переробки пластмас шляхом застосування технології магнітної щільності, а також технології ультразвукової візуалізації для розробки розділювального пристрою для переробки поліолефінів зі складних відходів. Чисельні алгоритми були застосовані для моделювання магнітної рідини (намагніченої води) для розділення пластмас. Використовуваний пристрій розділений на три секції: ламінарну секцію, секцію сепаратора, секцію колектора. Секція ламінатора намагається зробити потік ламінарним, у секції сепаратора частинки розділяються відповідно до їх щільності під дією магнітного поля, у секції колектора кожен вид частинок тече на різній висоті[18, 19]. У РТС Північно-Західного університету була розроблена

запатентована проривна технологія переробки пластмас, яка усуває процес сортування за типом та кольором пластику. Ця технологія, що називається твердотільним зсувним подрібненням (S3P), являє собою безперервний одностадійний процес переробки несортованих пластикових відходів до або після споживання. Пластикові відходи можна розділити за розміром за допомогою методу розділення за розміром, використовуючи сепаратор Троммеля та вібраційний екран.

1.3.2 Етап подрібнення полімерних виробів, як підготовка до рециклінгу

Відсортовані пластикові вироби надходять у шредер або дробарку, де подрібнюються на фрагменти — пластикову крихту (флейки).

- Розмір частинок зазвичай становить 5–20 мм.
- Це полегшує подальшу мийку та сушіння.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ НЕБЕЗПЕКИ ПОВ'ЯЗАНІ З ВИРОБНИЦТВОМ ПЛАСТИКОВИХ ВИРОБІВ

Властивості, які зробили пластмаси такими необхідними для сучасного життя, цілком можуть створювати проблеми після закінчення терміну їхньої корисної дії. Пластики використовуються як фарби, покриття для кабелів та віконні рами, оскільки вони не гниють, і тому їх дуже важко розкладати після закінчення терміну їхньої корисної дії.

Існує три можливі екологічні проблеми, які слід врахувати. По-перше, пластмаси здебільшого виготовляються з нафти, природного газу або вугілля, і все це обмежені природні ресурси, які необхідно зберігати. По-друге, виробництво пластмас утворює багато шкідливих забруднювачів, з якими виробничі компанії повинні належним чином боротися. По-третє, старі та небажані пластмаси не завжди легко утилізувати. Закопані на звалищах, вони дуже довго гнитимуть. Щоб зменшити ці проблеми, пластмаси необхідно «розробляти» (наприклад, як біорозкладні), виробляти, використовувати та утилізувати обережно.

2.1 Вплив виробничої галузі полімерних виробів на атмосферне повітря

Хоча спалювання пластику часто евфемістично називають «відновленням енергії», правда полягає в тому, що під час спалювання пластику виділяються парникові гази, головним чином CO_2. Однак пластик також часто містить добавки, які є небезпечними при потраплянні в навколишнє середовище під час спалювання, що є давно відомою проблемою [20, 21]. Види, кількість та концентрації цих хімічних речовин різняться залежно від типу пластикових відходів та від того, як відбувається процес спалювання, але мало хто сумнівається, що такі хімічні речовини впливають на здоров'я людини (рис. 2.1). У Європі протягом останніх років докладаються зусилля для перенаправлення пластикових відходів, особливо пластикової упаковки, зі звалищ на спалювання, і ця тенденція більш очевидна в країнах, які

запровадили заборони на захоронення відходів, що підлягають переробці [21, 22].

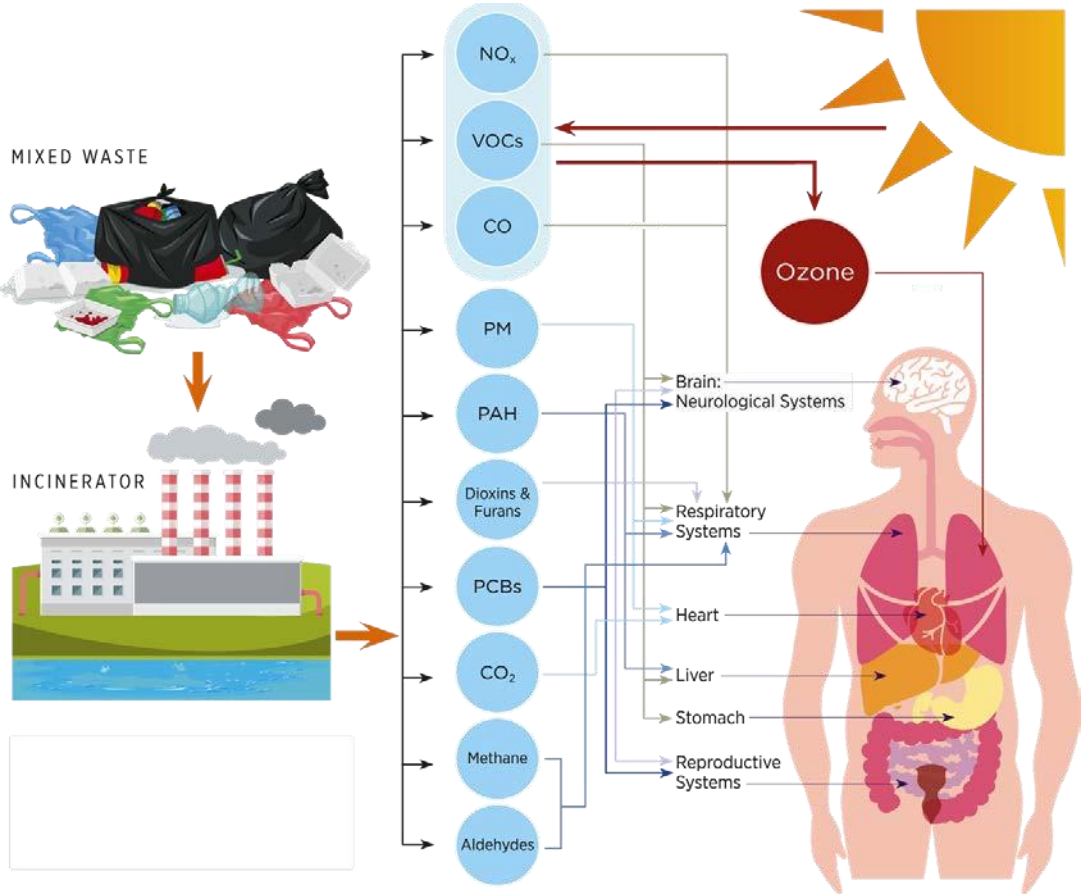


Рисунок 2.1 – Токсичний вплив від спалених змішаних відходів, що містять пластик. NOx – оксиди азоту; ЛОС – леткі органічні сполуки; CO – чадний газ; PM – тверді частинки; PAH – поліциклічні ароматичні вуглеводні; ПХБ – поліхлорований біфеніл [22]

Видобуток нафти і газу, сировини з якої виготовляються первинні полімерні вироби, щорічно викидає понад 9 мільйонів тонн метану та інших забруднюючих речовин, таких як леткі органічні сполуки (ЛОС). ЛОС, змішуючись з оксидами азоту (NO_X), на сонячному світлі утворюють озон або смог на рівні землі. Озоновий смог вплинув на сільські райони та може поширюватися на відстань до 200 миль від джерела [21, 22].

Викиди небезпечних забруднювачів повітря під час спалювання/горіння пластмас. Небезпечними забруднювачами повітря є речовини, які, як

підозрюється, викликають рак, репродуктивні та вроджені вади розвитку або інші серйозні негативні наслідки для людини та навколишнього середовища. Виробництво пластмас призводить до викиду багатьох із цих речовин. 60% усього пластику, коли-небудь виробленого, було викинуто. З цих відходів 60% потрапило в навколишнє середовище, 12% було спалено, і лише 9% було відновлено для переробки. Спалювання/горіння перетворює одну форму відходів на інші форми відходів, включаючи токсичні викиди та токсичний попіл. Викиди від спалювання відходів включають метали (ртуть, свинець та кадмій тощо), органічні сполуки (діоксини, такі як поліхлоровані дибензо-п-діоксини, ПХДД) та фурани, ПАВ, ЛОС та інші СОЗ, включаючи поліхлоровані дибензофурани (ПХДФ), ПХБ та гексахлорбензол (ГХБ), кислі гази (такі як SO_2 та HCl), тверді частинки (пил та пісок), оксиди азоту, чадний газ та вуглекислий газ (CO_2). Дим та тверді частинки, що викидаються, можуть спричинити проблеми з диханням, особливо у дітей, людей похилого віку, людей з астмою та тих, хто має хронічні захворювання серця або легень, тоді як ПХДФ та ПХБ є відомими канцерогенами, а викидані метали – нейротоксичними речовинами. Токсини з викидів, летючої золи та зольного попелу долають великі відстані та осідають у навколишньому середовищі, зрештою потрапляючи в організм людини після накопичення в тканинах рослин і тварин [21, 22].

2.1.1 Вплив мікропластикових часточок на якість повітря

Сучасні дослідження довели, що повітря наразі містить значемі концентрації мікропластикових часток. На відкритому повітрі вплив таких часточок пом’якшується через інтенсивну циркуляціє повітряних мас, що створюють ефект розсіювання. Що стосується приміщень, де основне обладнання та предмети інтер’єру виготовлені з полімерних матеріалів, концентрація шкідливих речовин досить часто знаходиться на межі ГДК. Найбільш небезпечна ситуація для здоров’я людини спостерігається безпосередньо на виробничих приміщеннях первинного виробництва полімерних виробів та при вторинній переробці пластикових виробів. Частинки

пластику в повітрі накопичуються на шкірі, їжі, що призводить до впливу на шкіру та шлунково-кишковий тракт. Дослідження припускають, що легені людини можуть піддаватися впливу 26–130 частинок мікропластику в повітрі на день. Пластик, що переноситься повітрям, також може розсіюватися глобальними повітряними потоками. Після вдихання більшість волокон, ймовірно, потрапляють у рідину, що зволожує легені. Частинки розміром >1 мкм, проходячи через верхні дихальні шляхи, де слизова оболонка легень товста, можуть обійти слизову оболонку легень, що дозволяє їм поглинатися бронхіальним епітелієм. Тонші частинки пластику можуть проникати в тоншу рідину, та контактувати з епітелієм, а потім переміщуватися по всьому тілу [22].

2.1.2 Хімічні речовини, що викидаються в результаті спалення полімерних виробів

Чадний газ – це газ без запаху, кольору та токсичний газ. При низьких рівнях впливу чадний газ викликає легкі наслідки, які часто помилково приймають за грип. Ці симптоми включають головний біль, запаморочення, дезорієнтацію, нудоту та втому. Чадний газ перешкоджає здатності крові переносити кисень до мозку, серця та інших тканин. Залежно від кількості, що вдихається, Чадний газ може уповільнювати рефлекси та викликати втому, головний біль, сплутаність свідомості, нудоту та запаморочення, а у великих кількостях може призвести до смерті від задухи.

Діоксини викликають серйозне занепокоєння навіть у дуже малих кількостях і пов'язані з порушенням багатьох ендокринних шляхів, підвищеним ризиком ішемічної хвороби серця, когнітивними та руховими порушеннями, а також ендометріозом. Вони є канцерогенами для людини та можуть збільшити ризик раку молочної [20, 22].

Етилбензол – це безбарвна рідина, що міститься в ряді продуктів, включаючи бензин та фарби. Він природним чином міститься у вугільній смолі та нафті, а також у промислових продуктах. Вдихання дуже високих рівнів

етилбензолу може спричинити запаморочення та подразнення горла й очей. Вдихання нижчих рівнів призводить до порушення слуху та пошкодження нирок у тварин. Вплив високих рівнів етилбензолу в повітрі протягом коротких періодів може спричинити подразнення очей та горла. Вплив вищих рівнів може призвести до запаморочення. Незворотне пошкодження внутрішнього вуха та слуху спостерігалося у тварин, які зазнавали впливу відносно низьких рівнів етилбензолу протягом кількох днів або тижнів. Вплив відносно низьких рівнів етилбензолу в повітрі протягом кількох місяців або років призводить до пошкодження нирок у тварин. Етилбензол є можливим канцерогеном для людини [21, 22].

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ): ПАВ – це група з понад 100 хімічних речовин, що утворюються під час неповного згоряння інших органічних речовин. ПАВ зазвичай зустрічаються у вигляді складних сумішей. Деякі з ПАВ, включаючи бенз[a]антрацен, бензо[a]пірен, бензо[b]флуорантен, бензо[j]флуорантен, бензо[k]флуорантен, хризен, дибенз[a,h]антрацен та індено[1,2,3-c,d]пірен, викликали пухлини у лабораторних тварин, коли вони вдихали ці речовини в повітрі, коли їх їли або коли мали тривалий контакт з ними на шкірі. Дослідження на людях показують, що вплив ПАВ призводить до раку. Дослідження на тваринах також показують проблеми з репродуктивною та імунною системами [20, 23].

Діоксид сірки. Наслідки для здоров’я включають подразнення верхніх дихальних шляхів, подразнення очей та задишку.

Толуол – це прозора, безбарвна рідина з характерним запахом. Толуол природним чином міститься в сирій нафті, а також утворюється в процесі виробництва бензину та інших видів палива з сирої нафти та коксу з вугілля. Толуол має оборотний вплив на печінку, нирки та нервову систему; нервова система, здається, найбільш чутлива до його впливу. Анестезуюча дія толуолу може призвести до швидкого пригнічення центральної нервової системи та наркозу при високих концентраціях. Випаровування після проковтування та гіпоксія після аспірації можуть сприяти токсичності ЦНС [20, 23].

2.2 Вплив виробничої галузі по виготовленню пластикових виробів на зміни клімату

Пластикові відходи у вигляді мікропластику проникли в усі куточки нашої планети, з'являючись навіть у віддалених гірських та полярних районах, де вони мають помітний вплив на клімат. Зокрема, світлопоглинальні властивості мікропластику можуть сприяти прискореному потеплінню, зменшуючи відбивну здатність (альбедо) снігу та льоду [25]. Нещодавні оцінки показують, що витік пластику в навколишнє середовище подвоїться з 22 до 44 мільйонів тонн між 2019 і 2060 роками [26].

Деградація пластмас, зокрема шляхом фотодеградації, була визначена як джерело викидів парникових газів. Повідомлялося про викиди метану та етилену з різних типів пластику, зокрема з ПЕНЩ, який демонструє найвищі показники викидів [27]. ПЕНЩ плаває на поверхні води і разом з 65 відсотками всіх вироблених полімерів має меншу щільність, ніж морська вода. Це, у свою чергу, призводить до величезної кількості вільно плаваючих пластмас у водному середовищі. Більше того, оскільки пластик розкладається на мікро- та нанопластики, збільшується виробництво парникових газів. Було показано, що такі мікрочастинки у товщі води негативно впливають на фотосинтез та ріст фітопланктону та зменшують здатність зоопланктону функціонувати як поглиначі вуглецю [28]. Крім того, викиди від первинних пластмас зростають з часом, тоді як викиди старих пластмас відносно стабільні, можливо, через попереднє використання [27]. Однак час розкладання пластикового виробу сильно залежить від використаного полімеру, його товщини та маси, що зрештою призводить до утворення мікропластику. Крім того, пластикові добавки можуть вимиватися з пластмас у навколишнє середовище під час вивітрювання. Ці добавки потім можуть поглинатися такими організмами, як фітопланктон, які діють як основні поглиначі вуглецю [27].

Менш щільні первинні пластикові полімери можуть тонути при біозабрудненні або потраплянні в організм, або тонути у вигляді морського снігу, тоді як інші мають вищу щільність, що призводить до їхнього опускання. При осіданні в осадових породах пластик, що опускається, може потрапити в довгострокову секвестрацію. Тому осади можуть стати значними поглиначами пластику, особливо осади з мінімальним ресуспензією. У мангрових заростях Червоного моря та Перської затоки рівень мікропластику в зразках осаду, що датується 1930-ми роками, експоненціально зріс з 1950-х років, що відповідає світовим тенденціям виробництва пластику. Приблизно 50 ± 30 мільйонів тонн та 110 ± 80 мільйонів тонн пластику, можливо, було поховано у верхніх 20-сантиметрових шарах осаду [29]. Отже, будь-яке порушення, спричинене пластиком, в екосистемах захоплення вуглецю, включаючи мангрові зарості, може створити негативний зворотний зв'язок, який посилює зміну клімату. Більше того, ресуспензія осаду продовжуватиме викидати парникові гази з похованого пластику ще багато років. Нещодавні дослідження також задокументували вивільнення метану з мікропластику, знайденого в донних відкладеннях, показуючи, що менші розміри частинок пов'язані зі збільшенням викидів [31].

Більш пізні дослідження розглядали вплив мікропластику в наземних системах, наприклад, його присутність у ґрунтах. Якщо ґрунт забруднений мікропластиком, накопичений органічний вуглець, присутній у ґрунті, та інші парникові гази, такі як метан та закис азоту, можуть викидатися в атмосферу через посилення дихання ґрунту. Цікаво, що оскільки пластик містить вуглець, він може утворювати значну частину загального вуглецю в ґрунті . Це може призвести до різних проблем, таких як зниження росту рослин, зниження рівня азоту в ґрунті та підвищена присутність мікробної біомаси [32]. Подібні проблеми існують і в морських відкладеннях, де пластик призводить до того, що відкладення мають знижену здатність поглинати вуглець. Це було повідомлено для мангрових дерев в екосистемах блакитного вуглецю [31].

Забруднення пластиком, яке перебільшує зміну клімату через позитивні петлі зворотного зв'язку, також може виникати в атмосфері. Zhang, Kang and Gao 2022 виявили, що мікропластик у повітрі може спричиняти позитивні петлі зворотного зв'язку, що впливають на сонячну радіацію [25]. Присутність мікро- та нанопластиків в атмосфері може впливати на формування хмар, що може змінити альбедо хмар та кількість опадів у достатній кількості, що разом впливає на клімат Землі. Мікро- та нанопластики можуть діяти як дрібні частинки хмар або льоду після проходження процесів старіння навколишнього середовища. Однак вплив мікро- та нанопластиків Вплив на клімат залежить від їхньої кількості порівняно з іншими частинками. Наразі концентрації мікро- та нанопластику в атмосфері низькі, з обмеженим впливом на регіони, які зараз стикаються з високою концентрацією частинок у повітрі. Однак, якщо викид мікро- та нанопластику збільшиться, це може призвести до значних змін у майбутньому [31].

У таблиці 2.1 підсумовано вищезгадані негативні петлі зворотного зв'язку щодо мікропластику в навколишньому середовищі, які можуть посилити зміну клімату.

Таблиця 2.1 – Зведений огляд циклів зворотного зв'язку мікропластику в навколишньому середовищі [21, 30, 31]

Осади	Водне середовище	Грунт	Атмосферне повітря	Кріосфера
Викиди метані від мікропластику у нижніх шарах осадів	Скорочення частки зоопланктону, що приймає участь у поглинання сполук карбону Негативний вплив на фітопланктон, як результат пригнічення фотосинтезу та росту.	Збільшення вмісту мікропластику призводить до збільшення інтенсивності дихання ґрунтів, як наслідок збільшення виділення парникових газів.	Мікропластик, що переноситься повітрям, може викликати позитивний зворотний зв'язок на сонячну радіацію.	Світлопоглинальні властивості мікропластику можуть сприяти прискореному потеплінню шляхом зменшення альбедо поверхні снігу та льоду

Хоча більшість досліджень наразі зосереджені на петлях зворотного зв'язку щодо пластику в навколишньому середовищі, все ще існує велика прогалина щодо прямих зв'язків між зміною клімату та забрудненням пластиком, як у морському, так і в наземному середовищі [27, 31].

2.3 Вплив пластмас на біорізноманіття гідросфери

Забруднення пластиком є однією з основних загроз біорізноманіттю. В океанах пластикове сміття становить понад 90% усіх полютантів [33]. Згідно з Червоним списком Міжнародного союзу охорони природи (МСОП), щонайменше 17% видів, що постраждали від полютантів пластикової природи. Заплутування та проковтування відходів полімерних виробів часто призводить до шкоди або смерті, хоча зібрані дані свідчать про те, що заплутування є набагато більш смертельним (79% усіх випадків), ніж проковтування (4% усіх випадків) [33].

Взаємодія організмів із пластиковим сміттям призводить до широкого спектру наслідків, як прямих, так і непрямих, включаючи потенційну виникнення сублетальних ефектів, які через свою невизначеність можуть викликати значне занепокоєння. Загалом, присутність більших пластикових матеріалів в океані також може утворювати нові середовища існування для безхребетних. Розселення видів у морському середовищі, особливо видів без пелагічної личинкової стадії, зросло за останні десятиліття. Багато видів, які дуже залежать від океанічних течій, завжди плавали на плотах, використовуючи природні матеріали, такі як деревина, але індустріалізація та постійне збільшення кількості пластикового сміття в океанах свідчать про те, що плоти відіграють активну роль у їхньому розсіюванні [33]. Це стосується також інвазивних видів. Яскравим прикладом є детальна присутність інфузорії Halofolliculina, патогену, який може бути винуватцем хвороби ерозії скелета, що вразила карибські та гавайські корали [34].

Через свій малий розмір, мікропластик може поглинатися багатьма організмами, включаючи ссавців, птахів та риб. Хоча точні механізми токсичності цих матеріалів досі погано вивчені, наслідки потенційно зумовлені:

1. стресом, викликаним ковтанням, таким як фізична блокада, витрати енергії на травлення та помилкове насичення;
2. витоком хімічних речовин, таких як добавки, з пластику;
3. впливом забруднюючих речовин, адсорбованих (і згодом вивільнених) мікропластиком, такими як стійкі органічні забруднювачі (СОЗ).

Було досліджено, що кнідарії, анеліди, інфузорії, коловертки, веслоногі рачки, амфіподи, евфаузіїди, мідії, вусоногі, тунікати, птахи та риби поглинають ці полімери малого розміру в лабораторних умовах [35]

Цікаво, що результати показали, що поглинання мікропластику залежить не лише від їхньої форми та розміру, але від їхнього кольору, з переважним поглинанням жовтих частинок. Ймовірно, це пов'язано з їхньою схожістю зі здобиччю [35]. Прямі наслідки потрапляння мікропластику включають обструкцію травного тракту та внутрішні травми, що часто призводить до зниження споживання їжі та супутнього зниження поживних речовин. Це потенційно призводить до голодування та смерті. У організмів, що дихають повітрям, описано, що мікропластик осідає в зябрах, що може призвести до зниження частоти дихання. Роботи, присвячені впливу цих широко поширених матеріалів у наземних умовах, залишаються обмеженими. Однак, хоча ґрунти значно відрізняються від водних середовищ, характеристики, необхідні для біоти, ідентичні, оскільки багато організмів процвітають у невеликих водоймах, які існують на поверхні або трохи нижче, що робить їх по суті водними організмами.

Мікропластик також може поглинатися дощовими черв’яками та кліщами, що, ймовірно, призводить до їхньої присутності та накопичення в харчових ланцюгах [33]. Наприклад, спостерігалося значне зниження темпів росту дощового черв'яка Lumbricus terrestris, що супроводжувалося вищими показниками смертності. Ці дощові черв'яки також переносили мікропластик з

підстилки у своїх норах та ефективно відбирали за розміром та транспортували ці матеріали вниз у ґрунт. Також було помічено, що поглиналися лише дрібні частинки, яким піддавалися дощові черв’яки, що може мати глибокі наслідки для долі та ризику мікропластику в наземних екосистемах, враховуючи переважну роль, яку дощові черв'яки відіграють у формуванні фізичних властивостей ґрунтів [35].

Тим не менш, пластикові матеріали не становлять небезпеки виключно окремо, або, іншими словами, самі по собі. Дослідники нещодавно почали використовувати нову класифікацію цих матеріалів, засновану на використанні постійно зростаючого списку добавок, що додаються до комерційних пластмас, так званих пластицидів.

По - суті, пластмаси є біохімічно інертними. Однак ці добавки, часто з низькою молекулярною масою та хімічно не зв'язані з полімерами, можуть викликати біохімічні ефекти. Залишкові мономери, що містяться в полімерах внаслідок неповних реакцій полімеризації, також можуть мігрувати з матриці, як і розчинники та інші органічні забруднювачі, адсорбовані пластмасами з навколишнього середовища. Ці речовини потім можуть вилуговуватися з пластикових матеріалів і, оскільки більшість з них часто є ліпофільними, мають притаманну спорідненість до клітинних мембран.

Виміряні токсикологічні наслідки також пояснюються деякими з найбільш широко використовуваних пластифікаторів, що містяться у пластикових виробах, перелічених у таблиці 2.2 [35].

ПВХ, ПС та полікарбонат (ПК) вивільняють токсичні мономери, пов’язані з розвитком репродуктивних порушень, а також раку у безхребетних, гризунів та людей.

Таблиця 2.2 – Поширені пластикові добавки, що використовуються у виробництві пластикових виробів [35].

Добавки/функції	Приклади
Пластифікатори: Естери Аліфатичні естери Поліестери Фосфати Фталати	Бензилбутилфталат Диізогептилфталат Диізобутилфталат Дибутилфталат Біс(2-етилгексил)фталат Біс(2-метоксиетил)фталат Трис(2-хлоретил)фосфат
Антипірени	Борна кислота Бромовані антипірени Трис(2-хлоретил)фосфат Хлоровані парафіни з коротким та середнім ланцюгом
Стабілізатори Антиоксиданти Консерванти Абсорбенти Біологічні стабілізатори УФ-стабілізатори	Сполуки миш'яку Триклозан Органічні сполуки олова Барій-кадмій-цинк-епоксифосфіт Бісфенол А (BPA) Октилфенол Нонілфенольні сполуки Сполуки кадмію Сполуки свинцю
Барвники	Діоксид титану Сполуки кадмію Діацетат кобальту(II) Сполуки хрому Сполуки свинцю
Затверджувачі	Формальдегід 4,4’ -Діамінодифенілметан 2,2’-дихлор-4,4’-метилендіанілін
Антистатики	Аміни Четвертинні амонієві сполуки Органічні фосфати Естери поліоксіетиленгліколю
Допоміжні речовини для обробки Мастила Регулятори потоку Інші допоміжні речовини	Стеарати кальцію, цинку та свинцю Жирні естери Аміди Нафтовий та поліетиленовий воски

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКОВИМИ ЧАСТОЧКАМИ РІЧКОВИХ СИСТЕМ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Відходи полімерної промисловості все частіше потрапляють до компонентів навколишнього середовища де проходять етапи фізичної, хімічної та біологічної деструкції. В результаті цих процесів хімічно інертні полімерні відходи перетворюються мікрополютанти з високою ступеню потенційної токсичності. Деструктивні процеси руйнування полімерних відходів переважно відбуваються на поверхні ґрунтів, а утворенні деструктивні часточки із атмосферними стоками потрапляють до природної гідросфери.

3.1 Шляхи надходження мікропластикових полютантів до природних водойм

В результаті природної або техногенної деструкції полімерних відходів, утворюється клас пластикових частинок розміром менше 5 мм. Часточки такого розміру відносять до групи мікропластику. Ця група полютантів є причиною значного занепокоєння з боку науковців, особливо з приводу впливу цієї групи забруднюючих речовин на водні екосистеми [36].

Якщо розглядати джерело надходження полімерних відходів із промисловими стічними водами, то без сумнівно ці води мають проходити жорсткий контроль на вміст мікропластикових забруднень та мають вдосконалюватись технології очистки промислових стічних вод від цього полютанту. Значно складніше виявляється ситуація з поверхневими стічним водами, що формуються на урбанізованих територіях. Через великі площі водозбору та великої кількості водовідвідних шляхів проконтролювати шляхи надходження полютантів та якість стічної води буває надзвичайно складно. Як наслідок деякі водні об’єкти мають настільки високу ступінь забруднення води, що відбулось їх повне деградування як джерел водопостачання. Пластикові залишки із групи мікропластикових полютантів закупорюють органи та коріння рослин і тварин [37]. Але окрім механічного впливу на живі організми була

встановлена синергійна дія, що підвищувала токсичний ефект інших полютантів, що знаходились у водному середовищі. Мікропластикові часточки виступали адсорбуючими острівцями для інших забруднюючих речовин у воді, в результат ці речовини накопичуючись на поверхні пластикових відходів вступали у взаємодію між собою створюючи складне забруднення гідросфери і призводячи таким чином до збільшення токсичної дії цих забруднюючих речовин [38].

3.2 Основні небезпеки мікропластику для водного середовища

Основні небезпеки потрапляння мікропластикових забруднень до водного середовища можна представити наступним чином [38]:

1. Утворення щільної плівки на поверхні водойми, що скорочує дзеркало природного водного об’єкта, як результат порушення світлового режиму водойми та газообміну у ній.
2. Термічне розкладання полімерних матеріалів, а також деструкція в результаті дії мікробіологічних та хімічних агентів.
3. Розкладання при впливі фізичного фактору, зокрема ультрафіолетового випромінювання і потрапляння у довкілля продуктів розпаду. Ці продукти деструкції полімерних матеріалів значно підвищують екологічну небезпеку гідросфери.

Існують певні суттєві складнощі при оцінці кількість часточок, які надходять до живих організм, а також досить складно визначити всі джерела надходження мікропластику до поверхневих стічних вод, а також, існує серьозна проблема з ідентифікацією мікропластикових часточок

3.3 Об’єкт експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились на території м. Харків. У довоєнний період населення міста сягало близько 2 млн. чол. Місто постійно потребує збільшення кількості та розширення рекреаційних зон з залученням водних об’єктів. На жаль в сучасних умовах природні водні об’єкти міста

знаходиться під постійним потужним техногенним та антропогенним тиском, що призводить до деградації природних водних джерел [39].

Об’єктом експериментальних досліджень слугували донні відкладення річки Студенок, що знаходиться в південно-східній частині міста (рис. 3.1).

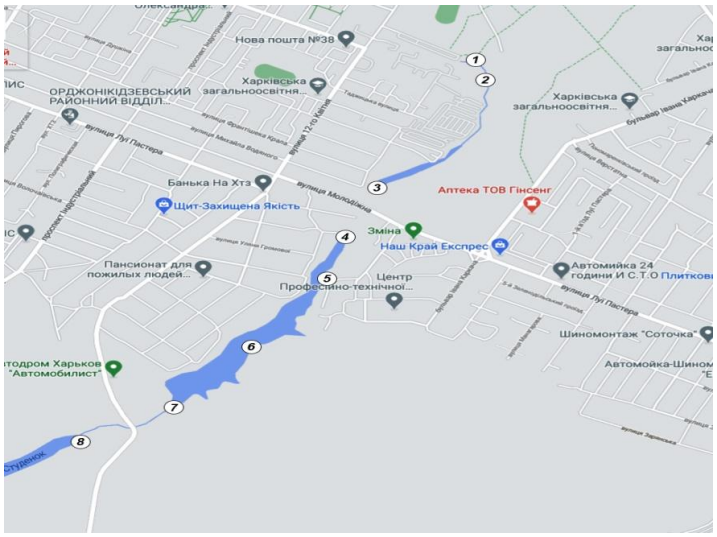


Рисунок 3.1 – Місця відбору проб донних відкладень на р. Студенок [39]

3.4 Методи відбору проб та методика дослідження вмісту мікропластикових чатсочок у донних відкладеннях

Для відбору зразків донних відкладень використовували донні черпалки, які дозволяли відбирати зразки мулових відкладень на річці Студенок. Для об’єктивної оцінки ступеня забруднення річки мікропластиком та виявлення можливих джерел надходження полютантів до природної водойми відбір проб проводили у 8 точках у продовж основного русла річки.

Для виявлення мікропластикових часточок використовували метод седиментації та флотації. Для цього використовували серію сольових розчинів різної щільності, що дозволило відділити органчну та мінеральну складову мулових осадів від полімерних часточок. Подальше дослідження виявлений мікрополютантів та їх ідентифікацію проводили методом мікросопіювання. Концентрацію часток мікропластику в донних відкладеннях, ґрунті та піску виражають або у штуках на кг субстрату, або в мг/кг [39].

3.5 Результати експериментальних досліджень

В ході дослідження було зроблено рід мікрофотографій з часточками пластику, які були вилучені з донних відкладень р. Студенок. Результати мікросопіювання часточок мікропластику представлено на рисунку 3.2.

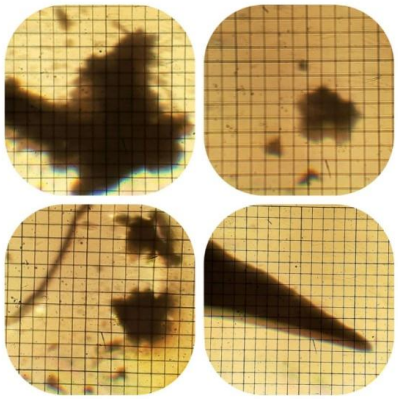


Рисунок 3.2 – Мікрофотознімки частинок мікропластику, вилучених з донних відкладень р. Студенок, при збільшенні х70 [39]

Таким чином, завдяки проведеним дослідження виокремили часточки пластику та визначити його розмір. Вилучені частинки пластику за розміром коливались у межах від 6 мкм до 0,2-0,3 мм, такі результати дозволяють віднести виявлені забруднення до групи мікропластикових полютантів. За допомогою методу мікроскопії серед часточок мікропластику, які далось вилучити з мулових проб є прозорі й непрозорі, а також волосні. Непрозорі за візуальними характеристиками можливо відносяться до полістиролу та поліхлорвінілу – найтоксичніших видів цього забруднення.

Результати визначення вмісту мікропластику в донних відкладеннях р. Студенок наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вміст мікропластику в донних відкладеннях р. Студенок [39]

Об’єкт досліджень	Вміст мікропластику, мг/кг	Фракціонування мікропластику за питомою вагою, шт.		
		2,1-2,3 г/см^3	0,8-1,7 г/см^3	≤0,8 г/см^3
Т2	1709,2	4	11	215
Т4	475,0	11	31	220
Т6	318,0	0	24	177
Т7	1139,0	19	41	542
Т8	938,8	18	37	487

В досліджуваних зразка, що було відібраних вздовж русла річки Студенок, вміст мікропластику коливалась в межах від 318,0 до 1709,2 мг/кг з переважанням часточок з найменшою питомою вагою (≤0,8 г/см^3). При кількісному аналізі мікропластикових полютантів виявилось, що точки №2 та №7 характеризувались як найбільш небезпечні ділянки річки за вмістом мікропластику в донних відкладеннях. Паралельний аналіз берегової лінії річки Студенок показав, що саме в цих місцях були виявлені стихійні звалища сміття. В точці №2 розташовувалось несанкціоноване звалище будівельного сміття, а поруч з точкою №7 – відвали земельних відходів з виробничих підприємств міста. Ймовірно, що саме ці скупчення та нагромадження відходві різного тапу стали причиною підвищенного надходження полімерних відходів до річки Студенок із наступною деструкцією цих полютантів і утворення мікропластикового забруднення, що з рештою осіло у донних відкладення річки [39].

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МІКРОПЛАСТИКОВИХ ПОЛЮТАНТІВ

Оцінка екологічної небезпеки від пластикових виробів — це системний процес, який враховує весь життєвий цикл пластику: від виробництва до утилізації. Нижче наведено покрокову схему та основні критерії, за якими можна оцінити та кількісно або якісно визначити рівень екологічного ризику.

4.1 Визначення об’єкта екологічної оцінки

Перш за все потрібно уточнити для якого тип пластику проводиться розрахунок екологічної оцінки (наприклад, PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS тощо), також необхідно визначити форму виробу (пляшка, пакет, упаковка, текстильне волокно) і обов’язково враховувати обсяги використання та тривалість служби. Ці всі параметри є ключовими при проведенні обрахування екологічної небезпеки пластикових відходів, що надходять до оточуючого середовища.

4.1.1 Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA)

Оцінка проводиться на всіх етапах LCA. На етапі видобутку сировини необхідно оцінити споживання нафти або газу, як базової сировини з якої виготовляються полімерні вироби, викиди CO_2 як основного виду парникових газів, що неодмінно надходить до атмосферного повітря під час обробки сировинних матеріалів, використання води у виробничому процесі. Наступний етап безпосередньо виробництво пластику. На цьому етапі спостерігається викиди летких органічних сполук (ЛОС), а також токсичних речовин до атмосфери. Разом із забруднюючими речовинами, що надходять до атмосферного повітря суттєвий вплив має значне енергоспоживання в процесі основного виробництва. Третій етап – безпосередньо використання. Тут можливе виділення мікропластику або токсичних добавок у продукти і воду при безпосередньому контакті, і таким чином мікропластикові часточки вмикаються у харчові ланцюги. Останній етап LCA – утилізація. Головні

проблеми пов’язані з переробкою, забруднення ґрунтів і вод, накопичення в екосистемах, токсичні продукти горіння [3, 4].

4.1.2 Ключові показники екологічної небезпеки

Основними показниками за якими визначають екологічну небезпеку пластикових виробів є:

1. Біорозкладність
- Час розкладу в природних умовах (роки/століття).
- Наявність біопластику або добавок, що прискорюють розклад.

2. Токсичність
- Наявність пластифікаторів, барвників, стабілізаторів (наприклад, фталати, бісфенол-А).
- Вплив на живі організми (LC_{50}, EC_{50}, NOAEL тощо).

3. Потенціал утворення мікропластику
- Ймовірність фрагментації під дією ультрафіолету або механічного стирання.

4. Перероблюваність
- Можливість вторинної переробки (маркування: 1–7).
- Енерговитрати та економічна доцільність переробки.

5. Обсяг накопичення у відходах
- Частка у загальній масі твердих побутових відходів.
- Частота потрапляння у природне середовище (водойми, ґрунт, моря).

4.2 Інтегральна оцінка

На сьогоднішній день не існує уніфікованої методики для оцінки потенційних небезпек, що можуть створювати різні типи пластикових відходів для довкілля. Аналізуючи вітчизняний, європейський та світовий досвід була зроблена спроба розробити методик обрахунку індексу екологічної небезпеки, для відходів полімерної природи. Методологія інтегрованих екологічних оцінок

(USEPA, Enviromenta Indexing) представлена у [40]. Європейска система оцінки екологічної небезпеки хімічних речовин – ECHA / REACH [41]. Методика розрахунку інтегрованого показника екологічної небезпеки (ІПЕН) [42, 43].

На основі вивчених матеріалів запропонована методикаа для обчислення кількісної оцінки індексу екологічної небезпеки (ІЕН) або екологічний рейтинг матеріалу, який можна розрахувати за формулою 4.1:

$$\text{IEH} = \sum_i \ w_\text{i} \cdot \text{S}_\text{i} \qquad (4.1)$$

де w_i – вага параметра (сума ваг=1)

Рекомендовані компоненти для оцінки екологічної небезпеки певного виду пластикових відходів (пояснення та запропоновані ваги)

Біорозкладність – тривалість розкладу, стійкість у довкіллі – $w_1 = 0{,}25$.

Токсичність – небезпека хімічних речовин, що виділяються (наприклад фталати, мономери тощо) – вага $w_2 = 0{,}30$.

Біоакумуляція / потенціал накопичення – здатність домішок / часточок мікропластиків накопичуватисьу біоті – $w_3 = 0{,}15$.

Перероблюваність – можливість вторинного використання – $w_4 = 0{,}20$.

Обсяг накопичення – кількість накопичення пластикових відходів – $w_5 = 0{,}20$

S_i— оцінка (бал) і-го параметра, шкала 1-5,

де 1= дуже низький ризик/вплив, 2 = низький ризик, 3 = середній, 4 = високий, 5=дуже високий.

В ході експериментального дослідження донних відкладень р. Студенок (результати наведені у розділі 3) було виявлено три основні типи полімерних відходів: поліетиленові плівки (залишки пакетів), прозорі пластикові мікрочастинки (ймовірно залишки пластикових пляшок) та непрозорі частинки (залишкі від виробів з полівінілхлориду). У зв’язку з отриманими результатами

подальшим кроком буде спроба оцінити екологічну небезпеку виявлених часточок полімерної природи.

4.2.1 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для поліетиленових пакетів (LDPE або HDPE)

Вихідні дані для розрахунку

Об’єкт: поліетиленовий пакет

Матеріал: LDPE (низького тиску) або HDPE (високого тиску)

Життєвий цикл: одноразове використання, частково перероблюваний

Таблиця 4.1 – Оцінка за п’ятьма критеріями

№	Показник	Позначення	Опис	Шкала (1 – дуже низький ризик, 5 – дуже високий)
1	Біорозкладність	S_1	Тривалість розкладу, стійкість у довкіллі	1–5
2	Токсичність	S_2	Наявність шкідливих добавок, вплив на живі організми	1–5
3	Утворення мікропластику	S_3	Ймовірність фрагментації на дрібні частинки	1–5
4	Перероблюваність	S_4	Можливість вторинного використання	1–5
5	Обсяг накопичення у відходах	S_5	Поширеність у побутових відходах	1–5

Таблиця 4.2 – Присвоєння оцінок LDPE або HDPE (на основі наукових і довідкових даних) [40, 41]

Показник	Оцінка Si	Пояснення
Біорозкладність (S_1)	3	Розкладається протягом 100 років
Токсичність (S_2)	2	Сам по собі нетоксичний, але при спалюванні виділяє токсичні гази
Біоакумуляція (S_3)	4	Під дією УФ та механічних факторів дробиться на частинки і захоплюється біотою
Перероблюваність (S_4)	3	Може перероблятись (HDPE/LDPE 2–4), але рівень переробки низький
Обсяг накопичення у відходах (S_5)	5	Дуже поширені у побутових і природних відходах

Таблиця 4.3 – Встановлення вагових коефіцієнтів w_i

Показник	Вага w_i	Пояснення
Біорозкладність	0.25	Найважливіший фактор
Токсичність	0.30	Вплив на всі компоненти екосистеми
Біоакумуляція	0.15	Суттєвий екологічний ризик
Перероблюваність	0.20	Важливий для управління відходами
Обсяг накопичення	0.20	Визначає масштаб проблеми

Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для

$$IEH = (0{,}25 \cdot 3) + (0{,}30 \cdot 2) + (0{,}15 \cdot 4) + (0{,}20 \cdot 3) + (0{,}20 \cdot 5) = 3{,}55$$

Таблиця 4.4 – Інтерпретація отриманого результату

Діапазон ІЕН	Рівень небезпеки	Характеристика
0–2	Низький	Екологічно безпечний матеріал
2–4	Помірний	Має певні ризики, потребує контролю
4–6	Високий	Суттєва екологічна загроза

Результат: ІЕН = 3.55 ≈ помірно-високий рівень екологічної небезпеки. Поліетиленові пакети є проблемними через довготривалу деградацію, утворення мікропластику та значну кількість у відходах, хоча й мають певну можливість переробки.

Пропозиції щодо зменшення небезпеки

- Перехід на багаторазові тканинні або біорозкладні пакети.
- Введення зборів або заборон на одноразові поліетиленові пакети.
- Розвиток системи збору та переробки поліетилену.
- Стимулювання використання вторинного поліетилену (recycled PE) у виробництві.

4.2.2 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для пластикових пляшок, зокрема з поліетилентерефталату

Вихідні дані

Об’єкт: одноразова PET-пляшка

Матеріал: поліетилентерефталат (PET)

Середній життєвий цикл: одноразове використання, придатний до переробки

Методика: 5 основних екологічних критеріїв

Вагові коефіцієнти w_i встановлюємо згідно таблиці 4.3

Розрахунок ІЕН для відходів з одноразової PET-пляшки

$$IEH = (0{,}25 \cdot 5) + (0{,}30 \cdot 2) + (0{,}15 \cdot 4) + (0{,}20 \cdot 3) + (0{,}20 \cdot 5) = 4{,}05$$

Отриманий результат: ІЕН = 4,05 — знаходиться на межі помірного та високого рівня екологічної небезпеки

Таблиця 4.5 – Присвоєння оцінки критеріям [40, 41]

Показник	Оцінка Si	Пояснення
Біорозкладність (S_1)	5	Розкладається понад 300–500 років, не біорозкладний
Токсичність (S_2)	2	Сам матеріал стабільний, але при нагріванні/спалюванні виділяє токсини (антипірени, ацетальдегід)
Біоакумуляція (S_3)	4	Руйнується на мікрочастинки у воді та ґрунті та захоплюється біотою
Перероблюваність (S_4)	2	Добре переробляється (PET — найцінніший полімер для вторинного використання)
Обсяг накопичення у відходах (S_5)	5	Масовий одноразовий виріб, значна частка у відходах

PET-пляшки завдяки високій перероблюваності несуть менше екологічної шкоди, але через практично повну відсутність біорозкладності, масовість у відходах та утворення мікропластику, цей тип пластикових відходів займає межуєте положення між помірним та високим рівнем екологічної небезпеки.

Заходи для зниження небезпеки:

1. Підвищити рівень збору і переробки PET (система заставної тари, контейнери).
2. Використовувати пляшки з переробленого PET (rPET).
3. Обмежити одноразове використання та заохочувати багаторазову тару.
4. Впроваджувати біо-PET (з біосировини, частково біорозкладний).

4.2.3 Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для полівінілхлориду (ПВХ, PVC)

Вихідні дані

Об’єкт: вироби з полівінілхлориду (ПВХ)

Матеріал: Polyvinyl Chloride (PVC)

Типові вироби: труби, віконні профілі, плівка, упаковка, підлогові покриття

Особливість: містить хлор і пластифікатори (фталати, стабілізатори) — основне джерело токсичності

Таблиця 4.6 – Присвоєння оцінки критеріям [40, 41]

Показник	Оцінка Si	Пояснення
Біорозкладність (S_1)	5	Практично не розкладається (понад 400 років)
Токсичність (S_2)	5	Містить хлор, фталати, свинець, виділяє діоксини при горінні
Біоакумуляція (S_3)	4	Руйнується на мікрочастинки, особливо під дією сонця
Перероблюваність (S_4)	4	Можлива лише обмежено — складна і енерговитратна
Обсяг накопичення у відходах (S_5)	3	Не такий масовий, як поліетилен чи PET, але значний у будівництві

Вагові коефіцієнти w_i встановлюємо згідно таблиці 4.7

Таблиця 4.7 – Вагові коефіцієнти w_i для вироби з полівінілхлориду

Показник	Вага w_i	Пояснення
Біорозкладність	0.25	Найважливіший параметр
Токсичність	0.25	Дуже суттєвий фактор для ПВХ
Мікропластик	0.15	Помірна вага
Перероблюваність	0.20	Має велике значення для управління відходами
Обсяг накопичення	0.15	Враховується, але менш критичний

Розрахунок індексу екологічної небезпеки (ІЕН) для відходів з ПВХ

$$IEH = (0{,}25 \cdot 5) + (0{,}25 \cdot 5) + (0{,}15 \cdot 4) + (0{,}20 \cdot 4) + (0{,}15 \cdot 3) = 4{,}35$$

Результат: ІЕН для відходів з ПВХ = 4.35 — високий рівень екологічної небезпеки

Основні екологічні проблеми ПВХ

- Виділення токсичних речовин (HCl, діоксини, фталати, свинець) при нагріванні, горінні або розкладі.
- Складність переробки — потребує сортування, термічної деструкції та очищення від добавок.
- Висока стійкість у природі → накопичення в екосистемах.
- Потенційне вивільнення мікропластику зі старих покриттів і виробів.

Рекомендації:

1. Зменшення використання ПВХ у побутових товарах і упаковці.
2. Заміна на поліетилен або поліпропілен (менш токсичні).
3. Використання безхлорних стабілізаторів і пластифікаторів.
4. Утилізація під контролем (не спалювати на відкритому повітрі!).
5. Розробка технологій хімічного рециклінгу (деполімеризація, піроліз).

РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ КОМПОНЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

5.1 Технології захисту атмосферного повітря

Під час хімічного синтезу полімерів (полімеризації) до навколишнього середовища потрапляють леткі органічні сполуки (ЛОС), а разом із ними і інші токсичні речовини, такі як бензол, толуол, стирол, формальдегід. Ці речовини мають канцерогенні властивості та можуть призводити до ураження дихальної та нервової систем.

ЛОС (леткі органічні сполуки) охоплюють широкий спектр сполук з різними хімічними функціональними можливостями та фізичними властивостями. Під час тестування очищувачів повітря або технологій очищення повітря толуол часто використовується як показник усіх ЛОС [44, 45]. Загалом, видалення газоподібних забруднювачів, таких як ЛОС, вивчено менше [46]. Сорбційна фільтрація з використанням активованого вугілля була визначена як найефективніша комерційна технологія для загального видалення ЛОС у приміщенні [47]. Однак не всі ЛОС адсорбуються однаково добре.

Сучасні наукові дослідження [47] показали, що легкі та дуже леткі органічні сполуки (ЛОС), такі як формальдегід та ацетальдегід, не можуть бути ефективно видалені лише активованим вугіллям [47]. Крім того, відносна вологість та концентрації забруднювачів впливають на ефективність адсорбції. Слід уникати відносної вологості, що перевищує 60%, щоб мінімізувати конкуренцію за місця адсорбції [48]. Загальновизнано, що залежність від місць адсорбції може призвести до насичення фільтра. Крім того, оскільки леткі органічні сполуки (ЛОС) просто утримуються на фільтрі шляхом фізичної адсорбції, рівновага адсорбції є оборотною, що потенційно дозволяє повторне вивільнення ЛОС [48]. З цієї причини нові та більш досконалі технології, такі як фотокаталітичне окислення (ФКО), викликали інтерес.

Фотокаталітичне окислення має на меті окислювати леткі органічні сполуки (ЛОС) до CO_2 та H_2O, тим самим видаляючи їх назавжди. TiO_2 є одним з найпоширеніших каталізаторів для цієї мети [49, 50]. Попередні дослідження довели концепцію використання фотокаталітичне окислення в реакторах та виявили значні коефіцієнти конверсії (>90% для кількох ЛОС) [44, 50]. Однак, що стосується адсорбції, було виявлено, що ефективність фотокаталітичного окислення залежить від кількох факторів, включаючи цільові ЛОС, вологість, концентрації забруднюючих речовин, швидкість потоку, а також інтенсивність світла та довжину хвилі [44, 45]. Сучасні дослідженн [50] визначили три основні перешкоди, пов’язані з використанням фотокаталітичного окислення: 1) утворення побічних продуктів, 2) можливі викиди озону внаслідок УФ-ламп та 3) обмежений термін служби фотокаталізатора. У зв’язку з цим, попередні дослідження виявили широкий спектр побічних продуктів від використання очищувачів повітря на основі фотокаталітичного окислення, деякі з яких були пов’язані з різноманітними наслідками для здоров’я. Побічні продукти, виявлені в газовій фазі, включають, але не обмежуються, формальдегід, метанол, ацетальдегід, мурашину кислоту/етанол, ацетон та оцтову кислоту [47]. Подібно до фотокаталітичного окислення, побічні продукти також були виявлені з очищувачів повітря на основі фотоелектрохімічного окислення (PECO), включаючи формальдегід, ацетон та оцтову кислоту [48, 49].

Зрештою, результати показують, що очищувачі повітря можуть ненавмисно виступати джерелом забруднення летючими органічними сполуками (ЛОС) через повторне викидання адсорбованих забруднюючих речовин та утворення побічних продуктів під час роботи. Хоча перше було визнано значним для розчинів на основі адсорбції після насичення фільтра певними ЛОС, утворення побічних продуктів було пов'язане з очищувачами повітря, що містять УФ-лампи [44].

Окрему небезпеку становлять частинки мікропластику та пластиковий пил, які утворюються під час механічної обробки матеріалів або внаслідок руйнування пластикових виробів. Вони можуть потрапляти у повітря і через

дихальні шляхи – у організм людини, де спричиняють запальні процеси та порушення обміну речовин.

Таким чином, виробництво пластикових виробів є значним джерелом забруднення атмосферного повітря, що становить серйозну екологічну та санітарну загрозу. Це зумовлює необхідність впровадження більш екологічно безпечних технологій, підвищення рівня переробки пластмас і поступового переходу до біорозкладних матеріалів.

5.2 Технології захисту гідросфери

5.2.1 Методи видалення та контролю мікропластику у стічних водах

У зв’язку з поширеним забрудненням водних екосистем мікропластиком у сфері екологічної інженерії було розроблено значну кількість технологій його вилучення та контролю, що ґрунтуються на фізичних, хімічних і біологічних підходах. Ці методи пройшли експериментальну перевірку та впроваджені у практику. За результатами відповідних досліджень встановлено, що процеси механічного перехоплення (зокрема швидка піщана фільтрація та мембранна фільтрація) і процеси седиментаційного типу (флокуляція, коагуляція, відстоювання) на очисних спорудах здатні забезпечувати високу ефективність вилучення мікропластикових частинок, яка коливається в межах 40–99,9% [51]. Зокрема, використання мембранних біореакторів (MBR) дає змогу досягати ефективності видалення до 99,9% на етапі первинного очищення стічних вод, тоді як швидка піщана фільтрація та флотація розчиненим повітрям забезпечують відповідно близько 97% та 95% ефективності на стадії вторинного очищення.

Попри те що очисні споруди здатні суттєво зменшувати загальну кількість мікропластику, який надходить у водні об’єкти, їхнє навантаження залишається значним через великі добові об’єми води. Окремі дослідження також вказують на те, що УФ-опромінення може прискорювати процеси фотодеградації мікропластику, однак повне розкладання частинок потребує

десятків або навіть сотень років. Крім того, швидкість деградації у водному середовищі є нижчою порівняно з умовами ґрунту чи атмосфери [51].

Одним із перспективних напрямів є біологічні методи видалення мікропластику. У природних екосистемах виявлено низку комах та мікроорганізмів, здатних перетворювати мікропластикові фрагменти на вуглекислий газ, воду та біомасу, що потенційно може стати ефективною стратегією для подолання проблеми мікропластикового забруднення. Однак сучасні дослідження таких організмів здебільшого зосереджені на наземних екосистемах, тоді як дані щодо водних середовищ залишаються обмеженими. Наявні роботи переважно присвячені виділенню штамів мікроорганізмів, здатних до деградації морського мікропластику [51], тоді як характеристика процесів розкладання у воді та метаболічні механізми залишаються малодослідженими.

На сьогодні описано близько 30 родів мікроорганізмів, здатних до біодеградації різних типів пластиків, серед яких полістирол (PS), поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліуретан (PUR), поліетилентерефталат-гліколь (PET), полівінілхлорид (PVC) та інші полімерні матеріали. Окрім того, нещодавно запропоновано новий інтегрований підхід, що поєднує гідротехнічні та екологічні технології для збору і вилучення мікропластику з водних екосистем. Метод передбачає зміну гідродинамічних параметрів русел та використання спеціальних конструкцій для концентрації мікропластикових частинок у визначених точках [51]. На ключових шляхах їхнього перенесення встановлюються перехоплювальні бар’єри, що забезпечують ефективне фільтрування, акумулювання та вилучення мікропластику з водного середовища. Такий підхід відкриває нові можливості для вдосконалення систем контролю та очищення вод від мікропластикових забруднень

5.2.2 Видалення мікропластику зі стічних вод з використанням різних технологічних схем очистки

Мікропластик часто виявляли у вхідних та вихідних водах очисних споруд. Мікропластикові часточки володіють певними характеристиками, які впливають на ефективність очищення стічних вод від цього полютанту, зокрема це форма. Форма є важливим фактором класифікації мікропластику. У вхідних та вихідних водах очисних споруд було виявлено дев'ять форм мікропластику: клітковинна, плівкова, фрагментарна, пелети, пінні, еліпси, лінійні, пластівці, гранули. Волокна, гранули, фрагменти та плівки були найчастіше виявленими мікропластиками у стічних водах, а їх найбільша кількість становила 91,32%, 70,38%, 65,43% та 21,36% відповідно [52].

У таблиці 5.1 наведено розташування, добову потужність очисних споруд, кількість населення, що обслуговує представлені очисні споруди, джерело стічних вод та основні технології очищення очисних споруд. Вміст мікропластику у вхідних водах очисних споруд коливався від 0,28 частинок L^{-1} до $3{,}14 \times 10^4$ частинок L^{-1}.

Таблиця 5.1 – Інформація про очисні споруди у цьому дослідженні [52]

Шифр очисних споруд	Розташування	Продуктив-ність ($м^3$/доб)	Населення	Схема очисних споруд	Джерело стічних вод
P1	Шотландія, Велика Британія	166 422	$1{,}8 \times 10^6$	Первинне + вторинне + третинне очищення (нітрифікація)	Муніципальний
P2	Картахена, Іспанія	35 000	$2{,}1 \times 10^6$	Первинне + вторинне очищення	Муніципальні та промислові
P3	Мадрид, Іспанія	28 400	–	Сек (A2O)	Муніципальний
R4(B1)	Гонконг, Китай	93 000	–	Первинне + вторинне очищення	Муніципальний
R5(B1)	Тегу, Корея	26 545	–	Первинне + вторинне + третинне очищення (Коагуляція, O_3)	Муніципальні та промислові
P12	Шотландія, Велика	260 954	$6{,}5 \times 10^6$	Первинне + вторинне очищення	Муніципальний

Шифр очисних споруд	Розташування	Продуктивність ($м^3$/доб)	Населення	Схема очисних споруд	Джерело стічних вод
	Британія				
P13(B1)	Шанхай, Китай	–	$3{,}5 \times 10^6$	Первинне + вторинне очищення (A2O), Третинне очищення (ультрофільтрація)	Муніципальний

Продовження табл. 5.1

Шифр очисних споруд	Розташування	Продуктивність ($м^3$/доб)	Населення	Схема очисних споруд	Джерело стічних вод
P16	Ванкувер, Канада	493 271	$1{,}3 \times 10^6$	Первинне + вторинне очищення	Муніципальний
P19(B2)	Детройт, США	1700	–	Первинне + вторинне + третинне очищення (хлорування)	Неочищені стічні води та зливові води
P20	Париж, Франція	240 000	–	Первинне + вторинне очищення (біофільтр)	Муніципальні та промислові
P24	Ольденбург, Німеччина	35 616	$2{,}1 \times 10^6$	Третинне очищення (постфільтрація)	Муніципальні та промислові

A2O – анаеробно-аноксично-оксидний

Різниця в вмісті мікропластику може бути пов’язана з різними складними факторами, такими як населення, яке обслуговується, джерела стічних вод (муніципальні чи промислові), економіка та спосіб життя. На муніципальних очисних спорудах вміст мікропластику був нижчим і коливався від 0,28 частинок L^{-1} до $6{,}10 \times 10^2$ частинок L^{-1}. На муніципальних та промислових очисних спорудах вміст мікропластику коливався від 1,60 частинок L^{-1} до $3{,}14 \times 10^2$ частинок L^{-1}. Однак, на сьогодні не достатньо наукової інформації щодо викидів мікропластику безпосередньо з промислових очисних споруд, що займаються переробкою пластику. Що стосується обслуговуючого населення,

то кількість мікропластику, що потрапляє до стічних вод, позитивно корелювала з кількістю обслуговуючого населення на більшості очисних споруд. На кількість мікропластику також впливали методи відбору проб та виявлення. Мікропластик було виявлено у всіх процесах очищення на очисних спорудах. Кількість мікропластику поступово зменшувалася від первинної до вторинної очистки. Процес первинної очистки, заснований на фізичних механізмах, вважався першим бар'єром для видалення мікропластику на очисних спорудах. Первинний відстійник був найпоширенішим методом первинної очистки. Кількість мікропластику після процесів первинної очистки коливалася від 0,22 частинок L^{-1} до 1,26 × 10^4 частинок L^{-1}. Їх кількість зменшилася на 4,06–98,96 % порівняно з кількістю мікропластику у вхідній воді. Після процесу первинної очистки найважливішою технологією на очисних спорудах була біологічне очищення (вторинний процес очищення). У біологічній обробці схема A_2O була найрозповсюдженішою у застосуванні технологій на очисних спорудах. Тим часом, технологія біофільтрів мала високе навантаження біомаси та високу об'ємну швидкість реакції, що покращило ефективність видалення забруднюючих речовин і поступово стало більш популярним на очисних спорудах. Кількість мікропластикових часточок після процесів вторинного очищення коливалася від невиявлення до 7,86 × 10^3 частинок L^{-1}, що призвело до зменшення чисельності на 20,45–95,45% (середнє значення: 66,63%) [52].

Для подальшого видалення забруднюючих речовин на 61,76% очисних споруд використовувалися процеси третинного очищення, такі як процеси поглибленого окислення та мембранної фільтрації. Після процесів третинного очищення вміст мікропластику ще більше зменшився на більшості досліджуваних очисних споруд (85,71%), тоді як на інших – збільшився. Кількість мікропластику у стічних водах коливалася від відсутності виявлення до 2,97 × 10^2 частинок L^{-1}. Порівняно з вхідними водами, вміст мікропластику зменшився на 50,00 – 99,57%. В результаті, щонайбільше 50% мікропластику на

очисних спорудах все ще скидалося зі стічними водами та потрапляло у водоприймальні системи [52].

5.2.3 Мікропластик у шламі

Більшість мікропластику, видаленого зі стічних вод, затримувалася в мулі. Було виявлено, що вміст мікропластику в мулі був значно вищим, ніж у стічних водах. У таблиці 5.2 наведено вміст мікропластику в мулі, обробленому різними технологіями очищення, в діапазоні від $4{,}40 \times 10^{3}$ частинок $кг^{-1}$ до $2{,}40 \times 10^{6}$ частинок $кг^{-1}$. Вміст мікропластику в мулі після первинного процесу очищення був вищим, ніж після вторинного процесу очищення. Дослідження показали, що в первинному мулі міститься 0,54–1,28 трильйона мікропластику, а у вторинному – 0,22–0,36 трильйона мікропластику. Крім того, підрахували, що 20% мікропластику у вторинному мулі повертається у стічні води.

Таблиця 5.2 – Кількість мікропластику в шламі різних процесів очищення стічних вод [52]

Шифр очисної споруди	Схема очищення стічних вод	Кількість (частинок $кг^{-1}$)
P6	Первинний освітлювач + A2O + Вторинний освітлювач	$2{,}40 \times 10^{6}$
P7(a)	Первинний відстійник + A2O + Вторинний відстійник	$1{,}49 \times 10^{4}$
R7(b)	МБР	$9{,}65 \times 10^{3}$
R7(c)	Первинний відстійник + Вторинний відстійник	$1{,}32 \times 10^{4}$
P16	Первинне осідання	$1{,}49 \times 10^{4}$
P16	Вторинні освітлювачі	$4{,}40 \times 10^{3}$

В останні роки утилізації шламу приділяється багато уваги. Шлам з очисних споруд переважно використовувався для сільськогосподарських цілей у Норвегії (82%), Ірландії (63%), США (55%), Китаї (45%) та Швеції (36%), а також спалювався в Нідерландах (99%), Кореї (55%) та Канаді (47%), тоді як

шлам застосовувався як ґрунтовий компост у Фінляндії (89%) та Шотландії (40%) [52].

5.3 Технології захисту ґрунтового середовища

Ґрунт, забруднений мікропластиком, становить велику загрозу для сільськогосподарських культур та сільськогосподарської продукції. Середня кількість мікропластику в сільськогосподарських ґрунтах, що утворюються внаслідок утилізації шламу, становила 3500 частинок $кг^{-1}$. Піропластик – це новий тип забруднювача, що утворюється в результаті неформального або більш організованого спалювання виробленого мікропластику. Після спалювання шламу піропластик потрапляє в навколишнє середовище та створює великі загрози. У Китаї 35% осаду, що утворюється з очисних споруд, досі потрапляє на звалища. Мікропластик далі потрапляє в ґрунт і ґрунтові води через фільтрат. Загалом, забруднення ґрунту мікропластиком маловідоме і тому вважається однією з нагальних проблем, пов'язаних з мікропластиком [52].

5.4 Сучасні технології переробки пластикових виробів

Деякі із заходів щодо зменшення пластикових відходів: Повторне використання: Повторне використання означає використання матеріалів більше одного разу в їх первісному вигляді замість викидання після кожного використання. Зменшення: Існує потреба зменшити використання пластику та уникати його використання, коли є краща альтернатива, і використовувати пластик лише тоді, коли це дійсно необхідно. Переробка: Переробка пластику передбачає збір пластикових відходів та їх переробку на нові продукти. Освіта громадськості: Людей необхідно консультувати та надавати їм поради щодо утилізації пластику, щоб запобігти забрудненню пластиком.

5.4.1 Біодеградація пластику

Потрапивши в навколишнє середовище, пластик може зазнавати деградації через абіотичні та/або біотичні процеси. Перший є важливим

першим кроком, який передує другому. Іншими словами, механізми біодеградації вимагають початкового процесу абіотичного розкладу. Це призводить до утворення матеріалів зі зниженою структурною та механічною цілісністю, що призводить до утворення частинок з вищим співвідношенням площі поверхні до об'єму, що піддаються дії мікробів [51]

Шляхи абіотичного розкладу можна розділити на два різні типи процесів, які залежать від типу полімеру. Коротше кажучи, це залежить від того, чи складається полімер виключно з остова C–C, як у випадку PP, PS, PVC та PE, чи в остові присутні гетероатоми, такі як PET та PU. У першому випадку процес ініціюється випадковим фотолітичним розщепленням зв'язку C–H, тоді як у полімерних матеріалах, що містять гетероатоми, гідроліз зазвичай є ініціюючим етапом [24, 49].

Однак ці механізми стосуються незмішених матеріалів, а полімери рідко використовуються і тому рідко зустрічаються в навколишньому середовищі в чистому вигляді. Отже, описані механістичні шляхи деградації можуть бути неповними, а продукти вивільняються під час (біо)деградації [49].

Такі продукти включають неполімеризовані мономери, добавки та пластифікатори, що використовуються для модуляції та оптимізації характеристик пластикових виробів. Складність шляхів деградації ще більше посилюється іншими факторами, такими як щільність полімерів, яка може змінюватися через такі явища, як утворення біоплівок та гетеро агрегація [24]. Це впливає на їхню біодоступність у товщі води. Отже, тип пластику, що поглинається організмами, може змінюватися залежно від його наявності.

Біологічний механізм деградації пластику зазвичай починається поза клітинами завдяки ферментативній активності. Це призводить до розщеплення основного полімерного ланцюга гідролітичними шляхами9, незалежно від середовища. Потім утворюються групи, чутливі до використання організмами, що сприяє безперервному процесу деградації полімерів [49]. Зрештою, утворюються водорозчинні олігомери та мономери, що зрештою призводить до мінералізації. Тим не менш, попереднє опромінення ультрафіолетовим

випромінюванням, здається, є ключовим фактором, що впливає на швидкість біодеградації як у ґрунтах, так і у водному середовищі [24, 32].

Зелена біорозкладна альтернативна технологія. В останні роки багато міжнародних та вітчизняних організацій та підрозділів видали низку політик, правил та пропозицій щодо забруднення мікропластиком. Уряди та підприємства в усьому світі також висловили свою підтримку та рішучість вирішити проблему забруднення одноразовим пластиком. Однак ефект від впровадження не очевидний, виробництво та споживання пластику все ще високі, а загальна кількість мікропластику не зменшилася з джерела. Наразі активний пошук альтернатив традиційному пластику стає ключем до вирішення проблеми забруднення мікропластиком. В контексті глобального обмеження використання пластику, індустрія зеленого біорозкладного пластику розпочала золотий період розвитку, а її дослідження, розробки та застосування були схвалені працівниками охорони навколишнього середовища. Згідно зі статистикою 2018 року, світовий попит на біорозкладний пластик у 2014 році становив 297 000 тонн, а світовий попит на біорозкладний пластик у 2018 році – 360 000 тонн, що відповідає розміру ринку в 1,1 мільярда доларів. Прогнозувалося, що світовий попит на біорозкладний пластик у 2023 році зросте до 550 000 тонн. Наразі у практичному виробництві та побуті використовується різноманітна біорозкладна пластикова продукція, включаючи фоторозкладний пластик, біорозкладний пластик, фоторозкладний-біорозкладний пластик [51] тощо. Світлорозкладні пластики, що стосуються умов освітлення, які можуть спричинити природний розпад пластикових виробів, включають пластикові вироби, які можуть поглинати ультрафіолетове світло та зменшувати енергію молекулярних зв’язків. Великі шматки пластикових виробів розбиваються на дрібні частинки мікропластику, а потім реагують з киснем повітря та розкладаються на вуглекислий газ та воду. Основні типи таких виробів включають кополімерні пластики, що містять вуглецевий мономер та олефіновий мономер, а також загальні пластики з фотосенсибілізаторами. Біорозкладні пластики включають повністю

біорозкладні пластики та деструктивні біорозкладні пластики, з яких повністю біорозкладні пластики в основному виготовлені з натуральних полімерів, таких як крохмаль, целюлоза, білок тощо, або подібних природних полімерів, виготовлених з синтетики; цей вид біорозкладних пластиків повністю біорозкладний, але він не є пластиком. Деструктивні біорозкладні пластики відносяться до біорозкладних пластикових виробів, виготовлених шляхом змішування натуральних та синтетичних полімерів. Такі деструктивні біопластикові вироби можуть бути розкладені лише частково, а решта пластикових виробів на основі нафти можуть спричинити забруднення мікропластиком. Іншим видом репрезентативного біорозкладного пластику є фоторозкладний-біорозкладний матеріал, який є різновидом гібридного матеріалу, що поєднує фоторозклад та біорозклад. Це може подолати проблему обмеження фоторозкладного пластику світлом та певною мірою прискорити швидкість розкладання пластикових відходів. Крім того, розробка та застосування компостованих біорозкладних пластмас, гідролізованих пластмас та інших нових біорозкладних пластмас також може певною мірою зменшити утворення мікропластику та створити нові можливості для контролю джерел забруднення та очищення від мікропластику [52].

5.4.2 Сучасні альтернативи пластиковим матеріалам – біопластик

У контексті посилення екологічної свідомості суспільства та необхідності мінімізації негативного впливу традиційних полімерних матеріалів, наукова спільнота активно розробляє інноваційні екологічно безпечні альтернативи пластику. На сьогодні запропоновано низку біорозкладних і поновлюваних матеріалів природного походження, які демонструють значний потенціал для заміни синтетичних полімерів [49].

Зокрема, перспективним біоматеріалом вважаються грибні міцеліальні структури, волокниста будова яких дає змогу формувати матеріали різної щільності залежно від умов культивування. Такий матеріал може слугувати замінником не лише пластику, але й шкіри, гуми та пробки. Вироби з міцелію

відзначаються механічною міцністю, вогнестійкістю та повною біорозкладністю.

Іншим варіантом є матеріали на основі картопляного крохмалю, отримані, зокрема, із відходів виробництва харчових продуктів. У поєднанні з певними хімічними сполуками крохмаль формує полімероподібну матрицю, близьку за властивостями до поліуретану [52].

До ефективних замінників окремих видів одноразового пластику належить також їстівний посуд, виготовлений із сумішей зернових культур та солі. Він поєднує харчову безпечність, достатню механічну стійкість і повну біодеструкцію.

У ряді країн (зокрема на Канарських островах та в Уганді) як сировину для виготовлення екологічних матеріалів використовують відходи бананових рослин. Натуральні бананові волокна демонструють високу міцність і тому застосовуються для виготовлення ємностей та технічних деталей.

Перспективним ресурсом є також опале листя тропічних ліан, яке у країнах Азії й Південної Америки використовують для виробництва одноразового посуду. Листки зшивають у декілька шарів за допомогою пальмових волокон, утворюючи міцні та повністю екологічні вироби.

Маніока – тропічна рослина, широко поширена у Південно-Східній Азії, – також слугує основою для створення біорозкладних матеріалів. У поєднанні з рослинними оліями та природними смолами вона утворює компостовані полімери, здатні розкладатися при контакті з гарячою водою протягом короткого проміжку часу, а за звичайних умов – протягом кількох місяців.

Одним із найбільш поширених біополімерів є полімолочна кислота (PLA), що виробляється шляхом ферментації кукурудзяного крохмалю. Цей матеріал активно використовується у виробництві упаковки та одноразових товарів, оскільки є біорозкладним, нетоксичним та термостійким [49].

З огляду на потенційні загрози для здоров’я людини, пов’язані з неправильним використанням традиційного пластику, актуальним є повернення до застосування екологічно безпечних матеріалів – кераміки, скла, металу та

натуральних тканин, що не становлять небезпеки для довкілля та піддаються повторній переробці [49].

ВИСНОВКИ

1. В дипломній роботі детально розглянули життєвий цикл полімерних виробів, від первинного виробництва, з використанням цінних вичерпних ресурсів таких як газ та нафта, до залучення технологій вторинної переробки відходів полімерної природи.

2. Виявлені головні екологічні небезпеки пов’язані з виготовлення, утилізацією та переробкою полімерних виробів. Досліджено вплив полімерних відходів на всі компоненти довкілля, а також розглянуто шляхи утворення та включення мікропластикових часточок до харчових ланцюгів живих організмів і людини зокрема.

3. Було проведено експериментальне дослідження оцінки якості природних водойм урбанізованих територій на прикладі р. Студенок м. Харків. В ході дослідження встановили екологічно напружені ділянки уздовж русла річки за таким показником, як вміст мікропластиких часточок у донних відкладеннях. Виявлені ділянки співпадали із розташуванням несанкціонових сміттє звалищ, де накопичувались будівельні відходи та відвали земельних пластів з територій промислових майданчиків м. Харкова.

4. Була зроблена екологічна оцінка тих типів пластикових часточок, що були виявлені під час експериментальних досліджень русла р. Студенок. Спираючись на світовий та вітчизняний досвід запропонована модифікована формула для розрахунку екологічної небезпеки певного виду полімерного матеріалу. Таким чином було встановлено, що полімери відходи поліхлорвінілової природи мають найбільшу екологічну небезпеку у порівнянні з іншими видами пластикових відходів і потребують особливої увагу та залучення їх у процес вторинної переробки.

5. Були запропоновані сучасні технологічні рішення щодо захисту компонентів довкілля від забруднення довкілля відходами полімерних виробів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chalmin P. The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock. *Field Actions Science Reports* [Online]. 2019. Special Issue 19. P. 6 – 11. URL: http://journals.openedition.org/factsreports/5071

2. Takada H., Bell L. Plastic Waste Management Hazards. International Pollutants Elimination Network (IPEN), 2021. 114 p. URL: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-plastic-waste-management-hazards-en.pdf

3. Plastic Polymers under the Full Life Cycle Approach. Center for International Environmental Law, 2024. 20 p. URL: https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2024/04/plastic-polymers-full-life-cycle-of-plastics-brief.pdf

4. Rikhter P., Dinc I., Zhang Y., Jiang T., Miyashiro B., Walsh S., Wang R., Dinh Y., Suh S., Metrics V. Life Cycle Environmental Impacts of Plastics: A Review. U.S. Department of Commerce Material Measurement Laboratory and Engineering Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. 2022. 44 p. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2022/NIST.GCR.22-032.pdf

5. The Plastics Historical Society An Introduction to Plastics URL: https://plastiquarian.com/wp-content/uploads/2015/06/plasticbook.pdf

6. Modern Plastics and Charles A. Maryland: Harper Editor in Chief Technology Seminars, Inc. Lutherville, 2000. 106 p. DOI: 10.1036/0070267146 URL: https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/c5ebbc8c64887c5e/66f7693fbeed02add60ce7d390855ac85104ab4f190d80a9ae35259e4cfa60b8/book-summary.pdf

7. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс]: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ: Бібліогр, 2020. 292 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a01b3f86-c11f-49e8-8dc5-49c03b765a0e/content

8. DeArmitt C., Rothon R. Applied Plastics Engineering Handbook. 2011. P. 441-454 URL:

https://www.researchgate.net/publication/236133348_Applied_Plastics_Engineering_Handbook

9. Савченко І. О., Сиромятніков В. Г. Промислові полімери та основи технології виробництва полімерних матеріалів: навч. посіб. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2012. 12 с. URL: https://macrochem.knu.ua/pages/teaching/files/industrial_polymers.pdf

10. Nafiu S. A., Azeez M. O., Al Aqad K. M., Olarewaju T. A., Yerima E. A., Tanimu A. Waste plastic management: Recycling and the environmental health nexus. *Cleaner Materials*. 2025. V. 15. 100291 https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100291

11. Annangi B., Villacorta A., Vela L., Tavakolpournegari A., Marcos R., Hernández A. Effects of true-to-life PET nanoplastics using primary human nasal epithelial cells. *Environ. Toxicol. Pharmacol*. 2023. V. 100, 104140 https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104140

12. Babaremu K., Adediji A., Olumba N., Okoya S., Akinlabi E., Oyinlola M. Technological advances in mechanical recycling innovations and corresponding impacts on the circular economy of plastics. *Environments*. 2024. V. 11(3), 38 https://doi.org/10.3390/environments11030038

13. Limami H., Manssouri I., Cherkaoui K., Khaldoun A. Study of the suitability of unfired clay bricks with polymeric HDPE & PET wastes additives as a construction material. *Journal of Building Engineering*. 2020. V. 27. 100956. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100956

14. Alaloul W.S., John V.O., Musarat M.A. Mechanical and thermal properties of interlocking bricks utilizing wasted polyethylene terephthalate. *J. Concr. Struct. Mater*. 2020. V.14. P. 1–11. https://doi.org/10.1186/s40069-020-00399-9

15. Bocken N. Circular dusiness model innovation: new avenues and game changers. In: Aagaard, Business Model Innovation – Game Changers and Contemporary Issues. Palgrave MacMillan (forthcoming). 2023. DOI:10.1007/978-3-031-57511-2_7

16. Клименко Д.В., Нечай С.О. Огляд автоматизації процесу сортування сміття оптикомеханічним методом. *Погляд у майбутнє приладобудування:* матеріали XIV Всеукраїнської наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Київ. 18-19 травня 2021 р.). Київ, 2021. С. 196 – 198. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c1563e36-e4c5-4da8-ab49-0779c08de9f6/content

17. Gupta P. Management of plastic waste: a step towards clean environment. *International Journal of Renewable Energy Technology*. 2017. V. 8 (3/4). P 387 – 392 DOI: 10.1504/IJRET.2017.10009914.

18. Pascoe R.D, O'Connell B., Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation. *Minerals Engineering*. 2003. V. 6. P. 1205–1512. DOI: 10.1016/S0892-6875(03)00171-7

19. Biswajit R., Vivek P., Priyajit J., Srivastava V.K. Sorting of plastic waste for effective recycling. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*. 2015. V. 4 (4). P. 564–571. DOI: 10.6088.ijaser.04058 https://www.researchgate.net/publication/305503715_Sorting_of_plastic_waste_for_effective_recycling

20. Sarkingobir Y., Bello M., Yabo H. Harmful effects of plastics on air quality. *Academia Letters*. 2021. 6 p. DOI:10.20935/AL2967

21. Cabernard L., Pfister S., Oberschelp C., Hellweg S. Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion. *Nature Sustainability*. 2022. V. 5(2), P.139–148. DOI:10.1038/s41893-021-00807-2

22. Pinto da costa J., Rocha-santos T., Duarte A. C. The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures. *European Parliament's Committee on Petitions*. 2020. 76 p . http://www.europarl.europa.eu/supporting-analyses

23. Groh K.J., et al. Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of the total environment.* 2019. V. 651. P. 3253–3268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015

24. Lam C.-S., et al. A comprehensive analysis of plastics and microplastic legislation worldwide. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2018. V. 229(11). P. 345–364. DOI:10.1007/s11270-018-4002-z

25. Zhang Y.-L., Kang S.-C., Gao T.-G. Microplastics have light-absorbing ability to enhance cryospheric melting. *Advances in Climate Change Research*. 2022. V. 13(4). P 455–458. https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.06.005.

26. Organisation for Economic Co-operation and Development. Climate Change and Plastics Pollution: Synergies Between Two Crucial Environmental Challenges. 2023. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/05/climate-change-and-plastics_d3364145/5e0bfe87-en.pdf (дата звернення 15.10.2025).

27. Royer S.-J., Ferrón S., Wilson S.T., Karl D.M. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLOS ONE*. 2018. V. 13(8). e0200574. https://doi. org/10.1371/ URL: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0200574.

28. Cole M., Lindeque P.K., Fileman E., Clark J., Lewis C., Halsband C. et al. Microplastics alter the properties and sinking rates of zooplankton faecal pellet. *Environmental Science & Technology*. 2016. V. 50(6). P. 3239–3246. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05905.

29. Smith S.D.A. Marine debris: A proximate threat to marine sustainability in Bootless Bay, Papua New Guinea. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. V. 64(9). P 1880–1883. https://doi. org/10.1016/j.marpolbul.2012.06.013 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X12002743.

30. Kida M., Ziembowicz S., Koszelnik P. CH_4 and CO_2 emissions from the decomposition of microplastics in the bottom sediment—preliminary studies. *Environments*. 2022. V. 9(7). P. 91–103. https://doi.org/10.3390/environments9070091

31. Thomassen C., Husabø E., Berglihn E., Ručevska I., Raubenheimer K., Skripnikova N., Urho N. Climate impacts of plastics global actions to stem climate change and end plastic pollution GRID-Arendal. Climate impacts of plastics: Global

actions to stem climate change and end plastic pollution. Norway: 2024. 88 p. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/1091/original/ClimateImpactsOfPlastics_SUM.pdf?1710512747

32. Liu Z., Su Z., Chen J., Zou J., Liu Z., Li Y. et al. Polyethylene microplastics can attenuate soil carbon sequestration by reducing plant photosynthetic carbon assimilation and transfer: Evidence from a 13C-labeling mesocosm study. *Journal of Cleaner Production*. 2023. V. 385. 135558. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135558.

33. Auta H.S., Emenike C.U., Fauziah S.H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment : a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International.* 2017. V. 102. P. 165–176. doi:10.1016/j.envint.2017.02. 013 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016041201631011X

34. Avio C.G., Gorbi S., Regoli, F. Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Marine Environmental Research*. 2017. V. 128. P. 2–11. doi:10. 1016/j.marenvres.2016.05.012. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141113616300733

35. Da Costa J.P. Nanoplastics in the Environment. *Environmental Science and Technology.* 2019. No. 47. P 82–104. http://kinampark.com/T-Polymers/files/All%20References/da%20Costa%202019%2C%20Nanoplastics%20in%20the%20environment.pdf

36. Talvitie J., et al. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*. 2017. V. 123. P. 401–407. DOI:10.1016/j.watres.2017.07.005 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135417305687

37. Jiang X., Chen H., Liao Y., Ye Z., Li M., Klobučar G. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant Vicia faba. *Environmental Pollution.* 2019. V. 250. P. 831–838. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119303574?via%3Dihub

38. Li D. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution. *Research of Environmental Sciences*. 2019. V. 32. P. 197–202. https://www.hjkxyj.org.cn/en/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2018.11.25

39. Клушин С.С. Мельнікова О.Г. Оцінка якості природних водой урбанізованих територій за вмістом мікропластикових полютантів. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті європейської інтеграції України* : матеріали Всеукр. наук.- практ. інтернет-конф. : до дня пам'яті Ф. В. Стольберга (м. Харків, 12 листопад 2025 р.). Харків, 2025. С. 139 – 141 https://ecology.kname.edu.ua/images/Materialy_conferenciy/Zbirnik_2025_Ekologicno%20stalij%20rozvitok%20ekosistem_kaf_IEM_HNUMG.pdf

40. United States Environmental Protection Agency. Guidelines for Ecological Risk Assessment. Washington: U.S. EPA. 1998. 188 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf (дата звернення 10.11.2025).

41. Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Chapter R.15: Consumer exposure assessment Version 3.0 - July 2016. 75 p. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELLAR:4a1b1d03-9f36-11e6-868c-01aa75ed71a1 (дата звернення 10.11.2025).

42. Колесник В. Є., Павличенко А. В., Бучавий Ю. В. Уніфікована методика комплексного оцінювання рівня екологічної небезпеки промислових об'єктів та технологій. *Scientific and technical journa Technogenic and Ecological Safety*. 2018. 3(1/2018). С. 64–69. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6392

43. Матіс Є.О., Крот О.П. Модель формування методів оцінки екологічних ризиків для окремих складних систем. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 81–90. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.13 http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/6/13.pdf

44. Sørensen S.B., Feilberg A., Kristensen K. Removal of volatile organic compounds by mobile air cleaners: Dynamics, limitations, and possible side effects. *Building and Environment.* 2023. V. 242 110541 https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110541

45. Zhao W., Dai J., Liu F., Bao J., Wang Y., Yang Y., Yang Y., Zhao D. Photocatalytic oxidation of indoor toluene: process risk analysis and influence of relative humidity, photocatalysts, and VUV irradiation. *Science of The Total Environment*. 2012. V. 438. P. 201–209. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.081

46. Howard-Reed C., Nabinger S.J., Emmerich S.J. Characterizing gaseous air cleaner performance in the field. *Building and Environment.* 2008. V. 43(3). P. 368–377. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.020

47. Zhang Y., Mo J., Li Y., Sundell J., Wargocki P., Zhang J., Little J.C., Corsi R., Deng Q., Leung M.H.K., Fang L., Chen W., Li J., Sun Y. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45(26). P. 4329–4343. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.041

48. Khan I., Ghoshal A. Kr. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000. V. 13(6). P. 527–545. https://doi.org/10.1016/S0950-4230(00)00007-3

49. Van den Oever M. Molenveld K., Maarten van der Zee, Bos H.Bio-based and biodegradable plastics: facts and figures: focus on food packaging in the Netherlands. *Wageningen Food & Biobased Research*. 2017. №1722. 67 p. https://edepot.wur.nl/408350

50. Yao H., Feilberg A. Characterisation of photocatalytic degradation of odorous compounds associated with livestock facilities by means of PTR-MS *Chemical Engineering Journal*. 2015. V. 277. P. 341–351. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.094

51. Hao Ma, Liqiang Chao, Hang Wan, Qin Zhu. Microplastic Pollution in Water Systems: Characteristics and Control Methods. *Diversity.* 2024. V. 16(1). 70. https://doi.org/10.3390/d16010070

52. Zhang Weiyi Liu, Jinlan Zhang, Hang Liu, Xiaonan Guo, Xiyue Zhang, Xiaolong Yao, Zhiguo Cao, Tingting. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. *Environment International*. 2021. V. 146. 106277 https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277