

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ»

Виконала: студентка групи ТЗД-23мз
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» серпня 25 Серединська І. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: завідувач кафедри ЕХТЗД, к.т.н., доцент

«10» серпня 25 Іщенко В. А.
(прізвище та ініціали)

Опонент: к.т.н., доцент кафедри ЕХТЗД

«10» серпня 25 Гордієнко О.А.
(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доц. Іщенко В.А.
(прізвище та ініціали)

«10» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Галузь знань 18 – Виробництво та технології
Спеціальність 183 – «Технології захисту навколишнього середовища»
Освітньо-професійна програма – Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доцент
В.А. Іщенко
(підпис)
« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу студентці

Серединська Ірина Вячеславівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ»

керівник роботи Іщенко Віталій Анатолійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи

Утворення відходів у Вінницькій області – 2,7 млн. тон/рік.

4. Зміст текстової частини

- 1 Огляд сучасних технологій переробки пластикових відходів.
- 2 Приклади розрахунків та аналіз їх результатів у переробці пластикових відходів.
- 3 Аналіз екологічних ризиків та безпеки поводження з полімерними відходами.
- 4 Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Схема виробництва повторної поліетиленової плівки
2. Вміст пластику у побутових відходах Вінницької області
3. Управління пластиковими відходами в Європі
4. Вплив пластику на людину
5. Порівняльні викиди парникових газів для різних варіантів управління пластиковими відходами
6. Схема очищення стічних вод.

6. Консультанти розділів роботи

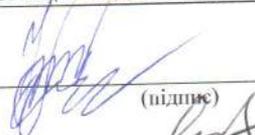
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4 Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів	Декан ФМІБ, к.е.н., доц. Краєвська Алла Станіславівна		

7. Дата видачі завдання « 25 » березня 2025 р.

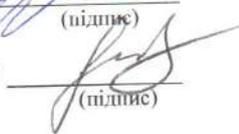
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Огляд сучасних технологій переробки пластикових відходів	25.03.2025	07.04.2025	Викон
2	Приклади розрахунків та аналіз їх результатів у переробці пластикових відходів	07.04.2025	27.04.2025	Викон
3	Аналіз екологічних ризиків та безпеки поводження з полімерними відходами	27.04.2025	12.05.2025	Викон
4	Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів	12.05.2025	26.05.2025	Викон
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.05.2025	05.06.2025	Викон
6	Підготовка презентації та доповіді	05.06.2025	10.06.2025	Викон

Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Серединська І. В.

(прізвище та ініціали)

Іщенко В. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з 90 сторінок формату А4, на яких є 11 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел містить 38 найменування.

Метою роботи є оцінка екологічної безпеки процесів переробки пластику.

Магістерська кваліфікаційна робота зосереджена аналізі сучасних технологій переробки пластикових відходів, оцінюванні глобального впливу переробки пластикових відходів у сучасній економіці. Здійснено огляд основних категорій технологій переробки пластику, порівняльний аналіз технологій переробки пластику, дослідження їх впливу на навколишнє середовище. Проаналізовано якість переробленого матеріалу. Складено рекомендації щодо переробки пластикових відходів. Здійснено розрахунки та аналіз їх результатів у переробці пластикових відходів. проведено аналіз екологічних ризиків та безпеки поводження з полімерними відходам.

Ключові слова: екологічна безпека, рециклінг, пластикові відходи, вплив.

ABSTRACT

The master's qualification work consists of 90 pages of A4 format, which include 11 figures, 6 tables, and the list of sources used contains 38 items.

The purpose of the work is to assess the environmental safety of plastic recycling processes.

The master's qualification work focuses on the analysis of modern technologies for recycling plastic waste, assessing the global impact of plastic waste recycling in the modern economy. A review of the main categories of plastic recycling technologies, a comparative analysis of plastic recycling technologies, and a study of their impact on the environment were carried out. The quality of the recycled material was analyzed. Recommendations for the recycling of plastic waste were made. Calculations and analysis of their results in the recycling of plastic waste were made. An analysis of environmental risks and the safety of polymer waste management was carried out.

Keywords: environmental safety, recycling, plastic waste, impact.

ВІДГУК

наукового керівника на магістерську кваліфікаційну роботу
студентки заочної форми навчання групи ТЗД – 23м (з/ф)
Серединської Ірини Вячеславівни “Екологічна безпека поводження з
полімерними відходами”

У зв'язку з тим, що використання пластику зростає з кожним днем і виникає необхідність у збільшенні потужностей технологій переробки пластику, дослідження впливу таких технологій на екологічну безпеку є актуальною задачею. Тому важливим є технологій переробки пластик, в тому числі потенційних викидів у повітря, скидів у водойми та утворення відходів.

Робота містить аналіз основних технологічних процесів виробництва та переробки пластику. Проведене оцінювання забруднення довкілля в результаті вказаних процесів: зокрема, набули подальшого розвитку методи оцінювання екологічних ризиків впливу процесів переробки пластикових відходів на довкілля. Також досліджено управління відходами пластику. Наведені рекомендації щодо екологізації процесів переробки пластику. Варто також відзначити проведене техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів.

Серединська І.В. вчасно і повністю виконала всі поставлені завдання, характеризується виключно з позитивного боку. В цілому магістерська кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має наукову цінність. Тому рекомендую оцінити роботу на оцінку «А».

Керівник роботи,
зав. каф. ЕХТЗД, к.т.н., доцент



Віталій ІЩЕНКО

ВІДГУК

опонента на магістерську кваліфікаційну роботу студентки заочної форми навчання 4 курсу із спеціальності 183 “Технології захисту навколишнього середовища” Серединської Ірини Вячеславівни на тему: “Екологічна безпека поводження з полімерними відходами”.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена актуальній проблемі сучасності – оцінці екологічної безпеки поводження з полімерними відходами. Глобальне накопичення відходів виробів з полімерів, які тривалий час зберігаються у довкіллі, забруднюють атмосферу, ґрунти, поверхневі та підземні води, а також низькі показники їх переробки створюють серйозні екологічні виклики. Тому актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи не викликає сумнівів.

В роботі розглянуті сучасні технології переробки пластикових відходів, їх вплив на довкілля. Проведені розрахунки процесів переробки полімерних відходів і аналіз екологічних ризиків та безпеки поводження з полімерними відходами. В останньому розділі роботи наведене техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів.

У магістерській роботі можна відзначити такий недолік: рекомендації щодо переробки пластикових відходів носять узагальнений характер.

Робота має практичне значення, виконана на належному науково-методичному рівні і заслуговує оцінки «А».

Опонент

к.т.н., доц. кафедри ЕХТЗД



Ольга ГОРДІЄНКО

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ	6
1.1 Глобальний вплив переробки пластикових відходів у сучасній економіці	6
1.2 Основні категорії технологій переробки пластику	7
1.3 Порівняльний аналіз технологій переробки пластику	18
1.4 Вплив на навколишнє середовище	22
1.5 Якість переробленого матеріалу	23
1.6 Рекомендації щодо переробки пластикових відходів	26
2 РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ	29
2.1 Розрахунок основних процесів переробки пластикових відходів	29
2.2 Розрахунки енергоспоживання	29
2.3 Розрахунки виходу матеріалу та ефективності	32
2.4 Вплив якості сировини на кінцевий продукт та потенціал замкнутого циклу	36
2.5 Приклад розрахунку для підприємства з переробки пластику методом піролізу	40
3 АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА БЕЗПЕКИ ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМ	45
3.1 Екологічні ризики поводження з полімерними відходами	45
3.2 Оцінка екологічної безпеки існуючих методів поводження з відходами ..	51
3.3 Принципи оцінки екологічних ризиків	57
3.4 Екологічні ризики	58
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ПІДПРИЄМСТВА З ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ	70
4.1 Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти	70

4.2 Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти	73
4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод	75
4.4 Визначення економічного ефекту та терміну окупності під час використання обладнання очищення стічних вод	77
4.5 Розрахунок терміну окупності витрат під час використання обладнання очищення стічних вод	78
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТОК А	85
ДОДАТОК Б	86

ВСТУП

Актуальність. Глобальне зростання виробництва та споживання пластику призвело до безпрецедентного накопичення відходів, що становить значний екологічний та економічний виклик. Щорічно у світі генерується понад 400 млн. т пластикових відходів, що призводить до масштабного забруднення навколишнього середовища та втрати цінних ресурсів. Незважаючи на зростаючу обізнаність та зусилля, глобальні показники переробки залишаються низькими: лише близько 8.2% пластику у світі походить з перероблених відходів, а загальний показник циркулярності економіки становить лише 7.2%. Цей значний розрив між масштабами проблеми та ефективністю поточних рішень підкреслює нагальну потребу в системних змінах.

Виробництво пластику є надзвичайно енергоємним процесом, споживаючи близько 2% загального енергоспоживання. Крім того, виробництво пластику на основі викопного палива генерує приблизно 3.8% світових викидів парникових газів. Ці дані вказують на те, що пластикова промисловість є значним джерелом викидів і потребує суттєвої декарбонізації. Зменшення залежності від первинних викопних ресурсів через ефективну переробку є ключовим кроком до зниження вуглецевого сліду галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалась у напрямку проведення держбюджетної науково-дослідної роботи Вінницького національного технічного університету “Оцінка техногенного впливу небезпечних відходів на довкілля та ресурсного потенціалу їх рециклінгу” на 2023-2024 рр.

Метою роботи є оцінка екологічної безпеки процесів переробки пластику.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Здійснити огляд сучасних технологій переробки пластикових відходів.
2. Здійснити розрахунки та аналіз їх результатів у переробці пластикових відходів.
3. Проаналізувати екологічні ризики та безпеку поводження з полімерними відходами.

4. Здійснити техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод підприємства з переробки полімерних відходів.

Об’єкт досліджень – вплив процесів переробки пластикових відходів на довкілля.

Предмет досліджень – екологічна безпека процесів переробки пластикових відходів.

Новизна одержаних результатів. Набули подальшого розвитку методи оцінювання екологічних ризиків впливу процесів переробки пластикових відходів на довкілля.

Практична цінність роботи роботи полягає у розробці рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки переробки полімерних відходів.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Викладені у МКР положення доповідались на VIII Міжнародному з’їзді екологів.

Мандебура С. В., Кватернюк С. М., Серединська І.В. Вдосконалення системи екологічного моніторингу атмосферного повітря. VIII-ий Міжнародний з’їзд екологів [Електронне мережне наукове видання] : зб. наук. праць. (м. Вінниця, 22–24 вересня 2021 р.). Вінниця, 2021. С. 319–325. – 88 Мб. ISBN 978-966-641-873-2 (PDF) <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/666/1174/2379-1>

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ

1.1 Глобальний вплив переробки пластикових відходів у сучасній економіці

Перехід до циркулярної економіки для пластику є критично важливим для вирішення цих проблем. Така модель передбачає утримання матеріалів у замкнутому циклі, багаторазове використання їх для виробництва нових продуктів [1]. Це не тільки зменшує обсяг відходів, що потрапляють на звалища, але й сприяє збереженню природних ресурсів, таких як нафта та газ, скороченню викидів парникових газів та зменшенню забруднення морського середовища [2]. Низькі показники переробки та циркулярності свідчать про те, що, незважаючи на зростаюче усвідомлення цінності пластикових відходів як ресурсу, існуючі економічні стимули, інфраструктура та політичні рамки є недостатніми для забезпечення необхідного системного переходу від лінійної моделі "видобуток-виробництво-утилізація" до справді циркулярної. Це означає, що для реалізації повного потенціалу технологій переробки необхідно створити сприятливу екосистему, яка б ефективно інтегрувала пластикові відходи назад в економіку. Крім того, переробка пластику є не лише питанням управління відходами, а й ключовим компонентом ширших стратегій пом'якшення наслідків зміни клімату. Цей підвищений статус може залучити нові джерела фінансування, сприяти прийняттю більш жорстких політичних мандатів та поглибити промислову співпрацю, оскільки компанії та уряди все частіше прагнуть зменшити свій вуглецевий слід. Це також означає, що екологічні показники (наприклад, викиди парникових газів) різних технологій переробки стануть дедалі важливішим критерієм їхнього впровадження та масштабування, виходячи за рамки лише показників відведення відходів.

Дослідження має на меті надати всебічний огляд сучасних технологій переробки пластикових відходів. Буде розглянуто їхні принципи, застосування, переваги, обмеження, економічну доцільність, вплив на навколишнє середовище та роль у ширшому контексті циркулярної економіки. Особлива увага буде приділена як

усталеним механічним методам, так і передовим хімічним, ферментативним та іншим інноваційним підходам, що формують майбутнє управління пластиковими відходами.

1.2 Основні категорії технологій переробки пластику

Сучасні технології переробки пластикових відходів можна розділити на кілька основних категорій, кожна з яких має свої унікальні принципи, застосування та обмеження. Ці категорії включають механічну переробку, хімічну переробку та низку інших інноваційних підходів.

Механічна переробка є найпоширенішим і найвідомішим підходом до переробки пластику, який не змінює суттєво хімічну структуру матеріалу [3]. Цей метод зосереджений на повторній обробці та модифікації пластикових відходів без зміни їхньої основної полімерної структури [4].

Процес механічної переробки включає кілька ключових етапів, які перетворюють використаний пластик на матеріали, придатні для повторного використання:

- Збір: Пластикові відходи збираються з різних джерел, таких як домогосподарства, підприємства та промисловість. Ефективність переробки значно зростає, коли пластик збирається окремо, порівняно зі змішаними схемами збору [5].
- Сортування та очищення: Зібрані пластикові відходи сортуються за типом, кольором та товщиною для видалення забруднень, таких як бруд, сміття, залишки їжі, напоїв або етикеток [6]. Цей етап є критично важливим для забезпечення чистоти матеріалу, що надходить на переробку. Сучасні сортувальні установки використовують як людську працю, так і передові технології, такі як NIR-детекція, магніти, гравітаційні/флотаційні процеси та камери [7].
- Подрібнення: Відсортовані та очищені пластикові відходи подрібнюються на дрібніші шматочки або пластівці. Це збільшує площу поверхні пластику, що полегшує подальше плавлення та обробку [8].
- Промивання: Пластівці промиваються для видалення пилу, бруду та інших забруднень, забезпечуючи їх чистоту перед наступними етапами.

- Повторне сортування та контроль: Пластик знову сортується та контролюється перед екструзією [9].
- Плавлення та екструзія: Подрібнений пластик потім розплавляється та формується в однорідні гранули або пелети. Ці гранули готові до використання у виробництві нових продуктів.

Механічна переробка найбільш ефективна для термопластів, які можна розплавляти та переформувувати без значної зміни хімічної структури [10]. Однак не всі пластики однаково придатні для механічної переробки, і успіх значною мірою залежить від термічних властивостей полімеру та стійкості до забруднень [11].

Найбільш поширені полімери, що механічно переробляються, включають:

- Поліетилентерефталат (PET): Використовується для пляшок для напоїв та контейнерів. PET є одним з найбільш механічно перероблюваних пластиків завдяки своїй прозорості та міцності [12].
- Поліетилен високої щільності (HDPE): Зустрічається у пляшках для миючих засобів та молочних пляшках. HDPE зберігає хорошу структурну цілісність після переробки.
- Поліпропілен (PP): Використовується в харчовій упаковці, автомобільних деталях та текстилі. PP може бути механічно перероблений, але часто зустрічається у складних багат шарових матеріалах.
- Поліетилен (PE): Включає LDPE та LLDPE, що використовуються у плівках та пакетах.
- Полістирол (PS): Хоча і придатний для переробки, PS створює проблеми через забруднення та крихкість.
- Поліамід (PA): Використовується в автомобільних та промислових деталях. Механічна переробка PA (наприклад, нейлону) зростає, особливо в замкнених системах.

Багат шарові матеріали та термореактивні пластмаси є складнішими або неможливими для механічної переробки і часто вимагають хімічної переробки [13].

Механічна переробка пропонує низку значних переваг, що підтримують як економічні, так і екологічні цілі:

- Економічна ефективність: Зазвичай є більш рентабельною, ніж альтернативні технології, особливо коли потоки відходів чисті та однорідні [1]. Це пов'язано з її усталеними та доступними процесами та інфраструктурою [11].
- Зниження енергоспоживання та викидів парникових газів: Механічна переробка є енергоефективним процесом, що вимагає менше енергії, ніж виробництво нових пластикових смол [14]. Використання перероблених смол значно знижує загальне споживання енергії (на 79% для PET, 88% для HDPE та 88% для PP) та викиди парникових газів (на 67% для PET, 71% для HDPE та 71% для PP) порівняно з виробництвом первинного матеріалу [11]. Дослідження показують, що механічна переробка виробляє менше викидів парникових газів, ніж передова переробка, оскільки вона менш енергоємна [15].
- Усталена інфраструктура та прийняття громадськістю: Механічна переробка є оригінальним методом обробки післяспоживчого пластику, що робить об'єкти з такими можливостями більш доступними [11]. Більшість громад мають центри переробки пластику, що використовують механічну переробку, і широка громадськість розуміє та приймає її як позитивний спосіб поводження з відходами [16].
- Циркулярність: Механічна переробка відіграє вирішальну роль у зменшенні впливу пластику на навколишнє середовище, дозволяючи використовувати перероблені матеріали для створення нових продуктів, тим самим підтримуючи принципи циркулярної економіки [8].

Найбільш поширена переробка пластмасових відходів полягає в їхньому перетворенні в повторний гранульований продукт. У нашій країні розроблено технологічні прийоми переробки поліетиленових відходів у труби для сільського господарства і вироби менш відповідального призначення, а також у повторну поліетиленову плівку (рис.1.1).

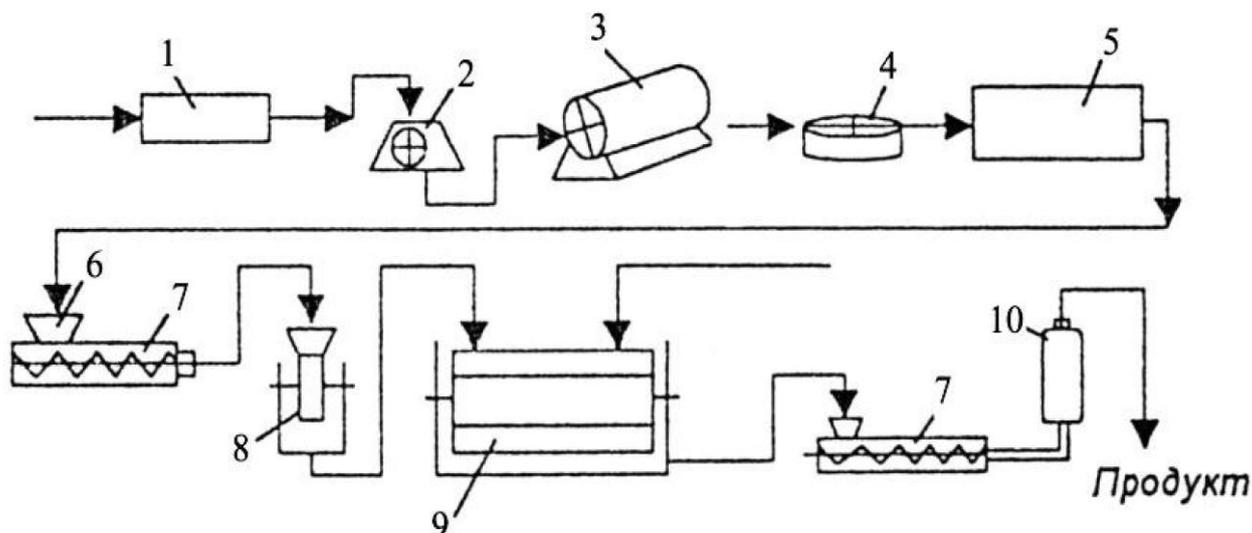


Рисунок 1.1 – Схема виробництва повторної поліетиленової плівки: 1 – вузол сортування відходів; 2 – дробарка; 3 – миюча машина; 4 – центрифуга; 5 – сушарка; 6 – живильник; 7 – екструзійні преси; 8 – гранулятор; 9 – змішувач; 10 – плівковий агрегат

Незважаючи на численні переваги, механічна переробка стикається з кількома значними обмеженнями:

- Деградація матеріалу та даунсайклінг: Повторна переробка механічними методами призводить до деградації якості матеріалу, скорочення полімерних ланцюгів [8]. Це робить його непридатним для високопродуктивних або харчових застосувань без змішування з первинними матеріалами [13]. Часто перероблений пластик використовується у менш цінних застосуваннях, наприклад, ПЕТ-пляшка стає текстильним волокном, а не новою пляшкою, що відоме як даунсайклінг [11].
- Забруднення: Присутність барвників, етикеток, залишків їжі та інших забруднень може знизити вихід та зробити переробку неекономічною [17]. Забруднення може погіршити полімерні ланцюги, зменшуючи механічні властивості та обмежуючи кінцеві застосування [13]. Паперові етикетки є особливо проблематичним забруднювачем для переробки плівки, викликаючи дефекти, небажані запахи та впливаючи на колір кінцевого продукту [18].
- Обмежена сфера застосування: Механічна переробка працює лише з термопластами і не може ефективно обробляти багатошарові або композитні

матеріали [11].

- Прогалини в інфраструктурі: Непослідовна інфраструктура переробки у світі обмежує доступ до чистого, відсортованого пластику [13]. Недостатня інфраструктура сортування та процеси ускладнюють ефективне розділення різних типів пластику [19].
- Виклики збору та сортування: Пластикові відходи часто забруднені, що ускладнює переробку [10]. Плівка та гнучкі матеріали створюють особливі проблеми, оскільки вони швидко заплутуються в сортувальному обладнанні, що загрожує працівникам та призводить до дорогого простою обладнання [18].

Механічна переробка, хоча і є зрілою технологією, стикається з невід'ємними обмеженнями, які обмежують її повний потенціал циркулярності. Повторна обробка неминуче погіршує якість матеріалу, що призводить до даунсайклінгу та обмежує його використання у високоцінних застосуваннях, таких як харчова упаковка. Ця проблема підкреслює, що механічна переробка, незважаючи на її ефективність для певних чистих потоків, не може бути єдиним рішенням для зростаючого та складного потоку пластикових відходів. Це вимагає розробки та впровадження комплементарних технологій, здатних долати ці якісні та функціональні обмеження.

Хімічна переробка є зростаючим підходом, який пропонує більші можливості для масштабування та доповнює механічну переробку [5]. На відміну від механічної переробки, яка зосереджена на повторній обробці без зміни молекулярної структури, хімічна переробка застосовує більш трансформаційний підхід [8]. Вона охоплює сукупність технологій, які змінюють хімічну структуру пластикових відходів, розбиваючи довгі вуглеводневі ланцюги, що складають пластик, на коротші вуглеводневі фракції або мономері за допомогою хімічних, термічних або каталітичних процесів [5]. Ці коротші молекули потім готові до використання як сировина для нових хімічних реакцій для виробництва нових перероблених пластмас та інших хімічних речовин [9].

Піроліз — це процес термічного розкладання органічних сполук в умовах нестачі кисню, що відрізняє його від спалювання [22]. Температури зазвичай коливаються від 350 до 700 °C [22]. Цей метод розщеплює полімери на молекули

значно коротшої довжини ланцюга або навіть на мономери, які є будівельними блоками пластмас [22].

- Принципи: Пластик нагрівається без кисню в реакторі, що розщеплює молекули [23]. Часто використовуються каталізатори для прискорення реакції та отримання бажаного продукту [5].
- Цільові пластики: Переважно поліетилен та поліпропілен (олефіни) [23]. Піроліз може розщеплювати багатошарову упаковку [18]. Він також може ефективно переробляти низькоякісні, важкоперероблювані потоки змішаних пластикових відходів [24].
- Продукти: В результаті піролізу утворюється нафтоподібна рідина, яка називається піролізною олією (або пластиковою сировою олією), а також гази, які часто циркулюють назад для генерації тепла, і воски [22]. Піролізна олія може бути використана як сировина для виробництва нових пластмас, що мають властивості, ідентичні первинним пластмасам, виготовленим з нафти [22].
- Переваги: Пластик, отриманий після піролізу, по суті є первинним, що дозволяє використовувати його в будь-яких застосуваннях, включаючи контакт з харчовими продуктами, косметикою або навіть медичну упаковку [23]. Він не матиме забруднень кольором або запахом, які можуть бути присутніми при механічній переробці [23]. Піроліз має відносно невеликий розмір, що дозволяє будувати модульні установки для збільшення потужності [23]. Він також вимагає менше сортування, оскільки може обробляти змішані відходи [25].
- Обмеження: Забруднювачі, відмінні від поліетилену та поліпропілену (наприклад, ПЕТ з киснем), можуть перешкоджати процесу, викликаючи неефективність [23]. Проекти піролізу є дорогими і вимагають великих обсягів недорогої сировини для забезпечення прибутковості [18].
- Енергоспоживання та викиди парникових газів: Енергоефективний піроліз з низькими викидами може перетворювати традиційно неперероблювані пластмаси на прибуткові палива та хімікати [25]. Процес виробляє на 60% менше викидів парникових газів для дизельного палива порівняно з видобутком та переробкою викопного палива [25]. Дослідження показують, що виробництво пластмас за

допомогою хімічної переробки (піролізу) або механічної переробки (змішаних пластикових відходів) призводить до схожих викидів CO₂ [26].

- Промислові застосування та пілотні проекти: Піроліз розглядається як ключовий вихід для плівок та гнучкої упаковки (FFP) [18]. Компанії, такі як Neste, Borealis, Upronor та Wastewise Group, успішно перетворюють постіндустріальні відходи PEХ-пластику на високоякісні пластикові труби за допомогою піролізу [27]. Quantafuel спеціалізується на перетворенні низькоякісних пластмас на очищений газ для хімічної переробки, а Plastic Energy перетворює відходи пластмас на чисті перероблені матеріали [3]. BASF також реалізує проєкт ChemCycling [26].

Газифікація — це процес, при якому полімери обробляються високою температурою в контрольованому кисневому середовищі, перетворюючи їх на базові компоненти, такі як водень та оксид вуглецю (синтез-газ) [5].

- Принципи: Процес є свого роду "молекулярним скрамблером", що повертає пластмаси до базових компонентів [23].
- Цільові пластики: Газифікація може ефективно обробляти ширший спектр пластикових відходів та інших вуглецевмісних сировинних матеріалів, що робить її життєздатним методом для перетворення складних пластикових відходів або сумішей, що містять пластик [23].
- Продукти: Синтез-газ, який зазвичай перетворюється на метанол [23]. Метанол може бути використаний для виробництва добрив або перетворений назад на полімери [23]. Також можливе виробництво водню [28].
- Переваги: Вимагає менше сортування та має широку доступність сировини, оскільки може використовувати харчові відходи, деревину або майже будь-яке джерело вуглецю [23].
- Обмеження: Вимагає дуже великих капітальних витрат для будівництва всього обладнання для повернення до пластмас [23]. Має досить низький коефіцієнт конверсії, що призводить до високого вуглецевого сліду, якщо не інтегровано з уловлюванням вуглецю [23].
- Енергоспоживання та викиди парникових газів: Усі термохімічні методи виділяють вуглекислий газ, або через споживання енергії, або як побічний

продукт [28]. Для досягнення низьковуглецевого виробництва водню за допомогою газифікації необхідна ефективна інтеграція технологій уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS) [28].

Деполімеризація — це процес, який розщеплює довгі полімерні ланцюги на їхні початкові будівельні блоки, такі як мономер, за допомогою хімічних, термічних або каталітичних процесів [1] Сольволіз, зокрема, є ключовою технологією хімічної переробки, яка перетворює пластикові відходи на базові хімікати, мономер та сировину [5].

- Принципи: Сольволіз передбачає нуклеофільну атаку на ефірні зв'язки, що призводить до повного розщеплення полімерного ланцюга з метою відновлення початкових мономерів, олігомерів або інших корисних малих молекул [5]. Ці відновлені мономер або олігомери можуть бути повторно введені в процес виробництва первинних пластмас [5].
- Цільові пластики: Цей підхід особливо підходить для певних типів пластмас, таких як ПЕТ, ПЛА (полімолочна кислота) та нейлон [1] Однак, сольволіз, як правило, не підходить для поліолефінів (HDPE, LDPE, PP, PS), оскільки вони складаються з насичених C–C та C–H зв'язків, які є високостійкими до хімічної функціоналізації або деградації цими процесами [5].
- Продукти: В результаті деполімеризації утворюються мономер, які можуть бути використані для виробництва нових полімерів з якістю, схожою на первинну [8]. Наприклад, з ПЕТ можна отримати терефталеву кислоту (TPA), етиленгліколь (EG), диметилтерефталат (DMT) або біс(2-гідроксietил)терефталат (BHET) [1]. З ПЛА можна отримати молочну кислоту або лактид [5].
- Переваги: Забезпечує високу якість матеріалу, подібну до первинної, що дозволяє використовувати його для високоцінних застосувань, включаючи контакт з харчовими продуктами [1]. Дозволяє замкнутий цикл переробки для певних полімерів [1].
- Обмеження: Деполімеризація, як правило, вимагає високої чистоти сировини з мінімальною кількістю забруднень (інші пластмаси, барвники, клеї) [5]. Процеси є енерго- та хімічно інтенсивними, а також вимагають додаткових етапів обробки

та очищення, що робить їх дорожчими, ніж механічна переробка [5].

- Енергоспоживання та викиди парникових газів: Гліколіз ПЕТ та метаноліз демонструють хороші економічні та екологічні показники [1]. Ферментативний гідроліз ПЕТ може знизити споживання енергії на 69-83% та викиди парникових газів на 17-43% на кілограм ТРА [30]. Деполімеризація суміші ПЛА/ПЕТ може знизити виробничі витрати на 62% та викиди парникових газів на 29% [29].
- Промислові застосування та пілотні проєкти: Компанії Eastman та Loop Industries впроваджують метаноліз для ПЕТ [5]. Французький стартап Carbios розробив ферментативний підхід до деполімеризації ПЕТ на мономери, маючи пілотну установку та плануючи відкриття комерційної у 2025 році [29]. Дослідники з NREL's BOTTLE project також працюють над ферментативними та каталітичними методами деполімеризації [29] Eastman також завершила будівництво заводу з сольволізу ПЕТ потужністю 110 000 т на рік [32].

Хімічна переробка позиціонується як критично важливий фактор для досягнення справжньої циркулярності, долаючи обмеження механічної переробки. Вона доповнює механічну переробку, обробляючи складні, забруднені та багат шарові пластмаси, а також виробляючи матеріали, які за якістю подібні до первинних. Ця здатність є ключовою для досягнення вищих показників переробки та розширення типів пластмас, які можуть бути перероблені, що є важливим кроком до зменшення залежності від первинних викопних ресурсів.

Окрім механічної та традиційної хімічної переробки, розвиваються інші інноваційні підходи, які розширюють можливості переробки пластикових відходів.

Ферментативна переробка — це біотехнологічний процес, який використовує ферменти для розщеплення полімерної структури пластикових фракцій [1].

- Принципи: Ферменти діють як каталізатори, розкладаючи пластик на його вихідні будівельні блоки (мономери) [31]. Ці ферменти характеризуються високою субстратною специфічністю, що робить їх потужним інструментом для обробки складних або гетерогенних фракцій пластикових відходів без необхідності попереднього сортування [33].
- Переваги: Висока специфічність, низьке енергоспоживання, використання м'яких

умов (рН, тиск, температура) [30]. Ця технологія дозволяє отримувати високоцінні продукти, включаючи полімери з властивостями, подібними до первинних полімерів, з пластикових відходів [33]. Вона також добре узгоджується з новими моделями циркулярної економіки [33].

- Цільові пластики: Ферментативна переробка може бути застосована до ПЕТ (включаючи текстиль та килимове волокно), ПЛА, багатошарової упаковки ПЕТ/ПЕ-ПП, пінопластів ПЕ-ПУ та мікропластику [29].
- Енергоспоживання та викиди парникових газів: Аналіз показує, що ферментативна переробка ПЕТ може значно знизити загальне споживання енергії в ланцюгу поставок на 69-83% та викиди парникових газів на 17-43% на кілограм ТРА порівняно з традиційними методами виробництва на основі викопного палива [30].
- Промислові застосування та пілотні проєкти: Французький стартап Carbios розробив проривний ферментативний процес біопереробки ПЕТ, який дозволяє розщеплювати 90% пластику за 10 годин [29]. Компанія Biotherm (L'Oréal) вже випустила першу пляшку, виготовлену зі 100% біопереробленого ПЕТ-пластику за технологією Carbios [31]. Консорціум BOTTLE, включаючи NREL, працює над розробкою енергоефективних, економічно ефективних та масштабованих технологій переробки на основі ферментів [30]. Проєкт ENZYCLE, що фінансується ЄС, розробляє нові процеси для ферментативної переробки неперероблюваних пластикових фракцій, таких як багатошарова упаковка та мікропластик [35]. Проєкт HARNESS зосереджений на розробці пілотної системи для розщеплення пінопластів полієфір-поліуретану (ПЕ-ПУ) за допомогою інженерних ферментів [34].

Очищення за допомогою надкритичного CO₂ є інноваційним "третім шляхом" для покращення якості переробленого пластику [36].

- Принципи: Надкритичний CO₂ — це унікальний стан речовини, що досягається при високих температурах та тиску, де CO₂ поводить себе як газ і рідина одночасно [36]. У цьому стані він стає потужним розчинником, здатним проникати в пластик і розчиняти різні добавки, пластифікатори або забруднення без зміни

молекулярної структури полімеру [36].

- Процес: Механічно перероблені пластикові гранули поміщаються в автоклави, де циркулює надкритичний CO₂, витягуючи небажані речовини [36]. Регулюючи щільність надкритичного CO₂ (через температуру та тиск), можна вибірково витягувати певні молекули [36].
- Переваги: Значно підвищує чистоту перероблених пластмас, збільшуючи їхній потенціал для високоцінного повторного використання, включаючи застосування, що вимагають харчової якості [36]. Цей процес доповнює механічну переробку, покращуючи якість вихідного матеріалу [36]. Хоча точні цифри ще не оприлюднені, очікується, що його вплив на навколишнє середовище буде значно меншим, ніж у хімічної переробки [36]. Метою є зробити цю технологію дешевшою, ніж повна хімічна деполімеризація, хоча наразі вона дорожча за механічну переробку [36]. Вона також має потенціал для переробки старих пластмас, які наразі важко обробляти [36].
- Промислові застосування та пілотні проекти: Технічний центр IPC у Франції тестує цей процес для очищення механічно перероблених пластикових гранул [36]. Пілотний проєкт, запущений у Франції за фінансування Citeo, дозволив провести перші реальні випробування технології надкритичного CO₂ на післяспоживчому пластику [36].
- Хімічне очищення/Розчинення (Chemical Washing/Dissolution)
- Хімічне очищення — це процес очищення, при якому полімер, присутній у змішаних пластикових відходах, вибірково розчиняється в розчиннику, дозволяючи відокремити його від відходів та відновити в чистій формі без зміни його хімічної природи [1].
- Принципи: Процес використовує хімікати для очищення та очищення пластику, не змінюючи та не розщеплюючи полімер на різні мономері; по суті, він залишається тим самим пластиком від початку до кінця, як і при механічній переробці [12].
- Переваги: Зберігає оригінальну структуру пластику [11]. Дозволяє видаляти

забруднення, такі як грибок, цвіль, барвники тощо [12]. Забезпечує високу якість переробленого матеріалу [1].

- Цільові пластики: Ця технологія вже застосовується до різних полімерів, таких як полівінілхлорид (ПВХ), полістирол (ПС), нейлон (ПА) або поліпропілен (ПП), для їх відділення від змішаних, багатоматеріальних відходів [9]. Також застосовується для поліолефінів та поліестерів [1].
- Промислові застосування: Існує кілька промислових прикладів застосування цієї технології [9].

Інноваційні методи очищення та біологічні методи з'являються як важливі доповнення, а не просто альтернативи, до існуючих технологій переробки. Ці технології (ферментативна переробка, очищення надкритичним CO₂, розчинення) вирішують специфічні проблеми, такі як забруднення, змішані відходи та деградація якості, тим самим розширюючи межі того, що може бути перероблено, і до якої якості. Це відкриває шлях до переробки раніше неперероблюваних матеріалів та досягнення вищої якості перероблених продуктів, що є критично важливим для створення справді циркулярної економіки.

1.3 Порівняльний аналіз технологій переробки пластику

Вибір оптимальної технології переробки пластику вимагає ретельного порівняльного аналізу за кількома ключовими параметрами, включаючи економічну доцільність, вплив на навколишнє середовище та якість переробленого матеріалу.

Механічна переробка, як правило, є найбільш рентабельною технологією переробки, особливо коли потоки відходів чисті та однорідні [1]. Її усталені процеси та доступна інфраструктура роблять її привабливим варіантом для виробників, які прагнуть скоротити витрати та вуглецевий слід [11]. Однак, дослідження показують, що системи управління твердими відходами, які покладаються виключно на традиційні механічні методи, несуть вищі системні витрати, хоча й можуть досягти найнижчих викидів парникових газів [37].

Для підготовки полімерних матеріалів до переробки і повторного використання застосовується комплекс обладнання:

– дробарки – подрібнюють пластикові відходи на фракції розміром від 5 до 20 мм в залежності від потреб виробництва;



Рисунок 1.2 – Дробарка

– шредери – подрібнюють товстостінні масивні відходи;



Рисунок 1.3 – Шредер

– пульвейзери – подрібнюють вироби ПВХ та інші відходи в порошок;



Рисунок 1.4 – Пульвейзер

– центрифуги – висушують більшу частину подрібнених пластикових відходів;



Рисунок 1.5 – Центрифуга

– компактори – використовуються для агломерації відходів пластикових виробів;



Рисунок 1.6 – Компактор

Хімічна переробка, як правило, дорожча за механічну, що пов'язано зі значними капітальними витратами на будівництво та експлуатацію установок [5]. Проекти піролізу, наприклад, є дорогими і вимагають великих обсягів недорогої сировини для забезпечення прибутковості [18]. Незважаючи на це, деякі хімічні процеси, такі як гліколіз ПЕТ, демонструють кращу економічну ефективність порівняно з конкуруючими технологіями [1]. Очікується, що інвестиції в хімічну переробку досягнуть 50 мільярдів доларів до 2030 року, що свідчить про зростаючу віру в її довгострокову економічну життєздатність [14].

Ферментативна переробка ПЕТ, як показують дослідження, може досягти паритету витрат з виробництвом первинного ПЕТ, що робить її економічно привабливою альтернативою [29]. Очищення за допомогою надкритичного CO₂ наразі дорожче за механічну переробку, але розробники прагнуть зробити її дешевшою за повну хімічну деполімеризацію [36].

Висока вартість переробки, особливо хімічної, та складність типів пластикових відходів є значними економічними бар'єрами [20]. Вартість транспортування пластикових відходів також може зробити маржу негативною, особливо для низькоцінних матеріалів, таких як плівка [18]. Крім того, відсутність стабільного

попиту на перероблений пластик перешкоджає економічній життєздатності ініціатив з переробки та підриває зусилля із замикання циклу в життєвому циклі пластику [19].

Хоча механічна переробка часто здається більш економічно життєздатною на перший погляд, справжній аналіз витрат і вигод повинен враховувати весь життєвий цикл і якість кінцевого продукту. Це означає, що вищі початкові витрати на передову переробку можуть бути компенсовані здатністю обробляти різноманітні, забруднені відходи та виробляти високоцінні матеріали, подібні до первинних, які мають кращі ринкові ціни та зменшують потребу в первинній сировині. Це підкреслює, що інвестиції в передові технології, незважаючи на їхню початкову вартість, можуть принести значні довгострокові економічні вигоди за рахунок підвищення цінності перероблених матеріалів та розширення їхнього ринкового застосування.

1.4 Вплив на навколишнє середовище

Механічна переробка є екологічно вигідною, оскільки вона значно знижує енергоспоживання та викиди парникових газів порівняно з виробництвом первинного матеріалу. Зокрема, використання перероблених смол зменшує загальне споживання енергії на 79% для ПЕТ, 88% для ПНД та 88% для ПП [11]. Викиди парникових газів скорочуються на 67% для ПЕТ, 71% для ПНД та 71% для ПП [15]. Загалом, механічна переробка демонструє найкращі екологічні показники (на 7-88% нижчі) серед усіх розглянутих технологій [1].

Вплив хімічної переробки на навколишнє середовище є більш складним і залежить від складу відходів та джерела енергії, що використовується для живлення установки [16]. Хоча хімічна переробка може призвести до чистого скорочення викидів парникових газів [37], деякі дослідження показують, що виробництво пластмас за допомогою хімічної переробки (піролізу) або механічної переробки (змішаних пластикових відходів) призводить до схожих викидів CO_2 [26]. Енергоефективний піроліз з низькими викидами може перетворювати неперероблювані пластмаси на палива та хімікати, зменшуючи викиди парникових газів на 60% для дизельного палива порівняно з викопним паливом [25]. Проте

газифікація, хоча і є перспективною, вимагає інтеграції технологій уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS) для досягнення низьковуглецевого виробництва водню [28].

Ферментативна переробка ПЕТ демонструє значні екологічні переваги, знижуючи загальне споживання енергії в ланцюгу поставок на 69-83% та викиди парникових газів на 17-43% на кілограм ТРА порівняно з традиційними методами [30]. Очищення за допомогою надкритичного CO₂, хоча і є відносно новою технологією, оцінюється як значно менш впливова на навколишнє середовище, ніж хімічна переробка [36].

Екологічна перевага переробки над виробництвом первинних матеріалів є очевидною, але "найзеленіший" шлях переробки залежить від конкретного полімеру та процесу. Це означає, що хоча механічна переробка загалом має найменший безпосередній екологічний слід, її обмеження щодо якості матеріалу та сфери застосування означають, що передові методи, незважаючи на потенційно вищі енергетичні витрати, є критично важливими для обробки важкоперероблюваних відходів та досягнення ширшого ефекту декарбонізації. Вибір джерела енергії для переробних підприємств є вирішальним фактором у визначенні загального екологічного впливу.

1.5 Якість переробленого матеріалу

Механічна переробка, хоча і є ефективною для певних типів пластику, часто призводить до зниження якості матеріалу та даунсайклінгу [11]. Повторні цикли переробки можуть послабити структуру пластику, зменшуючи його цінність та якість [11]. Цей процес дуже чутливий до забруднень, таких як залишки їжі, невідповідні пластики, органічні речовини, барвники, етикетки, які можуть погіршити полімерні ланцюги та обмежити кінцеві застосування [11]. Для отримання придатного матеріалу необхідне ретельне сортування та видалення домішок [11].

Хімічна переробка здатна виробляти матеріали, які за якістю подібні до первинних, що дозволяє використовувати їх у високоцінних застосуваннях [8]. На

відміну від механічної переробки, яка вимагає високосегрегованої сировини, деякі технології хімічної переробки значною мірою неселективні та мають вищу толерантність до забруднень сировини, що економить час та додаткові витрати, пов'язані з попереднім сортуванням пластику [5]. Це дозволяє обробляти ширший спектр пластикових відходів, включаючи забруднені та змішані матеріали [14]. Хімічна переробка також дозволяє апсайклінг, покращуючи якість пластику в процесі [14].

Інноваційні технології:

- Ферментативна переробка: Завдяки високій специфічності ферментів, ця технологія може обробляти складні або гетерогенні фракції без необхідності попереднього сортування, виробляючи високоякісні продукти, подібні до первинних полімерів [31].
- Очищення за допомогою надкритичного CO₂: Цей процес не змінює молекулярну структуру полімеру, але видаляє небажані речовини, тим самим підвищуючи потенціал пластику для високоцінного повторного використання, включаючи застосування для харчових продуктів [36].
- Хімічне очищення/Розчинення: Дозволяє відновити полімер у чистій формі без зміни його хімічної природи, видаляючи забруднення, такі як грибок, цвіль або барвники [9]. Цей метод забезпечує високу якість переробленого матеріалу [1].

Прагнення до якості, подібної до "первинної", є ключовою відмінністю та ціннісною пропозицією для передової переробки. Це означає, що вирішення проблем забруднення та деградації матеріалу має першочергове значення для розширення застосувань перероблених пластмас, особливо для високоцінних використань, таких як харчова упаковка, чого механічна переробка не може досягти послідовно. Це також підкреслює, що для повного замикання циклу пластику та створення ринків для перероблених матеріалів, які можуть конкурувати з первинними, необхідні технології, що забезпечують високу якість та чистоту.

Масштабування технологій переробки пластику є складним завданням, що вимагає подолання численних технологічних, економічних, політичних та інфраструктурних бар'єрів.

Сучасні технології переробки часто стикаються з труднощами при обробці різноманітних та складних потоків відходів, що генеруються сучасними моделями споживання [17]. Багато матеріалів є композитними, містять кілька речовин, які важко розділити [17]. Наприклад, багат шарова упаковка, розроблена для збереження їжі та напоїв, створює значні проблеми для переробки через складність розділення різних шарів [17]. Термореактивні пластмаси також є складними для механічної переробки [13].

Для подолання цих обмежень розробляються та впроваджуються передові технологічні рішення:

- Удосконалені технології сортування: Розробка більш ефективних та економічно вигідних методів розділення змішаних матеріалів, таких як оптичне сортування, NIR-виявлення, магніти, гравітаційні/флотаційні процеси та камери [12]. Ці системи можуть автоматизувати процес та підвищити ефективність сортування [19].
- Деконтамінація та видалення запахів: Використання води, надкритичного CO₂, розчинників та озону для очищення та видалення запахів з пластикових відходів [33].
- Деламінація багат шарових матеріалів: Розробка нових процесів деламінації для ефективного розділення шарів, що складають багат шарову структуру, шляхом вибіркового впливу на один з її шарів за допомогою селективного розчинення або деполімеризації [33].
- Реактивна екструзія: Безперервний процес, який використовує екструдер як хімічний реактор для проведення хімічних реакцій розплаву та виробництва перероблених полімерів з покращеними реологічними, механічними та хімічними властивостями [33].
- Нові каталізатори: Розробка простих, недорогих та нетоксичних каталізаторів, які можуть ефективно розщеплювати пластик, використовуючи, наприклад, слідові кількості вологи з повітря [40].

Внутрішня складність потоків пластикових відходів вимагає багатогранного технологічного підходу. Це означає, що жодна окрема технологія переробки не є

"срібною кулею", і для ефективної обробки різноманітного спектру пластикових відходів потрібна комбінація передових методів сортування, механічної, хімічної та інноваційної очисної переробки. Це підкреслює необхідність комплексних рішень, які можуть адаптуватися до мінливого складу відходів та максимізувати відновлення цінних матеріалів.

1.6 Рекомендації щодо переробки пластикових відходів

Переробка пластикових відходів є невід'ємним елементом переходу до циркулярної економіки та декарбонізації промисловості. Хоча механічна переробка залишається найбільш поширеним і економічно вигідним методом для чистих, однорідних потоків, її обмеження щодо деградації матеріалу та нездатності обробляти складні або забруднені відходи вимагають комплементарних рішень.

Передові технології, такі як хімічна переробка (включаючи піроліз, газифікацію та деполімеризацію/сольволіз), ферментативна переробка та очищення за допомогою надкритичного CO₂, відіграють вирішальну роль у розширенні спектру перероблюваних матеріалів та досягненні якості, подібної до первинної. Ці методи здатні перетворювати раніше неперероблювані або низькоцінні відходи на високоякісну сировину, що має вирішальне значення для замикання циклу матеріалів та зменшення залежності від первинних викопних ресурсів.

Незважаючи на значні технологічні досягнення, масштабування переробки пластику стикається з економічними бар'єрами, такими як високі капітальні витрати та низька вартість деяких перероблених матеріалів. Однак, зростаючий попит на перероблений пластик, що стимулюється регуляторними вимогами та корпоративними зобов'язаннями щодо сталого розвитку, створює сприятливі ринкові умови для інвестицій та інновацій. Політика, така як розширена відповідальність виробника (EPR) та мінімальні вимоги до вмісту переробленого матеріалу, є незамінною для забезпечення необхідного фінансування та стимулів для розвитку інфраструктури переробки.

Ефективне управління відходами на початкових етапах, включаючи збір та

сортування, залишається фундаментальним вузьким місцем для всіх технологій переробки. Забруднення та неефективні системи сортування обмежують якість та кількість доступної сировини, підкреслюючи необхідність значних інвестицій у вдосконалення інфраструктури та підвищення обізнаності споживачів.

Для прискорення переходу до справді циркулярної економіки пластику та максимізації переваг сучасних технологій переробки, пропонується наступне:

- Інвестиції в інфраструктуру збору та сортування: Необхідно значно збільшити інвестиції в модернізацію та розширення систем збору та сортування пластикових відходів, включаючи впровадження передових технологій оптичного сортування та автоматизації. Це забезпечить вищу якість та кількість сировини для всіх типів переробки.
- Посилення політичної підтримки: Уряди повинні продовжувати впроваджувати та посилювати політику, таку як розширена відповідальність виробника (EPR), мінімальні вимоги до вмісту переробленого матеріалу та стандарти дизайну для переробки. Ці заходи створюють необхідні економічні стимули та регуляторні рамки для розвитку галузі переробки.
- Стимулювання досліджень та розробок: Необхідно збільшити фінансування досліджень та розробок у галузі інноваційних технологій переробки, особливо тих, що здатні обробляти змішані та забруднені відходи, а також виробляти високоякісні матеріали з меншим енергоспоживанням та викидами парникових газів.
- Підвищення попиту на перероблені матеріали: Слід активно стимулювати попит на перероблені матеріали через ринкові механізми, програми державної закупівлі та освіти споживачів. Це допоможе створити стабільні кінцеві ринки та підвищити економічну життєздатність переробки.
- Сприяння міжнародній співпраці та стандартизації: Гармонізація стандартів переробки та маркування на глобальному рівні, а також міжнародна співпраця у сфері досліджень та розробки, є критично важливими для створення єдиної та ефективної глобальної системи переробки пластику.

Шлях до циркулярної економіки пластику вимагає скоординованих зусиль усіх

зацікавлених сторін — урядів, промисловості, науковців та споживачів. Інвестуючи в інноваційні технології та створюючи сприятливе середовище, можливо перетворити пластикові відходи з екологічної проблеми на цінний ресурс, що сприятиме більш стійкому та декарбонізованому майбутньому.

2 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

2.1 Розрахунок основних процесів переробки пластикових відходів

Для ефективного вирішення проблеми пластикових відходів критично важливим є застосування кількісного аналізу. Розрахунки дозволяють оцінити екологічні, економічні та операційні переваги переробки, виявити "гарячі точки" у процесах та обґрунтувати необхідні інвестиції. Оцінка життєвого циклу (LCA) є ключовим інструментом для всебічного розуміння екологічного впливу пластикових продуктів, від видобутку сировини до утилізації або переробки [6]. Вона допомагає виробникам та політикам вийти за межі припущень та приймати більш обґрунтовані рішення, що балансують продуктивність, вартість та стійкість [6]. Переробка пластику охоплює складний ланцюжок процесів, кожен з яких має свої унікальні економічні та екологічні показники. Нижче наведено приклади розрахунків, які демонструють різні аспекти переробки пластикових відходів.

2.2 Розрахунки енергоспоживання

Енергоспоживання є ключовим показником екологічного сліду та операційної ефективності в переробці пластику. Розуміння енергетичних потреб на різних етапах дозволяє виявити можливості для оптимізації та економії.

Виробництво переробленого пластику є значно менш енергоємним, ніж виробництво первинного матеріалу. Загалом, воно споживає лише 10-30% енергії, необхідної для виробництва первинного пластику [4]. Конкретніше, переробка однієї тонни пластику економить приблизно 5,774 кВт·год енергії [12]. Виробництво нових пляшок з переробленого пластику споживає на 75% менше енергії, ніж створення пляшок з первинного пластику [12].

Таблиця 2.1 – Енергоспоживання ключових етапів переробки пластику

Етап переробки	Типове енергоспоживання	Примітки
Загальна переробка пластику (економія)	5,774 кВт·год/тонну	Економія енергії порівняно з виробництвом первинного пластику
Грануляція	9.23 кВт·год/тонну	Питоме енергоспоживання для грануляції (дані для комбікорму)
Екструзія (навантаження процесу)	0.4 - 0.6 кВт·год/кг	Питоме навантаження процесу екструзії
Екструзія пластику (нагрів)	0.16 кВт·год/кг (ПЕ, ПП)	Енергія для підвищення температури напівкристалічних пластиків
	0.10 кВт·год/кг (ПВХ, ПС)	Енергія для підвищення температури аморфних пластиків
Піроліз	899 кВт·год/тонну (3.239 ГДж/тонну)	Енергія для вилучення олії з 1000 кг LDPE
	600 кВт·год/тонну (або кг)	Оцінка енергоспоживання для піролізу
Газифікація	3129 кВт·год/тонну	Оцінка енергоспоживання для газифікації

Оцінимо питоме енергоспоживання для екструзії та грануляції. Екструзія та грануляція є енергоємними процесами в механічній переробці. Екструдери можуть споживати сотні кіловат [10]. Питоме енергоспоживання для грануляції, за даними досліджень, становить близько 9.23 кВт·год/тонну (хоча це стосується комбікорму, принцип застосовний) [14]. Питоме навантаження процесу екструзії коливається від 0.4 до 0.6 кВт·год/кг. [16]. Енергія, необхідна для підвищення температури пластику в екструзії, становить приблизно 0.16 кВт·год/кг для напівкристалічних пластиків, таких як поліетилен (ПЕ) або поліпропілен (ПП), і 0.10 кВт·год/кг для аморфних пластиків, таких як полівінілхлорид (ПВХ) або полістирол (ПС)[17].

Розрахуємо енергетичний баланс хімічної переробки (піролізу). Хімічна переробка, зокрема піроліз, також має значні енергетичні потреби. Для вилучення олії з 1000 кг поліетилену низької щільності (LDPE) потрібно 3.239 ГДж (приблизно 899 кВт·год) [18]. Оцінки енергоспоживання для піролізу становлять близько 600 кВт·год/кг (ймовірно, кВт·год/тонну, враховуючи інші дані) [19], а для газифікації — 3129 кВт·год/тонну [19]. Важливою особливістю хімічної переробки є її потенціал для самозабезпечення енергією: піролізний газ, що утворюється під час процесу, може бути використаний для підтримки ендотермічних реакцій у реакторі [19]. Це може значно знизити чисте енергоспоживання. Крім того, хімічна переробка (піроліз) змішаних пластикових відходів, як правило, викидає менше CO₂, ніж спалювання тих самих відходів [5]. Технологія хімічної переробки Plastic Energy, наприклад, зменшує викиди CO₂ до 78% порівняно зі спалюванням з рекуперацією енергії [20]. Хоча механічна переробка демонструє нижчі загальні потреби в електроенергії, хімічна переробка може призводити до високоякісних продуктів та побічних продуктів, які можуть бути ефективніше повторно використані [21].

Загальна економія енергії від переробки пластику є суттєвою порівняно з виробництвом первинного матеріалу, що робить її екологічно вищою опцією. Етапи екструзії та грануляції є енергоємними "гарячими точками", що підкреслює важливість оптимізації процесів та обладнання. Інвестиції в енергоефективні технології, такі як використання частотно-регульованих приводів (VFD) на шнеках подачі [10] або оптимізація геометрії шнека [17], можуть призвести до значної економії.

Енергоефективність не тільки сприяє сталості, але й покращує фінансову прибутковість, надаючи переробникам конкурентну перевагу на ринку. Оскільки енергія є однією з високозатратних областей [8], будь-яке її зменшення безпосередньо впливає на операційні витрати. Це перетворює екологічну перевагу на економічну.

Хоча хімічна переробка є енергоємною, її потенціал для самозабезпечення енергією за рахунок піролізного газу та значне зниження викидів CO₂ порівняно зі спалюванням роблять її життєздатною. Це означає, що пряме енергоспоживання може бути високим, але чистий енергетичний баланс є набагато сприятливішим, ніж

здається, особливо якщо процес є енергетично самодостатнім. Оцінка хімічної переробки повинна враховувати весь життєвий цикл, включаючи потенціал для відновлення енергії, а не лише початковий вхід, щоб уникнути спрощених висновків про її енергоємність.

Існує розбіжність у детальних даних про енергоспоживання для окремих етапів механічної переробки (наприклад, подрібнення, промивання) у наданих джерелах [4], тоді як для екструзії та грануляції є більш точні цифри [15]. Цей розрив у даних ускладнює точну ідентифікацію та оптимізацію енергетичних "гарячих точок" на всіх етапах переробки. Більш гранульовані та стандартизовані дані про енергоспоживання для кожного етапу механічної переробки дозволили б краще порівнювати, бенчмаркувати та цілеспрямовано інвестувати в покращення ефективності, що є критично важливим для подальшого зниження витрат та впливу на навколишнє середовище.

2.3 Розрахунки виходу матеріалу та ефективності

Вихід матеріалу та ефективність є вирішальними для максимізації кількості вторинної сировини, що повертається в економіку, та для оцінки якості рециклінгових процесів.

Розрахуємо загальні показники переробки та ефективність збору ПЕТ. Світовий показник переробки пластику залишається низьким, близько 16% [3]. У Європі частка механічно переробленого пластику після споживання становила лише 13.2% від загального виробництва пластику у 2022 році [1]. Однак, спостерігається покращення в ефективності збору окремих типів пластику. Наприклад, частка механічно переробленого ПЕТ у ЄС зросла з 44% у 2018 році до 53% у 2020 році, що пояснюється покращенням збору та сортування [22]. Системи депозитно-повернення (DRS) значно ефективніші, маючи набагато менші втрати матеріалу під час сортування порівняно зі збором змішаних пластиків [22]. Збір змішаних пластиків, навпаки, призводить до "суттєвих втрат" при вилученні ПЕТ [22].



Рисунок 3.1 – Управління пластиковими відходами в Європі (ЄС-28 + Норвегія та Швейцарія)

Розрахуємо вихід матеріалу з механічної та хімічної переробки. Вихід вторинної сировини значно відрізняється між механічними та хімічними методами переробки. Типовий вихід вторинної сировини (пластикового матеріалу) з механічної переробки становить 73-84% [23]. Для хімічної переробки, зокрема методів конверсії, таких як піроліз, вихід пластикового матеріалу коливається від 0.1% до 5,7%, оскільки багато кінцевих продуктів мають непластикове використання (наприклад, паливо) [23]. Для газифікації цей показник становить 2-14% [23]. Деполімеризація, інший тип хімічної переробки, може досягати значно вищих показників виходу мономерів; наприклад, завод Eastman виробляє смолу з до 75% переробленого диметилтерефталату (ДМТ), одного з хімічних продуктів процесу метанолізу [23]. Дослідження активно працюють над досягненням кількісної відповідності виходів мономерів з експериментальними результатами [24].

Вихід матеріалу та ефективність є вирішальними для максимізації кількості вторинної сировини, що повертається в економіку, та для оцінки якості рециклінгових процесів.

Розрахунок показника переробки

$$\text{Показник переробки (\%)} = \left(\frac{\text{Маса переробленого матеріалу}}{\text{Загальна маса утворених відходів}} \right) \times 100\%$$

Наприклад, для ПЕТ у ЄС у 2020 році:

$$\text{Показник переробки ПЕТ} = (\text{Маса механічно переробленого ПЕТ у 2020 році} / \text{Загальна маса утвореного ПЕТ у 2020 році}) \times 100\% = 53\% \text{ 25}$$

Вихід вторинної сировини значно відрізняється між механічними та хімічними методами переробки. Типовий вихід вторинної сировини (пластикового матеріалу) з механічної переробки становить 73-84% [26]. Для хімічної переробки, зокрема методів конверсії, таких як піроліз, вихід пластикового матеріалу коливається від 0.1% до 5.7%, оскільки багато кінцевих продуктів мають непластикове використання (наприклад, паливо) [26]. Для газифікації цей показник становить 2-14% [26]. Деполімеризація, інший тип хімічної переробки, може досягати значно вищих показників виходу мономерів; наприклад, завод Eastman виробляє смолу з до 75% переробленого диметилтерефталату (ДМТ), одного з хімічних продуктів процесу метанолізу [26]. Дослідження активно працюють над досягненням кількісної відповідності виходів мономерів з експериментальними результатами [27].

Розрахунок виходу матеріалу

$$\text{Вихід матеріалу (\%)} = (\text{Маса отриманого вторинного матеріалу} / \text{Маса вхідної сировини}) \times 100\%$$

Наприклад, для механічної переробки:

$$\text{Вихід матеріалу} = (\text{Маса переробленого пластику} / \text{Маса вхідних пластикових відходів}) \times 100\% = 73-84\%$$

$$\text{Для піролізу: Вихід пластикового матеріалу} = (\text{Маса отриманого пластикового матеріалу} / \text{Маса вхідних пластикових відходів}) \times 100\% = 0.1-5.7\%$$

Оцінимо вплив якості сировини на кінцевий продукт та потенціал замкнутого циклу. Якість вхідної сировини має вирішальне значення для властивостей та цінності переробленого пластику. Для ПЕТ, внутрішня в'язкість (IV) є ключовим параметром, з оптимальним діапазоном 0.72-0.90 дл/г [28]. Низька IV може призвести до крихкості

матеріалу та утворення більшої кількості дрібних частинок під час грануляції та промивання. Температура кристалічного плавлення також важлива, з оптимальним діапазоном 225-255 °C; відхилення можуть спричинити проблеми з обробкою, наприклад, липкість або блокування в екструдері. Забруднення, такі як барвники, силікон або метал, негативно впливають на сортування, колір та загальну цінність кінцевої вторинної сировини. Потенціал замкнутого циклу також залежить від кінцевого використання: використання переробленого ПЕТ у новій упаковці має вищий потенціал (оцінюється в 0.8) порівняно з використанням у текстильних волокнах (0.4), оскільки для упаковки існують більш розвинені системи переробки [25].

Незважаючи на зусилля, світові та національні показники переробки залишаються низькими, що вказує на значний невикористаний потенціал для відновлення матеріалів. Метод збору відходів, такий як системи депозитно-повернення проти змішаного збору, має глибокий вплив на ефективність сортування, втрати матеріалу та, зрештою, на якість і вихід вторинної сировини. Системи змішаного збору, як правило, призводять до вищих втрат матеріалу та низької ефективності [25].

Низькі глобальні показники переробки та неефективність у системах змішаного збору призводять до дефіциту сировини для переробної промисловості [3]. Це, у свою чергу, призводить до того, що підприємства з переробки працюють нижче своєї потужності, або не можуть розширюватися для задоволення попиту, навіть коли попит на вторинну сировину зростає [3]. Це підкреслює необхідність покращення інфраструктури збору та сортування, щоб розблокувати повний потенціал системи переробки та створити нові можливості для циркулярної економіки.

Якість сировини є визначальним фактором успіху в переробці. Такі властивості, як внутрішня в'язкість (IV) та температура плавлення, а також рівні забруднення, безпосередньо впливають на цінність вторинної сировини та ефективність її обробки [28]. Це робить попереднє сортування та контроль якості на вході критично важливими для отримання високоякісних перероблених продуктів. Висока якість

вторинної сировини підвищує довіру виробників, забезпечує конкурентоспроможні ціни та сприяє замкнутим матеріальним циклам [25].

Різниця у виході між механічною та хімічною переробкою також є важливою. Механічна переробка, як правило, має значно вищі показники виходу "матеріал-в-матеріал" (73-84%) [26], але має обмеження щодо чистоти та типів пластику, які вона може обробляти. Вона часто призводить до "даунсайклінгу" (зниження якості матеріалу з кожним циклом) [29]. Навпаки, хімічна переробка, особливо методи конверсії, може мати нижчий вихід пластикового матеріалу, але вона здатна обробляти змішані та сильно забруднені потоки відходів, які механічна переробка не може, і може виробляти матеріали, які за якістю подібні до первинних [26]. Це свідчить про те, що механічна та хімічна переробка є доповнюючими, а не суто конкурентними шляхами. Хімічна переробка розширює можливості переробки, дозволяючи обробляти складніші відходи та створювати високоякісні продукти, які можуть бути повторно використані в широкому спектрі застосувань, включаючи харчову упаковку [5].

Нарешті, важливість оцінки життєвого циклу (LCA) для цілісної оцінки не може бути недооцінена. LCA виходить за рамки простого виходу матеріалу, розглядаючи загальні екологічні наслідки та переваги переробки, включаючи уникнення використання первинного матеріалу та потенціал для майбутніх циклів переробки [6]. Це допомагає уникнути перенесення одного екологічного впливу на інший і забезпечує загальний погляд на вплив продукту протягом його життєвого циклу [7]. Це дозволяє компаніям та політикам приймати рішення, які дійсно зменшують шкоду, а не просто переміщують її [6].

2.4 Вплив якості сировини на кінцевий продукт та потенціал замкнутого циклу

Якість вхідної сировини має вирішальне значення для властивостей та цінності переробленого пластику. Для ПЕТ, внутрішня в'язкість (IV) є ключовим параметром, з оптимальним діапазоном 0.72-0.90 дл/г [25]. Низька IV може призвести до крихкості

матеріалу та утворення більшої кількості дрібних частинок під час грануляції та промивання [25]. Температура кристалічного плавлення також важлива, з оптимальним діапазоном 225-255 °С; відхилення можуть спричинити проблеми з обробкою, наприклад, липкість або блокування в екструдері [25]. Забруднення, такі як барвники, силікон або метал, негативно впливають на сортування, колір та загальну цінність кінцевої вторинної сировини [25]. Потенціал замкнутого циклу також залежить від кінцевого використання: використання переробленого ПЕТ у новій упаковці має вищий потенціал (оцінюється в 0.8) порівняно з використанням у текстильних волокнах (0.4), оскільки для упаковки існують більш розвинені системи переробки [22].

Незважаючи на зусилля, світові та національні показники переробки залишаються низькими, що вказує на значний невикористаний потенціал для відновлення матеріалів. Метод збору відходів, такий як системи депозитно-повернення проти змішаного збору, має глибокий вплив на ефективність сортування, втрати матеріалу та, зрештою, на якість і вихід вторинної сировини. Системи змішаного збору, як правило, призводять до вищих втрат матеріалу та низької ефективності [22].

Низькі глобальні показники переробки та неефективність у системах змішаного збору призводять до дефіциту сировини для переробної промисловості [3]. Це, у свою чергу, призводить до того, що підприємства з переробки працюють нижче своєї потужності, або не можуть розширюватися для задоволення попиту, навіть коли попит на вторинну сировину зростає [3]. Це підкреслює необхідність покращення інфраструктури збору та сортування, щоб розблокувати повний потенціал системи переробки та створити нові можливості для циркулярної економіки.

Якість сировини є визначальним фактором успіху в переробці. Такі властивості, як внутрішня в'язкість (IV) та температура плавлення, а також рівні забруднення, безпосередньо впливають на цінність вторинної сировини та ефективність її обробки [25]. Це робить попереднє сортування та контроль якості на вході критично важливими для отримання високоякісних перероблених продуктів. Висока якість

вторинної сировини підвищує довіру виробників, забезпечує конкурентоспроможні ціни та сприяє замкнутим матеріальним циклам [22].

Різниця у виході між механічною та хімічною переробкою також є важливою. Механічна переробка, як правило, має значно вищі показники виходу "матеріал-в-матеріал" (73-84%) [23], але має обмеження щодо чистоти та типів пластику, які вона може обробляти. Вона часто призводить до "даунсайклінгу" (зниження якості матеріалу з кожним циклом) [26]. Навпаки, хімічна переробка, особливо методи конверсії, може мати нижчий вихід пластикового матеріалу, але вона здатна обробляти змішані та сильно забруднені потоки відходів, які механічна переробка не може, і може виробляти матеріали, які за якістю подібні до первинних [5]. Це свідчить про те, що механічна та хімічна переробка є доповнюючими, а не суто конкурентними шляхами. Хімічна переробка розширює можливості переробки, дозволяючи обробляти складніші відходи та створювати високоякісні продукти, які можуть бути повторно використані в широкому спектрі застосувань, включаючи харчову упаковку [5].

Нарешті, важливість оцінки життєвого циклу (LCA) для цілісної оцінки не може бути недооцінена. LCA виходить за рамки простого виходу матеріалу, розглядаючи загальні екологічні наслідки та переваги переробки, включаючи уникнення використання первинного матеріалу та потенціал для майбутніх циклів переробки [6]. Це допомагає уникнути перенесення одного екологічного впливу на інший і забезпечує загальний погляд на вплив продукту протягом його життєвого циклу [7]. Це дозволяє компаніям та політикам приймати рішення, які дійсно зменшують шкоду, а не просто переміщують її [6].

Аналіз розрахунків у переробці пластикових відходів чітко демонструє її багатогранний характер, що вимагає комплексного підходу до оптимізації. Операційні витрати, особливо енергоспоживання та витрати на оплату праці, є значними фінансовими факторами, що підкреслює важливість інвестицій в енергоефективні технології та оптимізацію робочої сили для підвищення прибутковості. Витрати на дотримання нормативних вимог, хоча й є тягарем, також стимулюють інновації та конкурентоспроможність у галузі.

З точки зору енергоспоживання, переробка пластику забезпечує значну економію порівняно з виробництвом первинного матеріалу, що робить її екологічно вищою альтернативою. Хоча деякі етапи, такі як екструзія та грануляція, є енергоємними, існують значні можливості для підвищення ефективності. Хімічна переробка, незважаючи на її енергоємність, демонструє потенціал для енергетичної самодостатності та значного скорочення викидів CO₂ порівняно зі спалюванням, що робить її життєздатною та доповнюючою технологією.

Показники виходу матеріалу та ефективності виявляють критичні недоліки в поточних системах збору, які призводять до значних втрат матеріалу та дефіциту сировини для переробної промисловості. Якість вхідної сировини має вирішальне значення для цінності та застосовності переробленого матеріалу, підкреслюючи важливість ефективного сортування та контролю забруднень. Механічна та хімічна переробка, з їхніми різними показниками виходу та можливостями, є доповнюючими стратегіями, які спільно можуть розширити діапазон перероблюваних пластиків та покращити якість кінцевих продуктів.

Загалом, для досягнення більш циркулярної економіки пластику необхідні цілеспрямовані інвестиції в покращення інфраструктури збору, впровадження ефективних технологій сортування, оптимізацію енергоспоживання на всіх етапах переробки та подальший розвиток як механічних, так і хімічних методів. Комплексне застосування оцінки життєвого циклу є необхідним для прийняття обґрунтованих рішень, які враховують весь екологічний та економічний вплив, забезпечуючи, що зусилля з переробки приносять максимальну користь для навколишнього середовища та економіки.

Аналіз розрахунків у переробці пластикових відходів чітко демонструє її багатогранний характер, що вимагає комплексного підходу до оптимізації. Операційні витрати, особливо енергоспоживання та витрати на оплату праці, є значними фінансовими факторами, що підкреслює важливість інвестицій в енергоефективні технології та оптимізацію робочої сили для підвищення прибутковості. Витрати на дотримання нормативних вимог, хоча й є тягарем, також стимулюють інновації та конкурентоспроможність у галузі.

З точки зору енергоспоживання, переробка пластику забезпечує значну економію порівняно з виробництвом первинного матеріалу, що робить її екологічно вищою альтернативою. Хоча деякі етапи, такі як екструзія та грануляція, є енергоємними, існують значні можливості для підвищення ефективності. Хімічна переробка, незважаючи на її енергоємність, демонструє потенціал для енергетичної самодостатності та значного скорочення викидів CO₂ порівняно зі спалюванням, що робить її життєздатною та доповнюючою технологією.

Показники виходу матеріалу та ефективності виявляють критичні недоліки в поточних системах збору, які призводять до значних втрат матеріалу та дефіциту сировини для переробної промисловості. Якість вхідної сировини має вирішальне значення для цінності та застосовності переробленого матеріалу, підкреслюючи важливість ефективного сортування та контролю забруднень. Механічна та хімічна переробка, з їхніми різними показниками виходу та можливостями, є доповнюючими стратегіями, які спільно можуть розширити діапазон перероблюваних пластиків та покращити якість кінцевих продуктів.

Загалом, для досягнення більш циркулярної економіки пластику необхідні цілеспрямовані інвестиції в покращення інфраструктури збору, впровадження ефективних технологій сортування, оптимізацію енергоспоживання на всіх етапах переробки та подальший розвиток як механічних, так і хімічних методів. Комплексне застосування оцінки життєвого циклу є необхідним для прийняття обґрунтованих рішень, які враховують весь екологічний та економічний вплив, забезпечуючи, що зусилля з переробки приносять максимальну користь для навколишнього середовища та економіки.

2.5 Приклад розрахунку для підприємства з переробки пластику методом піролізу

Піроліз є однією з ключових технологій хімічної переробки, яка дозволяє перетворювати змішані та забруднені пластикові відходи на цінні рідкі та газоподібні вуглеводні (піролізне масло, газ) та твердий залишок (кокс/вугілля). Цей процес

відбувається за високих температур у відсутності кисню [1]. На відміну від механічної переробки, яка зберігає полімерну структуру, піроліз розкладає полімери до їхніх базових хімічних компонентів, що дозволяє виробляти матеріали, які за якістю подібні до первинних [1].

Розглянемо гіпотетичне підприємство, яке переробляє поліетилен низької щільності (LDPE) методом піролізу. LDPE часто зустрічається у вигляді плівки та упаковки, і його переробка є важливою для зменшення обсягу відходів.

Ключові параметри [3]:

- Вхідна сировина: 1000 кг (1 тонна) LDPE за цикл.
- Температура піролізу: 450°C.
- Тривалість циклу нагріву та реакції: 20 хвилин.
- Щорічна пропускна здатність: Припустимо, що підприємство працює 300 днів на рік, виконуючи 20 циклів на день (з урахуванням часу на завантаження/розвантаження та охолодження).

Щорічна пропускна здатність = 1 тонна/цикл × 20 циклів/день × 300 днів/рік = 6000 тонн/рік.

Енергетичний баланс є критично важливим для піролізу, оскільки процес є енергоємним, але може бути частково самозабезпеченим за рахунок використання піролізного газу [4].

1. Енергія, необхідна для нагріву пластику:

Це енергія, потрібна для підвищення температури 1000 кг LDPE від кімнатної температури (припустимо, 20°C) до температури піролізу (450°C).

Питома теплоємність LDPE: 2600 Дж/кг·К

Зміна температури (ΔT): 450°C - 20°C = 430°C (або 430 K)

Енергія нагріву (Дж) = Маса (кг) × Питома теплоємність (Дж/кг·К) × ΔT (К)

$$\text{Енергія нагріву} = 1000 \text{ кг} \times 2600 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \times 430 \text{ К} = 1,118,000,000 \text{ Дж} = 1.118 \text{ ГДж}$$

У [3] вказано 3.104 ГДж для нагріву 1000 кг LDPE до 400°C, що може включати додаткові втрати або інші фактори. Для цього розрахунку ми використовуємо пряму формулу з наданими значеннями.

2. Енергія, необхідна для підтримки температури (втрати тепла):

Це енергія, потрібна для компенсації втрат тепла через стінки реактора під час 20-хвилинного циклу.

Потужність втрат тепла: 113.04 кВт (для сферичного реактора діаметром 0.8 м з 10 см ізоляції, при ΔT 380°C).

Тривалість: 20 хвилин = 1200 секунд.

$$\text{Енергія підтримки (Дж)} = \text{Потужність втрат (Вт)} \times \text{Час (с)}$$

$$\text{Енергія підтримки} = 113,040 \text{ Вт} \times 1200 \text{ с} = 135,648,000 \text{ Дж} = 0.1356 \text{ ГДж}$$

3. Загальна вкладена енергія за цикл:

$$\text{Загальна вкладена енергія} = \text{Енергія нагріву} + \text{Енергія підтримки}$$

$$\text{Загальна вкладена енергія} = 1.118 \text{ ГДж} + 0.1356 \text{ ГДж} = 1.2536 \text{ ГДж}$$

4. Енергія, отримана з продуктів піролізу:

З 1000 кг LDPE можна отримати 600 л бензину, 410 л дизелю та 305 л пропану.

• Енергетична цінність:

- Бензин: 31.5 МДж/л
- Дизель: 38 МДж/л
- Пропан: 25.3 МДж/л

$$\text{Загальна енергія продуктів} = (\text{Об'єм бензину} \times \text{Енергія бензину}) + (\text{Об'єм дизелю} \times \text{Енергія дизелю}) + (\text{Об'єм пропану} \times \text{Енергія пропану})$$

Енергія бензину = $600 \text{ л} \times 31.5 \text{ МДж/л} = 18,900 \text{ МДж} = 18.9 \text{ ГДж}$

Енергія дизелю = $410 \text{ л} \times 38 \text{ МДж/л} = 15,580 \text{ МДж} = 15.58 \text{ ГДж}$

Енергія пропану = $305 \text{ л} \times 25.3 \text{ МДж/л} = 7,716.5 \text{ МДж} = 7.7165 \text{ ГДж}$

Загальна енергія продуктів = $18.9 \text{ ГДж} + 15.58 \text{ ГДж} + 7.7165 \text{ ГДж} = 42.1965 \text{ ГДж}$

5. Чистий енергетичний баланс за цикл:

Чистий енергетичний баланс = Загальна енергія продуктів - Загальна вкладена енергія

Чистий енергетичний баланс = $42.1965 \text{ ГДж} - 1.2536 \text{ ГДж} = 40.9429 \text{ ГДж}$

Розрахунки показують, що піроліз LDPE є енергетично вигідним процесом, оскільки отримана енергія у продуктах значно перевищує вкладену енергію. Це підтверджує потенціал піролізу для самозабезпечення енергією за рахунок використання піролізного газу, що утворюється під час процесу, для підтримки ендотермічних реакцій у реакторі [4]. Це значно знижує чисте енергоспоживання та робить процес більш стійким.

Вихід матеріалу з піролізу відрізняється від механічної переробки, оскільки кінцеві продукти мають інше призначення.

- Вихід пластикового матеріалу: Типовий вихід *пластикового матеріалу* з піролізу коливається від 0.1% до 5.7%, оскільки багато кінцевих продуктів мають непластикове використання (наприклад, паливо) [2].
- Вихід піролізного масла (рідкого палива): Хоча конкретний відсоток виходу масла з 1000 кг LDPE не вказано, обсяги бензину, дизелю та пропану свідчать про значний вихід рідких продуктів. Дослідження показують, що оптимальні умови можуть давати до 42.3% піролізного масла [4].
- Вихід піролізного газу (синтез-газу): До 89.7% синтез-газу за оптимальних умов [4].

Низький вихід "пластикового матеріалу" з піролізу (0.1-5.7%) [2] не означає низьку ефективність, а вказує на зміну типу продукту. Піроліз перетворює пластик на паливо або хімічну сировину, яка може бути використана для виробництва нових хімікатів, включаючи пластик, подібний до первинного [1] Це дозволяє переробляти змішані та сильно забруднені відходи, які не підходять для механічної переробки [1].

Аналіз результатів:

- Енергетична ефективність: Піроліз є енергетично вигідним процесом, що генерує значно більше енергії у вигляді продуктів, ніж споживає. Це дозволяє підприємству бути енергетично самозабезпеченим, що суттєво знижує операційні витрати на енергію.
- Високі капітальні витрати: Початкові інвестиції у піролізні установки є значними (\$300 - \$1,000 за тонну потужності), що створює високий бар'єр для входу [7]. Однак, ці витрати можуть бути амортизовані з часом.
- Потенціал прибутковості: За умови стабільних цін на піролізне масло та газ, підприємство може бути прибутковим. Наш гіпотетичний розрахунок показує значний прибуток, що робить піроліз привабливим з економічної точки зору.
- Переваги над механічною переробкою: Хоча механічна переробка, як правило, дешевша в експлуатації (\$50 - \$200 за тонну) [7], вона має обмеження щодо чистоти та типів пластику, які може обробляти, часто призводячи до "даунсайклінгу" [9] Піроліз, навпаки, може обробляти змішані та сильно забруднені відходи, виробляючи високоякісні продукти, подібні до первинних [1]. Це розширює можливості переробки та дозволяє залучати потоки відходів, які інакше були б спалені або захоронені.
- Екологічні переваги: Піроліз змішаних пластикових відходів, як правило, викидає менше CO₂, ніж спалювання тих самих відходів [1]. Технологія хімічної переробки Plastic Energy, наприклад, зменшує викиди CO₂ до 78% порівняно зі спалюванням з рекуперацією енергії [10].

3 АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА БЕЗПЕКИ ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМ

3.1 Екологічні ризики поводження з полімерними відходами

Полімерні відходи утворюються внаслідок виробництва, використання та утилізації як мономатеріальних (виготовлених з одного типу смоли), так і багатоматеріальних продуктів (що містять один або кілька типів смол, папір або метал) [8]. Для цілей управління твердими побутовими відходами (ТПВ) Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) поділяє пластикові вироби на три основні типи:

- Контейнери та упаковка: До цієї категорії входять такі продукти, як поліетиленові пакети, контейнери та пакувальні матеріали, які часто використовуються для споживчих товарів (наприклад, продуктів харчування, напоїв, ліків) і викидаються разом з побутовими відходами [8]. Одноразові продукти, такі як пляшки, кришки, сигарети, сумки, чашки та соломинки, є значним джерелом забруднення [2].

- Недовговічні товари: Це продукти з терміном служби менше трьох років, включаючи пластикові тарілки, чашки, сміттєві пакети, одноразові підгузки та одяг [8].

- Довговічні товари: Продукти, які використовуються понад три роки, такі як побутова техніка, меблі, килими та споживча електроніка [8].

Пластикові вироби переважно виготовляються з первинної викопної сировини [8]. Обсяг пластикових відходів у системі ТПВ США постійно зростає з 1960 року, збільшившись з 0,4% у 1960 році до 12,2% у 2018 році [8]. Цей приріст переважно складається з контейнерів та упаковки, включаючи одноразові вироби [8]. У всьому світі щорічно виробляється понад 300 мільйонів тонн пластику, половина з яких припадає на одноразові вироби [9].

Джерела пластикового забруднення, що потрапляє в навколишнє середовище, є різноманітними:

- Неналежне поводження з відходами (наприклад, зібрані, але неналежним чином або незаконно утилізовані відходи, або відходи, які не збираються в районах, де існують послуги з управління ТПВ) [8].
- Засмічення (наприклад, предмети, викинуті в навколишнє середовище) [8].
- Стирання (наприклад, «зношування») та втрати мікропластику з таких продуктів, як синтетичний текстиль та шини [2].
- Промислова та морська діяльність, включаючи покинуте, загублене або іншим чином викинуте суднове, рибальське або аквакультурне спорядження, а також фарба, що відшаровується від суден [2].
- Міський та зливовий стік [2].
- Стічні води пральних машин [8].

За оцінками, наземні джерела становлять до 80% пластикових відходів, що забруднюють водні шляхи та океани [2].

Пластикове забруднення впливає на всі наземні, прісноводні та морські екосистеми, будучи основним рушієм втрати біорізноманіття та деградації екосистем [2].

Пряма шкода дикій природі є найбільш помітною: проковтування, задуха та заплутування [2]. Дикі тварини, такі як птахи, кити, риби та черепахи, помилково приймають неперетравні пластикові відходи за їжу і гинуть від голоду, оскільки їхні шлунки заповнюються пластиком [2]. Це також спричиняє внутрішні та зовнішні травми, що зменшують здатність плавати та літати [2]. Домашні сільськогосподарські тварини також страждають від пластикового забруднення [2]. Понад 260 видів, включаючи безхребетних, черепах, риб, морських птахів та ссавців, постраждали від проковтування або заплутування в пластикових відходах [10].

Пластикове сміття може пошкоджувати життєво важливі середовища існування, такі як коралові рифи [10]. Плаваючі пластики можуть переносити інвазивні чужорідні види, що є однією з провідних причин втрати біорізноманіття та вимирання видів [2]. У морському середовищі фрагменти пластику, особливо мікрочастинки,

можуть уповільнювати або перешкоджати вертикальному перенесенню кисню, впливаючи на здоров'я морських екосистем [11].

Хімічні речовини, що використовуються у виробництві пластикових матеріалів (наприклад, канцерогени, ендокринні руйнівники, такі як бісфенол А (BPA) та фталати), можуть вимиватися з пластику в ґрунт, ґрунтові води та річки, впливаючи на екосистеми та людей, що піддаються впливу [2]. Ці токсини можуть накопичуватися в харчовому ланцюгу, впливаючи на великих хижаків, таких як тунець та риба-меч [10].

Крім того, пластикові відходи можуть служити переносником патогенів, таких як кишкова паличка та сальмонела, сприяючи їх поширенню в навколишньому середовищі [10].

Пластик не розкладається; натомість він розпадається на все менші шматочки: мікропластик (менше 5 мм) та нанопластик (менше 100 нм) [1]. Цей процес може тривати понад 1000 років, поки пластик повністю розкладеться [9].

Ці крихітні частинки є всюдишними, їх знаходять по всьому світу в дикій природі (птахах, рибах) та у всіх середовищах, включаючи ґрунт, воду, відкладення, повітря, рослини і навіть у людських тілах [1]. Вони присутні в питній воді та їжі, яку ми споживаємо [1]. Мікропластик та нанопластик поширені по всій екосистемі [12]. Дослідження показують, що ці пластикові частинки можуть випадково споживатися організмами або переміщатися по харчовому ланцюгу від первинних продуцентів до споживачів на вершині, що призводить до негативного впливу на водну та наземну дику природу [12].

Токсичність пластикових частинок значною мірою залежить від їхнього розміру, форми, складу та здатності зв'язуватися з іншими хімічними речовинами, присутніми в екосистемі. Більші, більш жорсткі частинки можуть застрягати в кишечнику споживачів, спричиняючи кишкову непрохідність, тоді як менші (нано) частинки та волокна можуть викликати метаболічні, поведінкові та розвиткові порушення після проковтування [12].

Особливо важливим є те, що на поверхні цих частинок можуть утворюватися мікробні спільноти (біоплівки) [12]. Ці біоплівки можуть містити патогени та інші

токсичні речовини, такі як поліхлоровані біфеніли (ПХБ), пер- та поліфторалкільні речовини (ПФАС) та ртуть, тим самим збільшуючи їхню токсичність та несприятливий вплив на популяції екосистем [12]. Ця ситуація розкриває невидимий, підступний рівень небезпеки. Проблема виходить за межі фізичного заплутування або проковтування великих шматків; йдеться про широкомасштабне мікроскопічне забруднення, яке сприяє транспорту та біодоступності коктейлю хімічних та біологічних небезпек по всій екосистемі та харчових ланцюгах. Це означає, що навіть якщо видиме пластикове сміття буде усунуто, стійке та накопичувальне навантаження мікро- та нанопластику, з його пов'язаними хімічними та біологічними забруднювачами, продовжуватиме становити значну та довгострокову загрозу для здоров'я екосистем та благополуччя людини. Це вимагає переходу від простого прибирання видимого сміття до запобігання утворенню мікропластику та усунення його системного поширення.



Рисунок 3.1 – Вплив пластику на людину

Потрапивши в навколишнє середовище, мікропластик може легко вимивати токсичні добавки або концентрувати вже наявні в навколишньому середовищі токсини, роблячи їх біодоступними для прямого або непрямого впливу на людину [13]. У міру деградації частинок відкриваються нові поверхні, що дозволяє продовжувати вимивання добавок з ядра до поверхні частинки як у навколишньому

середовищі, так і в організмі людини [13]. Вплив мікропластику на організм людини через проковтування або вдихання може призвести до низки проблем зі здоров'ям, включаючи запалення, генотоксичність, окислювальний стрес, апоптоз та некроз, які пов'язані з низкою негативних наслідків для здоров'я, включаючи рак та серцево-судинні захворювання [13]. Хімічні речовини, що використовуються у виробництві пластику, є відомими канцерогенами і можуть викликати порушення розвитку, репродуктивної, неврологічної та імунної систем [2].

Вплив пластику на клімат охоплює весь його життєвий цикл, від видобутку викопного палива до утилізації [2].

99% пластику отримують з викопного палива [10]. Видобуток нафти та газу, особливо гідророзрив пласта для природного газу, виділяє безліч токсичних речовин у повітря та воду [13]. Видобуток та виробництво пластику супроводжується величезними викидами парникових газів (ПГ); за оцінками, лише видобуток викопного палива та його транспортування на заводи з виробництва пластику призводять до викидів від 1,5 до 12,5 млн. т ПГ [9]. Переробка пластику щорічно виділяє додатково від 184 до 213 млн. т ПГ [9]. Виробництво та транспортування пластику споживають близько 6% світового споживання нафти [10].

Видалення лісових угідь для видобутку нафти та будівництва трубопроводів призвело до викиду понад 1,6 млрд. т вуглекислого газу в атмосферу та обмежує природне поглинання вуглецю [9].

Звалища, куди потрапляє більшість пластикових відходів, відповідають за понад 15% викидів метану, потужного парникового газу [9]. Спалювання пластикових відходів виділяє ПГ (вуглекислий газ, метан) та інші забруднювачі (діоксини) в атмосферу [2]. Пластик розкладається повільно, виділяючи метан [10].

Це встановлює критичний причинно-наслідковий зв'язок: пластикове забруднення — це не просто екологічна проблема, відокремлена від зміни клімату; це невід'ємна частина економіки викопного палива, яка спричиняє зміну клімату. Ефективне вирішення проблеми пластикового забруднення вимагає боротьби з його походженням з викопного палива, що означає, що рішення повинні виходити за рамки управління відходами та включати стратегії декарбонізації та фундаментальне

скорочення виробництва первинного пластику. «Пластикова проблема» — це, по суті, «проблема викопного палива», що проявляється в іншій формі, вимагаючи цілісного підходу, який інтегрує дії щодо клімату з управлінням відходами.

Пластикове забруднення негативно впливає на економіку та торговельні системи країни, що призводить до зниження доходів у таких секторах, як малі та середні підприємства, неформальний сектор, туризм, рибальство, сільське господарство та безпека води [2]. Цикл виробництва пластику залежить від видобутку обмежених ресурсів, таких як нафта, природний газ та інші види викопного палива [10]. Величезний обсяг пластикових відходів, що утворюються щодня, є феноменальним і важким для утилізації [15]. Низькі показники переробки в ЄС означають значні економічні втрати [16].

Проблема пластикового забруднення має критичний етичний та соціальний вимір. Розвинені країни, такі як США, споживають непропорційно велику кількість пластику [8], а потім експортують значну частину своїх пластикових відходів до країн з низьким та середнім рівнем доходу (КНСД) [6]. Ця практика перевантажує вже обмежені можливості управління відходами в цих країнах-одержувачах, що призводить до широкомасштабного відкритого спалювання та накопичення сміття [6]. Економічний та екологічний тягар несправедливо перекладається на вразливі громади, увічнюючи цикл забруднення та ризиків для здоров'я в регіонах, найменш пристосованих для їх подолання. Це означає, що глобальні рішення повинні стосуватися не лише технічних аспектів управління відходами, а й основних економічних та політичних структур, які уможливають таку несправедливу торгівлю відходами, виступаючи за локалізовані, самодостатні системи управління відходами та притягуючи виробників до відповідальності за весь життєвий цикл їхньої продукції.

Значні, складні та взаємопов'язані наслідки для здоров'я людини виникають на кожному етапі життєвого циклу пластику [13]. Вплив токсичних речовин від гідророзриву, переробки та технологій управління відходами (спалювання, газифікація, піроліз) може спричинити низку серйозних проблем зі здоров'ям, включаючи рак, неврологічні, репродуктивні, розвиткові та імунні розлади [13].

Працівники та прилеглі громади стикаються з прямим та непрямим впливом через вдихання забрудненого повітря, прямий контакт із забрудненим ґрунтом/водою та споживання забрудненої їжі [13].

3.2 Оцінка екологічної безпеки існуючих методів поводження з відходами

Ієрархія управління відходами, запроваджена в законодавство ЄС у 2008 році, є наріжним каменем циркулярної економіки, що визначає пріоритетність практик управління відходами на основі їхньої сталості та впливу на навколишнє середовище [17]. Вона зазвичай зображується у вигляді перевернутої піраміди, щоб підкреслити необхідність обмеження потоків матеріалів до нижніх рівнів [17].

Ця п'ятирівнева ієрархія, що випливає з принципу «3R» (Зменшення, Повторне використання, Переробка), виглядає наступним чином:

1. Запобігання (найбільш бажане): Зосереджується на зменшенні відходів до їх утворення, наприклад, розробка продуктів, що використовують менше матеріалів, заохочення сталого споживання, уникнення зайвої упаковки [17]. Це найефективніша стратегія, оскільки вона зберігає ресурси, усуваючи утворення відходів [18].

2. Підготовка до повторного використання: Подовжує термін служби продуктів, зменшуючи попит на нові та мінімізуючи утворення відходів [17].

3. Переробка: Перетворює відходи на нові продукти, зменшуючи потребу в первинних ресурсах та знижуючи споживання енергії [17]. Це відводить відходи від звалищ та допомагає створити циркулярну економіку [18].

4. Інші види відновлення (наприклад, енергетичне відновлення): Включає процеси, такі як спалювання, для перетворення відходів на корисне тепло, електроенергію або паливо [17].

5. Утилізація (найменш бажана): Захоронення відходів на звалищах або їх спалювання без енергетичного відновлення, використовується лише тоді, коли немає кращих альтернатив [17].

Принцип «5 R» (Відмова, Зменшення, Перепроекування, Повторне використання та Переробка) додатково розширює цю ієрархію, наголошуючи на

втручаннях на початкових етапах життєвого циклу. Хімічна переробка, хоча й цінна, зазвичай стоїть після механічної переробки в цій ієрархії через її вищі енергетичні вимоги для розщеплення та реполімеризації матеріалів [17].

Захоронення залишається найпоширенішою стратегією утилізації пластикових відходів у всьому світі [10]. У 2016 році у світі було утворено 242 мільйони тонн пластикових відходів, більшість з яких потрапила на звалища або відкриті сміттєзвалища [10].

Оскільки пластик не піддається біологічному розкладу, він зберігається на звалищах сотні, а то й понад 1000 років, вимагаючи все більшої площі землі для утилізації [9]. Контакт пластикових відходів з ґрунтовими водами та розчинними сполуками на звалищах може призвести до утворення токсичного фільтрату, що забруднює навколишній ґрунт та ґрунтові води [10]. Звалища також є значними джерелами викидів метану, потужного парникового газу [9]. Активні та колишні звалища є джерелом мікропластику, який переноситься в навколишнє середовище повітрям та фільтратом [20]. Старіння пластикового сміття на звалищах також призводить до виділення шкідливих летючих органічних сполук через окислювальну фотодеградацію [20]. Мікропластик може діяти як вектори, поглинаючи забруднювачі та вимиваючи пластикові мономері та добавки, що ще більше поширює забруднення [20]. Захоронення на полігонах повсюдно вважається найменш бажаною стратегією через його серйозні екологічні та медичні проблеми [19].

У Європі енергетичне відновлення (переважно спалювання) є найпоширенішим методом утилізації пластикових відходів, за яким слідує переробка [16]. Спалювання пластику, як на відкритому повітрі, так і на спеціалізованих об'єктах, є вкрай проблематичним підходом [14]. Воно виділяє в повітря «коктейль шкідливих забруднювачів», включаючи діоксини, фурані, ртуть та поліхлоровані біфеніли (ПХБ), відомі канцерогени та причини вроджених вад та інших серйозних проблем зі здоров'ям [14]. Навіть сучасні сміттєспалювальні заводи, оснащені передовими системами контролю забруднення, не можуть повністю усунути ці викиди [14]. Спалювання також виробляє значні обсяги парникових газів, таких як вуглекислий газ та метан [10]. Залишки золи можуть забруднювати ґрунт та воду [14].

Спалювання не вирішує кризу пластикових відходів; воно лише перетворює її на іншу форму забруднення [14]. Воно вимагає постійного постачання пластикових відходів, увічнюючи попит на одноразові пластики та підриваючи зусилля щодо скорочення виробництва та споживання [14]. За іронією долі, кампанії проти засмічення можуть ненавмисно призвести до збільшення відкритого спалювання зібраного сміття в регіонах, де відсутня належна інфраструктура утилізації [6]. Хоча спалювання зменшує обсяг відходів та може відновлювати енергію, воно споживає значну енергію та виробляє шкідливі побічні продукти, відволікаючи ресурси від більш сталих рішень [14].

Механічна переробка включає багатостадійні процеси, такі як збір, сортування, очищення, подрібнення та компатибілізація або розділення [21]. Мета полягає в перетворенні пластикових відходів на вторинні матеріали або продукти без значної зміни хімічної структури матеріалу, забезпечуючи збереження полімерних ланцюгів [21].

Незважаючи на свої переваги, лише близько 14% пластикової упаковки збирається для переробки в усьому світі, а загальний світовий показник переробки всіх пластиків залишається вперто низьким – 9% [5]. Навіть у Європі, де переробляється понад 30% пластикових відходів, США значно відстають з 8% [5]. Близько 60% пластикових відходів не переробляються і потрапляють у навколишнє середовище [19].

Механічна переробка, як правило, є економічно ефективною і може значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище порівняно з виробництвом первинного пластику [19]. Вона знижує попит на нову сировину, економить енергію та може створювати робочі місця на національному рівні [19].

Однак, існує так званий «парадокс переробки», який створює ілюзію циркулярності. Механічна переробка, хоча й позиціонується як ключове рішення [19], стикається зі значними труднощами. Пластикові відходи часто змішуються з їжею, рідинами та іншими непластиковими матеріалами, що ускладнює та здорожує переробку [5]. Різноманітність типів пластику (ПЕТ, ПНЦ, ПВХ, ПП тощо), кожен з

яких має відмінні властивості, ускладнює процес переробки, призводячи до забруднення та низької загальної ефективності [5].

Крім того, багатьом регіонам бракує адекватної інфраструктури для переробки, включаючи відповідні потужності для ефективного сортування, обробки та переробки пластику, що призводить до його накопичення на звалищах та в навколишньому середовищі [5]. Обмежений доступ до об'єктів переробки, особливо в сільських та малозабезпечених громадах, ще більше перешкоджає переробці [5]. Висока вартість переробки (робоча сила, обладнання, транспортні витрати) та обмежений ринковий попит на перероблений пластик роблять її економічно складною для переробних підприємств [5]. Якість та ціна перероблених продуктів часто не можуть конкурувати з дешевшим первинним пластиком [16]. Механічна переробка може знижувати молекулярну вагу пластику та спричиняти термомеханічну деградацію, що призводить до зниження механічних властивостей. Це часто призводить до «даунсайклінгу» – виробництва продуктів з нижчими властивостями [21].

Значна відсутність обізнаності громадськості щодо важливості переробки та належних методів утилізації сприяє низьким показникам переробки [5]. Крім того, погане регулювання торгівлі пластиковими відходами на світовому рівні призводить до екологічних та медичних ризиків, часто перекладаючи тягар на країни з меншими можливостями [5]. Усе це створює ситуацію, коли громадська думка та політична увага до переробки створюють ілюзію прогресу, відволікаючи увагу та ресурси від більш фундаментальних рішень, таких як запобігання та скорочення. Існуюча система переробки, особливо для пластику, є значною мірою неефективною, економічно складною та обтяженою проблемами прозорості. Це означає, що покладатися виключно на переробку як основне рішення недостатньо і потенційно контрпродуктивно, що вимагає радикальної переоцінки всього життєвого циклу пластику, з більшим акцентом на розробку продукції для циркулярності на початкових етапах, зменшення попиту та надійні, перевіряються процеси утилізації.

Країни світу перебувають на критичному етапі боротьби з пластиковим забрудненням, маючи різні політики [3]. ЄС вжив заходів для зменшення кількості пластикових відходів, включаючи цілі щодо вмісту вторинної сировини в пластикових

пляшках (25% до 2025 року, 30% до 2030 року) та загального скорочення відходів упаковки (5% до 2030 року, 15% до 2040 року) [16]. Заборони на певні одноразові пластикові вироби (наприклад, ватні палички, столові прилади, соломинки) також діють там, де існують стійкі альтернативи [26]. Схеми розширеної відповідальності виробника (РВВ) та системи депозитного повернення впроваджуються для притягнення виробників до відповідальності та стимулювання повернення споживачами [5].

Однак, незважаючи на ці зусилля, поточні політики значною мірою не відображають або не справляються з масштабами проблеми [28]. Існуючі зобов'язання урядів та промисловості, як очікується, призведуть до скорочення морського пластикового сміття лише на 7% до 2040 року, що значно менше необхідного [28]. Стратегії, що зосереджуються виключно на покращенні управління відходами без стримування їх утворення, навряд чи усунуть витік пластику [3]. Аналогічно, суворі політики лише в розвинених економіках або низька суворість політики в усьому світі матимуть незначний ефект [3].

Це висвітлює критичний розрив між політикою та її впровадженням. Численні політики та нормативні акти приймаються на глобальному та регіональному рівнях [16], проте звіти вказують на їхню неспроможність ефективно вирішити проблему, з мінімальним прогнозованим скороченням витоку пластику [28]. Ключовою причиною є значний дефіцит даних для оцінки ефективності політики через відсутність моніторингу та звітності [28]. Це означає, що проблема полягає не лише в наявності політик, а й у їхньому дизайні, забезпеченні виконання та здатності вимірювати їхній реальний вплив. Відсутність стандартизованих, прозорих даних про ефективність політики створює сліпу зону, що перешкоджає адаптивному управлінню та підзвітності. Це означає, що майбутні політичні рамки повинні з самого початку інтегрувати надійні механізми моніторингу, звітності та перевірки, а також зобов'язання щодо коригування політики на основі фактичних даних, щоб гарантувати, що наміри перетворюються на відчутні екологічні покращення.

Опубліковані показники переробки часто включають експортовані пластикові відходи без зазначення того, чи були вони фактично перероблені в пункті

призначення, що призводить до спотвореного сприйняття глобального управління відходами [28]. Ефективність політики часто гальмується відсутністю інвестицій у необхідну інфраструктуру для переробки та повторного використання [28]. Політики, що нав'язують втручання «зверху вниз» без достатньої громадської підтримки, як правило, вимагають суворого примусу, що може призвести до широкого невдоволення та недотримання [28].

Одноразові пластики є основним джерелом відходів, надаючи перевагу зручності над довговічністю [9]. Незважаючи на інформаційні кампанії⁵, суспільні звички та небажання споживачів використовувати альтернативи²⁹ залишаються значними бар'єрами. Це вказує на так звану «пастку зручності», де глибоко вкорінені суспільні моделі поведінки та промислові моделі (зумовлені дешевим виробництвом та споживчим попитом на зручність) створюють значну інерцію щодо змін. Проблема не є суто технологічною чи регуляторною; вона є соціокультурною. Це означає, що інноваційні рішення повинні бути не лише технологічно життєздатними та економічно конкурентоспроможними, але й стратегічно розробленими для подолання поведінкових бар'єрів, вимагаючи широкої громадської освіти, стимулювання та створення доступних, зручних альтернатив, які безперешкодно інтегруються в повсякденне життя.

Пластикове забруднення є транскордонною проблемою, що вимагає глобального договору щодо пластику для амбітного скорочення виробництва пластику, поступової відмови від шкідливих субсидій, усунення проблемних продуктів та хімічних речовин, а також прийняття сильних національних планів та суворих механізмів звітності та дотримання [2]. Практика перевезення пластику після споживання до КНСД під виглядом переробки посилює виклики в цих країнах [6]. ЄС затвердив суворіші вимоги до перевезення відходів, забороняючи експорт пластикових відходів до країн, що не входять до ОЕСР.¹

3.3 Принципи оцінки екологічних ризиків

Екологічна оцінка ризиків (ERA) — це систематичний процес, спрямований на виявлення, оцінку та пом'якшення потенційних негативних впливів на навколишнє середовище. Вона передбачає розпізнавання "екологічних аспектів" (елементів діяльності, продуктів або послуг організації, які взаємодіють з навколишнім середовищем) та оцінку їх потенційних екологічних впливів.

Вирішальним інструментом у ERA є Концептуальна модель об'єкта (CSM), яка візуально та наративно описує потенційні джерела забруднювачів, механізми їх вивільнення, шляхи долі та транспорту через різні компоненти навколишнього середовища (повітря, вода, ґрунт), рецептори (наприклад, люди, дика природа, екосистеми), які можуть бути піддані впливу, та конкретні шляхи впливу. Визначення небезпеки, як частина ERA, передбачає систематичне розпізнавання та документування цих елементів та їх потенційних взаємодій з навколишнім середовищем.

Інтеграція з ISO 31000 для управління ризиками: Хоча ISO 14001 (Системи екологічного менеджменту) надає основу для управління екологічними аспектами, ISO 31000 (Управління ризиками) пропонує ширші принципи, основу та процес для систематичного та економічно ефективного управління ризиками, що застосовується до будь-якого типу ризику, включаючи екологічні ризики. ISO 31000 наголошує на важливості зобов'язань керівництва (наприклад, офіційна політика, розподіл ресурсів), розробки програми управління ризиками, яка сумісна з культурою організації, та встановлення циклу регулярного моніторингу та перегляду. Процес управління ризиками, як визначено ISO 31000, є ітеративним і включає: встановлення контексту (визначення обсягу оцінки ризиків), ідентифікацію ризиків, аналіз ризиків (оцінка ймовірності та наслідків) та оцінку ризиків (порівняння виявлених ризиків із встановленими критеріями). Активна комунікація та консультації з усіма зацікавленими сторонами є невід'ємною частиною цього процесу.

Хоча LCA надає кількісні дані про екологічні впливи, ERA, особливо при інтеграції з рамковою програмою ISO 31000, перетворює ці наукові вимірювання на

дієві стратегії управління. Цей перехід від "який вплив?" до "як ми управляємо ризиком?" є вирішальним для практичного впровадження. ISO 31000, зосереджуючись на ідентифікації джерел, шляхів, рецепторів, а потім на аналізі ймовірності та наслідків, забезпечує структурований підхід до пріоритезації та вирішення найзначніших екологічних загроз у контексті організації. Він гарантує, що наукові висновки з LCA не є лише академічними, а вбудовані в цикл безперервного вдосконалення, який враховує регуляторні вимоги, занепокоєння зацікавлених сторін та організаційні цілі. Рамкова програма ISO 31000, хоча й не надає конкретних формул для екологічних впливів, керує застосуванням та інтерпретацією кількісних результатів оцінки ризиків (таких як ті, що отримані з LCA). Вона служить оперативним планом для інтеграції екологічних даних у комплексну систему управління ризиками, що дозволяє організаціям пріоритезувати, моніторити та постійно покращувати свої екологічні показники, пов'язані з переробкою пластику. Це особливо актуально для складних промислових операцій, таких як підприємства з переробки пластику, які повинні управляти різноманітними ризиками, пов'язаними з повітрям, водою та ґрунтом, а також здоров'ям працівників.

3.4 Екологічні ризики

Цей розділ містить конкретні приклади формул та методологій, що використовуються для кількісної оцінки екологічних ризиків, пов'язаних з переробкою пластикових відходів. Ці розрахунки часто інтегруються в ширші дослідження оцінки життєвого циклу (LCA) або детальні екологічні оцінки ризиків.

Викиди парникових газів (ПГ)

Коефіцієнт зменшення викидів від переробки (RERF) – цей метод кількісно визначає матеріально-специфічні переваги зменшення викидів парникових газів (ПГ), досягнуті шляхом переробки матеріалу порівняно з його виробництвом з первинних ресурсів. Він використовує підхід життєвого циклу, який враховує уникнені викиди від виробництва з використанням вторинної сировини, використання сировини,

транспортування та ефективність переробки:

$$\text{RERF} = ((\text{MS_virgin} - \text{MS_recycled}) + \text{FCS} - \text{T_remanufacture}) \text{R_use}, \quad (3.1)$$

де RERF (Recycling Emission Reduction Factor) – відображає чисте зменшення викидів ПГ (у т еквівалента CO₂ на тонну матеріалу, МТСО₂Е/тонну матеріалу), досягнуте переробкою.

MS_virgin (Manufacturing Emissions - Virgin): Викиди ПГ, пов'язані з виробництвом матеріалу з використанням 100% первинної сировини (МТСО₂Е/тонну матеріалу). Це включає викиди від видобутку сировини (наприклад, видобуток корисних копалин, буріння для викопного палива), обробки та транспортування.

MS_recycled (Manufacturing Emissions - Recycled): Викиди ПГ, пов'язані з виробництвом матеріалу з використанням 100% переробленої сировини (МТСО₂Е/тонну матеріалу). Це включає викиди від збору, сортування та обробки перероблених матеріалів.⁸¹

FCS (Forest Carbon Sequestration): Переваги поглинання вуглецю лісами, які не були б вирубані завдяки використанню перероблених матеріалів (МТСО₂Е/тонну матеріалу). Цей фактор застосовується лише до органічних матеріалів на основі деревини і не застосовується для пластмас.

T_remanufacture (Transportation Emissions - Remanufacture): Викиди ПГ, пов'язані з транспортуванням відновленого переробленого матеріалу до місця його повторного виробництва (МТСО₂Е/тонну матеріалу).

R_use (Recycling Efficiency): Частка матеріалу, який успішно перероблений у новий продукт з тонни зібраного переробленого матеріалу. Цей фактор враховує неефективність збору та обробки матеріалів.

Прикладні значення для пластмас (за даними ARB):

HDPE (поліетилен високої щільності) – RERF = 0,8 МТСО₂/тонну. Це впливає з викидів при первинному виробництві ~1,4 МТСО₂/тонну, викидів при переробленому виробництві ~0,37 МТСО₂/тонну та ефективності переробки 0,77.

PET (поліетилентерефталат): RERF = 1,4 МТСО₂/тонну. Це базується на

викидах при первинному виробництві $\sim 2,0$ МТСО₂/тонну, викидах при переробленому виробництві $\sim 0,37$ МТСО₂/тонну та ефективності переробки 0,77.

Змішані пластмаси: Для типової суміші (наприклад, 71% ПЕТ та 29% ПНЦП), RERF становить приблизно 1,2 МТСО₂/тонну.

Викиди СО₂ від обробки відходів (Метод Протоколу ПГ): Цей метод розраховує прямі викиди СО₂, що утворюються внаслідок операцій з обробки відходів, особливо коли ними керують треті сторони (наприклад, підприємства з переробки). Він зосереджений на викидах від самої діяльності з управління відходами:

Викиди СО₂ = \sum (кількість_відходів (тонн або м³) \times коефіцієнт_викидів (кг СО₂е/тонну або м³))
де *викиди СО₂* – Загальні викиди еквівалента СО₂ від процесу обробки відходів.

кількість_відходів – Кількість конкретного типу відходів, що піддається певній обробці (наприклад, тонни пластику, відправленого на переробку).

коефіцієнт_викидів – Конкретний коефіцієнт викидів для цього типу відходів та методу обробки (наприклад, кг СО₂ на тонну переробленого пластику).

Якщо підприємство відправляє 4000 тонн пластику на переробку, а коефіцієнт викидів для переробленого пластику становить 10 кг СО₂/тонну (що включає викиди від вилучення матеріалу під час підготовки до переробки), то прямі викиди від цієї діяльності з переробки становитимуть:

$$4000 \text{ тонн} \times 10 \text{ кг СО}_2/\text{тонну} = 40\,000 \text{ кг СО}_2.$$

Протокол ПГ наголошує, що викиди від вилучення матеріалу під час підготовки до переробки зазвичай включаються до коефіцієнта викидів для переробленого матеріалу.

Формула RERF ARB та формула викидів від обробки відходів Протоколу ПГ служать різним, але взаємодоповнюючим цілям. RERF кількісно визначає уникнені викиди за рахунок використання перероблених матеріалів, надаючи чіткий показник кліматичної вигоди від вибору переробленого вмісту замість первинного. Навпаки, метод Протоколу ПГ зосереджується на прямих викидах, що утворюються внаслідок

самого процесу переробки. Обидва є вирішальними для всебічного розуміння кліматичного впливу.

Таблиця 3.2 – Порівняльні викиди парникових газів для різних варіантів управління пластиковими відходами

Тип процесу	Викиди ПГ (кг CO ₂ e/тонну пластику)	Опис / Примітки
Виробництво первинного пластику		
ПНЦП (первинний)	~1400	Включає видобуток, обробку, транспортування
ПЕТ (первинний)	~2000	Включає видобуток, обробку, транспортування
Переробка пластику		
Механічна переробка ПНЦП	0.8 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом
Механічна переробка ПЕТ	1.4 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом
Механічна переробка змішаних пластмас	1.2 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом (для суміші 71% ПЕТ, 29% ПНЦП)
Хімічна переробка (піроліз) змішаних відходів	739	Прямі викиди від процесу (для 1 тонни змішаних відходів)
Хімічна переробка (піроліз) для 1 тонни ПНЦП	28% нижче до 30% вище, ніж викопне дизельне паливо	Залежить від потужності заводу та методів розподілу побічних продуктів
Утилізація відходів		
Спалювання 1 тонни змішаних пластикових відходів	1777	Прямі викиди від процесу
Захоронення на полігонах (для 1 тонни пластику)	40	Коефіцієнт викидів

Розрізнення є життєво важливим для точного корпоративного обліку ПГ, де уникнені викиди звітуються окремо від прямих операційних викидів, щоб запобігти подвійному підрахунку. Позитивні значення RERF для поширених пластмас, таких як ПНЦП та ПЕТ, кількісно демонструють, що механічна переробка цих матеріалів забезпечує значне зменшення викидів ПГ порівняно з первинним виробництвом. Це надає сильний, підтверджений даними аргумент на користь їх переробки. Однак цю перевагу необхідно збалансувати з прямими викидами від процесу переробки та енергоємністю певних методів хімічної переробки, які в деяких сценаріях можуть зробити їхній чистий вплив на ПГ менш сприятливим, ніж механічна переробка або навіть первинне виробництво. Для політиків та промисловості ці формули дозволяють кількісно порівнювати кліматичний вплив різних стратегій управління пластиковими відходами. Це підтримує прийняття обґрунтованих рішень, висвітлюючи екологічні компроміси та визначаючи, які шляхи переробки пропонують найбільші чисті кліматичні переваги, тим самим спрямовуючи інвестиції та політичні стимули до справді низьковуглецевих циркулярних рішень.

Оцінка енергетичного сліду технологій переробки пластику є складною, оскільки вона включає не лише пряме споживання енергії під час процесу, а й енергію, вбудовану в сировину, а також енергію, заощаджену за рахунок уникнення виробництва первинних матеріалів. Хоча механічна переробка, як правило, є менш енергоємною, ніж хімічна, остання може обробляти складніші відходи, які інакше були б спалені або захоронені. Це створює компроміс, який вимагає ретельного аналізу за допомогою LCA, щоб визначити, яка технологія забезпечує найбільшу чисту економію енергії в масштабах системи. Розуміння цих компромісів є критично важливим для керівництва інвестиціями в інфраструктуру переробки та розробки політики, що сприяє найбільш енергоефективним та екологічно відповідальним рішенням.

Забруднення повітря (мікро/нанопластик, леткі органічні сполуки (ЛОС), діоксини/фурани)

Кількісна оцінка вивільнення мікропластику (МП) та нанопластику (НП) під час

процесів переробки пластику є складним завданням через їх малий розмір та різноманітні джерела. Дослідження показали, що механічні процеси, такі як подрібнення, промивання та екструзія, можуть генерувати значні кількості МП та НП [28].

Методології кількісної оцінки включають:

- Прямі вимірювання: використання пристроїв, таких як NanoScan SMPS (для частинок розміром 10–420 нм) та OPS (для частинок розміром 0,3–10 мкм), підключених до джерела викидів (наприклад, подрібнювача), для вимірювання концентрації частинок.
- Збір зразків на фільтри: збір частинок на фільтри (наприклад, полікарбонатні, ПВХ) за допомогою повітряних насосів, з подальшим аналізом за допомогою мікроскопії (SEM, TEM) та елементарного аналізу (SEM/EDS).
- Масова концентрація: розрахунок масової концентрації (мг/м^3) шляхом зважування фільтрів до та після відбору проб, хоча для дуже низької маси великої кількості частинок МП/НП це може бути не кількісним. Проблема вивільнення мікро- та нанопластику під час механічної переробки є значною, оскільки ці частинки можуть легко поширюватися в повітрі та осідати в навколишньому середовищі, що становить ризик для здоров'я людини та екосистем.
- Коефіцієнти викидів летких органічних сполук (ЛОС): викиди ЛОС з розплавлених пластикових гранул, як первинних, так і відходів, можуть бути значними, особливо при високих температурах. ЛОС можуть утворюватися внаслідок деградації полімерів, а також з пластикових добавок та забруднювачів, присутніх у відходах пластику.

Методологія кількісної оцінки ЛОС включає:

- Лабораторні експерименти: нагрівання пластикових гранул у печах при різних температурах (наприклад, 150, 200, 250 °C) та в різних атмосферах (повітря, азот).

- Збір ЛОС: збір ЛОС з вихідного газу за допомогою адсорбційних трубок (наприклад, Tenax/Carboxen).
- Аналіз: аналіз зібраних ЛОС за допомогою термічної десорбції-газової хроматографії/мас-спектрометрії (TD-GC/MS).
- Кількісна оцінка: перетворення всіх піків у хроматограмі на еквівалентні кількості толуолу (наприклад, мкг/г пластику). Наприклад, загальні ЛОС (ТЛОС), що виділяються з ПНЦП при 150, 200 та 250 °С, становили $40 \pm 1,2$, 121 ± 47 та 902 ± 69 мкг/г відповідно.

Хоча конкретні "коефіцієнти викидів" у стандартизованому сенсі (наприклад, маса ЛОС на одиницю маси переробленого пластику) часто не надаються, кількісні дані про обсяги викидів ЛОС є доступними і вказують на потенційні ризики для якості повітря та здоров'я працівників.

Діоксини та фурани є високотоксичними побічними продуктами, що утворюються під час спалювання хлорованих матеріалів, включаючи пластик, а також під час певних хімічних процесів. Хоча піроліз та газифікація пластику зазвичай проводяться за відсутності або обмеженої кількості кисню, що зменшує утворення діоксинів, їхня присутність у сировині (наприклад, ПВХ) може призвести до утворення цих сполук.

Методологія оцінки:

- Вимірювання: визначення концентрації діоксинів та фуранів у вихідних газах за допомогою високоефективної газової хроматографії-мас-спектрометрії високої роздільної здатності (HRGC-HRMS) з використанням внутрішніх стандартів.
- Коефіцієнт токсичної еквівалентності (TEF): для оцінки ризиків, пов'язаних зі складними сумішами діоксинів/фуранів, використовується метод TEF. Цей метод пов'язує токсичність 210 структурно подібних забруднювачів (135 CDF та 75 CDD) з токсичністю 2,3,7,8-TCDD, найбільш вивченого діоксину. Результати виражаються в токсичних еквівалентах (TEQ).

Дослідження показують, що утворення діоксинів значно зменшується при температурах вище 800 °С у поєднанні зі швидким охолодженням газу та відсутністю

кисню. Однак, загалом, хімічна переробка може вивільняти токсичні хімікати, включаючи діоксини, у повітря, воду та тверді відходи.

Проблема невидимих забруднювачів, таких як мікро- та нанопластик, ЛОС та діоксини/фурани, є одним з найскладніших аспектів оцінки ризиків переробки пластику. Хоча їхнє існування підтверджено, точна кількісна оцінка їхнього вивільнення та впливу залишається викликом через відсутність стандартизованих методів вимірювання та складність їхнього хімічного складу. Це означає, що поточні оцінки можуть недооцінювати повний екологічний вплив, і необхідні подальші дослідження та розробка надійних методологій для всебічного моніторингу та пом'якшення цих викидів.

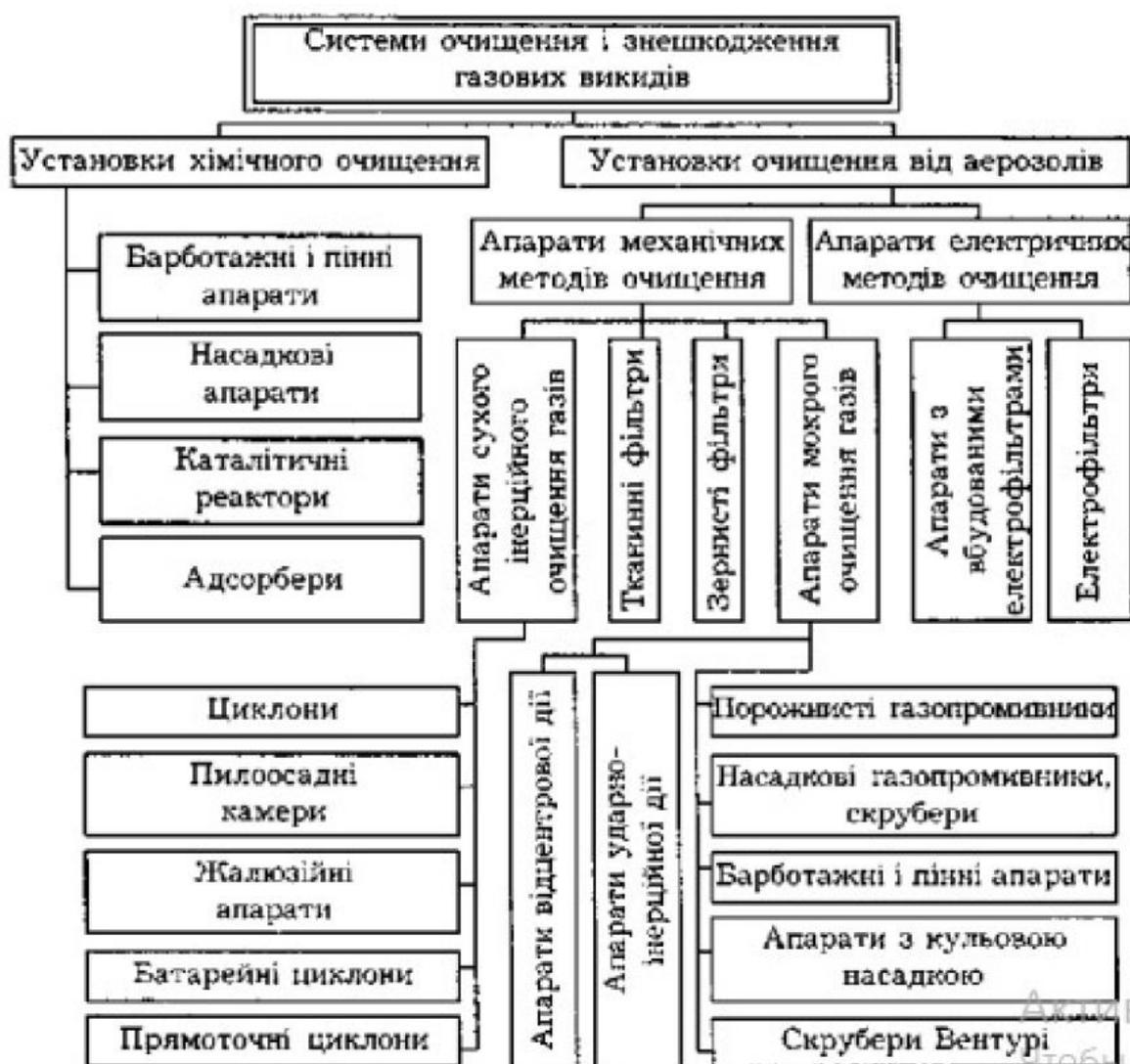


Рисунок 3.2 – Орієнтовна класифікація систем очищення і знешкодження газових викидів

Метод адсорбції є ефективним засобом очищення повітря від різних забруднюючих речовин, органічних сполук та неприємних запахів.

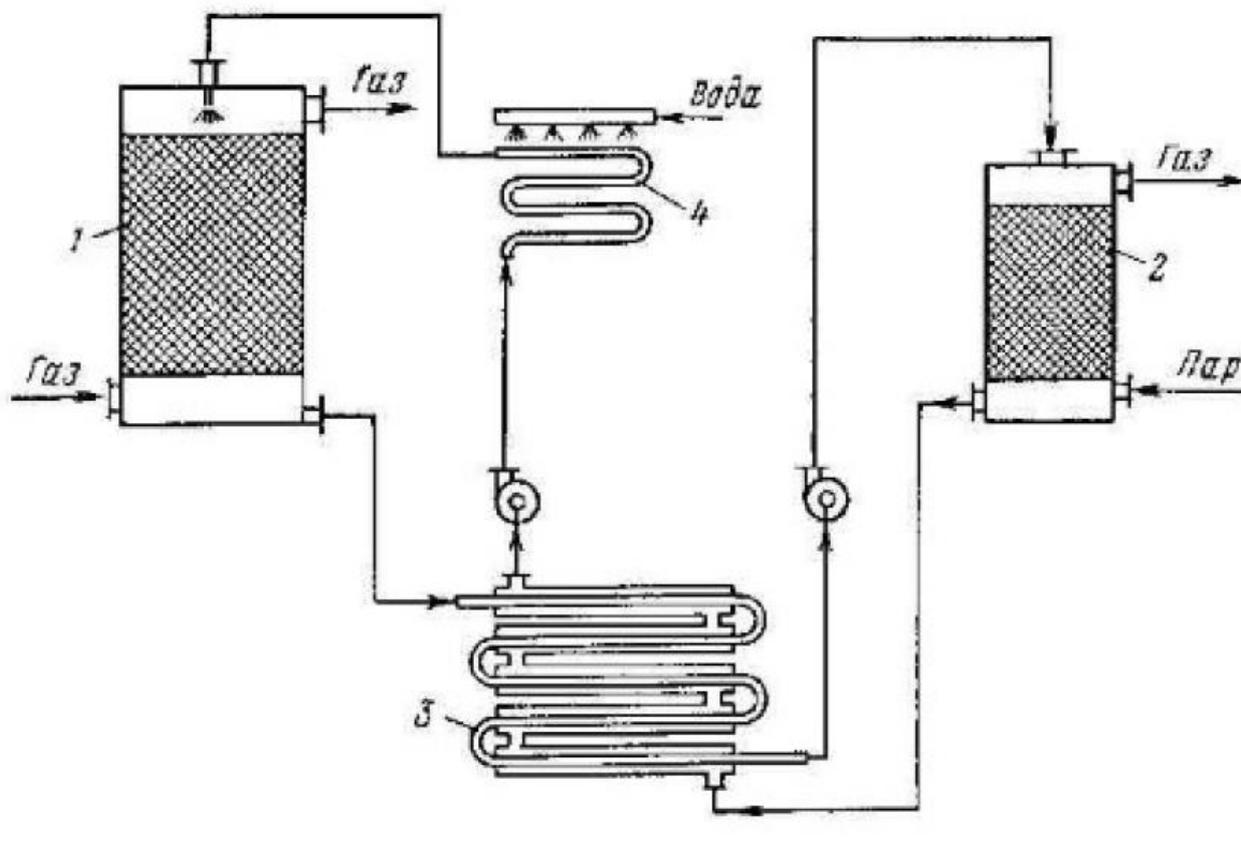


Рисунок 3.3 – Приклад адсорбційної установки:

1 – фільтр; 2, 3 – адсорбери; 4 – конденсатор; 5 – сепаратор

Забруднення води (стічні води, фільтрат, важкі метали)

Процеси переробки пластику, особливо етап промивання, є водосмними. Стічні води, що утворюються, можуть містити різні забруднювачі, включаючи частинки пластику (включаючи мікропластик), залишкові хімікати з пластмас, миючі засоби, барвники та добавки.

Розрахунок обсягу скидів стічних вод промислових об'єктів, таких як підприємства з переробки пластику, включає кілька етапів:

- Вимірювання вхідних стічних вод: Використання витратомірів для точного вимірювання кількості стічних вод, що надходять на об'єкт.
- Віднімання повторно використаних або перероблених стічних вод: Вимірювання та віднімання будь-яких стічних вод, що повторно

використовуються або переробляються на об'єкті.

- Віднімання джерел, що не є стічними водами: Віднімання таких джерел, як дощова вода або ґрунтові води, які можуть змішуватися зі стічними водами.
- Розрахунок обсягу скиду: Кінцевий обсяг скиду розраховується шляхом віднімання сум з кроків 2 і 3 від обсягу вхідних стічних вод, виміряного в кроці 1.

Належне очищення стічних вод є критично важливою для запобігання забрудненню водних екосистем та ризикам для здоров'я людини.



Рисунок 3.4 – Схема очищення стічних вод

Вилуговування важких металів

Пластикові відходи можуть містити важкі метали (наприклад, свинець (Pb), кадмій (Cd), хром (Cr), ртуть (Hg), цинк (Zn)), які можуть вилуговуватися у навколишнє середовище, особливо з фільтрату полігонів або з твердих залишків після термічної обробки, такої як піроліз. Наприклад, піролізний кокс може вилуговувати важкі метали, хоча його можна активувати для покращення адсорбційних властивостей та видалення забруднювачів.

Методи кількісної оцінки важких металів у пластику та його побічних продуктах включають:

- Рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF): швидкий метод для кількісного та якісного аналізу елементного складу.
- Мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS) або оптична емісійна спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES): використовуються для аналізу мікроелементів, таких як Pb, Cd, Cr, Hg, Ni.
- Мікрохвильова кислотна деструкція (MW-AD): метод підготовки зразків для повного розкладання полімерних матриць перед аналізом металів.

Витік важких металів у водні екосистеми становить значну загрозу для якості питної води та здоров'я людини, спричиняючи різноманітні несприятливі наслідки.

Управління рідкими скидами та шляхами забруднення є критично важливим аспектом екологічної оцінки ризиків переробки пластику. Стічні води та фільтрат з полігонів є складними сумішами, що вимагають ретельного моніторингу та очищення, щоб запобігти поширенню токсичних хімікатів, важких металів та мікропластику в водні системи. Недостатня обробка може призвести до значних екологічних та медичних ризиків, підкреслюючи необхідність надійних систем управління стічними водами та фільтратом.

Забруднення ґрунту (мікропластик, фільтрат, важкі метали)

Моделі оцінки ризику забруднення ґрунту

Оцінка ризику забруднення ґрунту є важливою для розуміння потенційного впливу пластикових відходів та їхніх побічних продуктів на наземні екосистеми та здоров'я людини. Цей процес включає:

- Концептуальна модель об'єкта (CSM): описує джерела забруднювачів, механізми вивільнення, шляхи транспорту та долі, уражені компоненти навколишнього середовища (ґрунт), рецептори та шляхи впливу.
- Оцінка впливу: визначення шляхів, якими забруднювачі ґрунту можуть потрапити до рецептора (наприклад, пряме споживання ґрунту, шкірний контакт, споживання забрудненої їжі).
- Оцінка токсичності: визначення токсикологічних даних для кожного

забруднювача, включаючи хронічні оральні референтні дози (RfD) для неканцерогенних ефектів та фактори канцерогенного нахилу (CSF) для канцерогенних ефектів.

- Характеристика ризику: узагальнення та поєднання результатів оцінки впливу та токсичності для кількісного та якісного вираження ризику.

Забруднення ґрунту мікропластиком, вилуговування токсичних хімікатів з пластикових відходів та важкі метали з фільтрату полігонів є значними джерелами ризику для наземних екосистем та здоров'я людини [8]. Мікропластик може переносити забруднювачі та накопичуватися в харчових ланцюгах, а токсичні хімікати можуть вилуговуватися в ґрунт та ґрунтові води [8]. Оцінка цих впливів вимагає розуміння шляхів впливу та біодоступності забруднювачів у ґрунті.

Вплив на наземні екосистеми та шляхи перенесення забруднювачів через ґрунт є складною проблемою, що вимагає детального аналізу. Мікропластик та хімічні речовини, що вилуговуються з пластикових відходів, можуть накопичуватися в ґрунті, впливаючи на його родючість, мікробні спільноти та потенційно потрапляючи в харчовий ланцюг [34]. Використання моделей оцінки ризиків, таких як Hazard Quotient (HQ) та Cancer Risk (CR), дозволяє кількісно оцінити ці загрози для здоров'я людини та екологічних систем. Однак, точність цих оцінок залежить від якості даних про концентрації забруднювачів, шляхи впливу та токсикологічні властивості речовин, що підкреслює необхідність подальших досліджень та стандартизованих методів.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ПІДПРИЄМСТВА З ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

4.1 Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти

Лабораторія екологічної інспекції у Вінницькій області проводить дослідження на підприємстві і податковий кодекс України передбачає здійснення плати екологічного податку.

Екологічний податок – загальнодержавний обов'язковий платіж, що справляється з фактичних обсягів викидів у атмосферне повітря, скидів у водні об'єкти забруднюючих речовин, розміщення відходів, фактичного обсягу радіоактивних відходів, що тимчасово зберігаються їх виробниками, фактичного обсягу утворених радіоактивних відходів та з фактичного обсягу радіоактивних відходів, накопичених до 1 квітня 2009 року.

Платниками податку є суб'єкти господарювання, юридичні особи, що не провадять господарську (підприємницьку) діяльність, бюджетні установи, громадські та інші підприємства, установи та організації, постійні представництва нерезидентів, включаючи тих, які виконують агентські (представницькі) функції стосовно таких нерезидентів або їх засновників, під час провадження діяльності яких на території України і в межах її континентального шельфу та виключної (морської) економічної зони здійснюються:

- викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення;
- скиди забруднюючих речовин безпосередньо у водні об'єкти;
- розміщення відходів у спеціально відведених для цього місцях чи на об'єктах, крім розміщення окремих видів відходів як вторинної сировини;
- утворення радіоактивних відходів (включаючи вже накопичені);
- тимчасове зберігання радіоактивних відходів їх виробниками понад установлені особливими умовами ліцензії строк.

Для окремих забруднюючих речовин встановлена ставка податку. Для забруднюючих речовин, що не увійшли до цього переліку, але на які встановлено гранично допустиму концентрацію або орієнтовно безпечний рівень впливу, ставка податку визначається залежно від цього впливу.

За скиди забруднюючих речовин у ставки та озера ставки податку для визначених окремих забруднюючих речовин та для тих, на які встановлено гранично допустиму концентрацію або орієнтовно безпечний рівень впливу, збільшуються у 1,5 рази.

Суми податку, який справляється за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти (Пс), обчислюються платниками самостійно виходячи з фактичних обсягів скидів, ставок податку та коригуючих коефіцієнтів за формулою:

$$P_c = \sum_{i=1}^n (M_{L_i} \cdot N_{P_i} \cdot K_{oc}), \quad (4.1)$$

де M_{L_i} – обсяг скиду i -тої забруднюючої речовини в тоннах (т);

N_{P_i} – ставки податку в поточному році за тону i -того виду забруднюючої речовини у гривнях з копійками;

K_{oc} – коефіцієнт, що дорівнює 1,5 і застосовується у разі скидання забруднюючих речовин у ставки і озера (в іншому випадку коефіцієнт дорівнює 1).

Проведемо розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти при відсутності природоохоронних заходів для очищення стічних вод (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти

Назва забрудн. речовини	Скиди без викор. очищ. т/рік	Ставка податку за т/рік, грн	Плата за скиди (без викорис. очищ.) грн
Органічні речовини (за показниками БСК 5)	58,5	5156,8	301672,8
Завислі речовини	304,2	369,52	112408,0
Нафтопродукти	8,9	75792,4	674552,4
Сульфати	52,4	369,52	19362,8
Фосфати	22,5	10297,4	231692,4
Хлориди	1,4	369,52	517,3
Всього			1340205,7

Оскільки річний валовий об'єм скидів у водні об'єкти надзвичайно великий, то пропонується використати обладнання для очищення стічних вод.

Проведемо розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти у випадку застосування природоохоронних заходів для очищення стічних вод (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти у випадку застосування природоохоронних заходів

Назва забрудн. речовини	Скиди після викор. очищ. т/рік	Ставка податку за т/рік, грн	Плата за скиди (з викор. очищ.) грн
Органічні речовини (за показниками БСК 5)	19,89	5156,8	102568,8
Завислі речовини	103,428	369,52	38218,7
Нафтопродукти	3,026	75792,4	229347,8
Сульфати	17,816	369,52	6583,4
Фосфати	7,65	10297,4	78775,4
Хлориди	0,476	369,52	175,9
Всього			455669,9

Зменшення плати за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти від впровадження обладнання очищення стічних вод розраховується за формулою:

$$\Delta P_C = P_{C1} - P_{C2} , \quad (4.2)$$

де P_{C1} – плата за скиди без використання очищення (1340205,7 грн./рік);

P_{C2} – плата за скиди з використанням обладнання очищення стічних вод (455669,9 грн./рік);

$$\Delta P_C = 1340205,7 - 455669,9 = 884535,8 \text{ (грн.)}$$

4.2 Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти

Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти шляхом встановлення обладнання очищення стічних вод можна здійснити у такому порядку.

Основна заробітна плата найманих робітників, що здійснюють встановлення обладнання для очищення стічних вод та проведення налагоджувальних робіт розраховується за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн.)}, \quad (4.3)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного робітника, грн.;

T_p – число робочих днів в місяці;

t – число робочих днів роботи робітників.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основна заробітна плата робітників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн..	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	19200	873	10	8727
2. Інженер	17400	791	7	5536
3. Монтажник	16000	727	7	5091
4. Налагоджувальник	17900	814	5	4068
Разом :				23423

Додаткова заробітна плата розробників Z_d , які приймали участь в розробці нового програмного продукту.

Ця додаткова заробітна плата розраховується як 12% від основної заробітної плати робітників:

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\%; \quad (4.4)$$

$$Z_d = 23423 \cdot 12 / 100 \% = 2811 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату $H_{зп}$ робітників, що здійснюють встановлення обладнання для очищення стічних вод та проведення налагоджувальних робіт:

$$H_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.5)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – загальна величина нарахувань, %.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$H_{зп} = (23423 + 2811) \cdot 22 \% / 100\% = 5771 \text{ (грн.)}$$

Витрати на придбання нового обладнання, його монтаж та налагодження можна розрахувати за формулою:

$$O_o = \sum_1^n C_i \cdot N_i \cdot K_i, \quad (4.6)$$

де n – кількість видів обладнання;

C_i – ціна придбання обладнання даного виду, марки, грн.;

N_i – кількість однотипного виду обладнання, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження обладнання тощо.

Проведені розрахунки зводимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на придбання обладнання

Найменування обладнання	Ціна, тис.грн.	Кількість	Витрати на монтаж та налагодження, тис.грн.	Витрати з урах. монтажу і налагод. тис.грн.
Установка фізико-хімічного очищення стічних вод	600	1	20	620
Разом				620

Витрати на придбання приміщень для облаштування нового обладнання розраховуємо за формулою:

$$O_{np} = u_{np} \cdot S_{np} , \quad (4.7)$$

де u_{np} – вартість придбання 1 кв.м. виробничої площі, $u_{np} = 20000$ грн./кв.м.;

S_{np} – виробнича площа, необхідна для облаштування нового обладнання, 30 кв.м.

$$O_{np} = 20000 \cdot 30 = 600000 \text{ (грн.)}$$

Інші витрати ІВ охоплюють: загально виробничі витрати, адміністративні витрати тощо. Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати робітників.

Величина інших витрат складе:

$$ІВ = Z_0 \cdot 200 / 100 = 23423 \cdot 200 / 100 = 46846 \text{ (грн.)} \quad (4.8)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає капітальні витрати на проведення природоохоронних заходів зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти:

$$K = Z_0 + Z_d + H_{3П} + O_6 + O_{np} + ІВ, \quad (4.9)$$

$$K = 23423 + 2811 + 5771 + 620000 + 600000 + 46846 = 1298851 \text{ (грн.)}$$

4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод

Заробітна плата обслуговуючого персоналу $Z_{обс}$, що розраховується за формулою:

$$Z_{обс} = 12 \cdot N \cdot M \cdot \beta \text{ (грн./рік)}, \quad (4.10)$$

де 12 – число місяців;

N – число робітників, що обслуговують обладнання очищення стічних вод;

M – місячний посадовий оклад працівника, грн.; в 2025 році величини посадових окладів коливаються в межах 16000–17500 грн.;

β – частка часу, який витрачає працівник на обслуговування очищення стічних вод, в загальному часі своєї роботи.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу становить:

$$Z_{обс} = 12 \cdot 4 \cdot 16000 \cdot 0,3 = 230400 \text{ (грн./рік)}.$$

Додаткова заробітна плата Z_o , яка визначається як 10...12% від основної заробітної плати обслуговуючого персоналу $Z_{обс}$ і становить:

$$Z_o = Z_{обс} \cdot 12 / 100\%; \quad (4.11)$$

$$Z_o = 0,12 \cdot 230400 = 27648 \text{ (грн./рік)}.$$

Нарахування на заробітну плату обслуговуючого персоналу НЗП, які визначаються як 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати обслуговуючого персоналу, тобто:

$$H_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.12)$$

$$H_{зп} = (230400 + 27648) \cdot 0,22 = 56771 \text{ (грн./рік)}.$$

Витрати на силову електроенергію при живленні обладнання від електромережі розраховуються за формулою:

$$V_e = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n, \quad (4.13)$$

де V – вартість 1 кВт-години електроенергії. $V = 6,9$ грн./кВт –год.;

P – встановлена потужність обладнання, кВт (5 кВт);

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання за рік, (8760 год.);

K_n – коефіцієнт використання потужності, $K_n = 0,8$.

$$V_e = 6,9 \cdot 5 \cdot 8760 \cdot 0,8 = 241776 \text{ (грн)}.$$

Амортизаційні відрахування для обладнання очищення стічних вод визначаємо за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100}, \text{ грн./рік.} \quad (4.14)$$

де $Ц$ – балансова вартість обладнання, грн.;

На – річна норма амортизації обладнання (15%).

$$A = \frac{600 \cdot 15}{100} = 90 \text{ (тис.грн/рік)}.$$

Інші витрати ІВ, які приймаємо як 5...10% від загальної суми усіх попередніх витрат і становлять:

$$IB = 0,05 \dots 0,1 (Z_{обс} + Z_{\delta} + H_{зп} + B_e + A) , \quad (4.15)$$

$$IB = 0,1 \cdot (230400 + 27648 + 56771 + 241776 + 90000) = 64659 \text{ (грн/рік)}.$$

Сума витрат за всіма попередніми статтями дає величину експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод:

$$E = Z_{обс} + Z_{\delta} + H_{зп} + B_e + A + IB , \quad (4.16)$$

$$E = 230400 + 27648 + 56771 + 241776 + 90000 + 64659 = 711254 \text{ (грн/рік)}.$$

4.4 Визначення економічного ефекту та терміну окупності під час використання обладнання очищення стічних вод

При використанні природоохоронних технологій скиди шкідливих речовин у водні об'єкти суттєво зменшаться, що дозволить отримати зменшення плати податку за скиди .

Економічний ефект від впровадження обладнання очищення стічних вод розраховується за формулою:

$$\Delta E = \Delta \Pi_C - E , \quad (4.17)$$

де $\Delta \Pi_C$ – зменшення плати за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти (884535,8 грн./рік);

E – експлуатаційні витрати обладнання очищення стічних вод (711254 грн/рік).

$$\Delta E = 884535,8 - 711254 = 173281,8 \text{ (грн)}.$$

4.5 Розрахунок терміну окупності витрат під час використання обладнання очищення стічних вод

Термін окупності T_o витрат під час використання обладнання очищення стічних вод розраховуються за формулою:

$$T_o = \frac{B}{\Delta E}, \quad (4.18)$$

де B – загальні витрати на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів шкідливих речовин у водні об'єкти.

$$B = E + E_H \cdot K, \quad (4.19)$$

де E – експлуатаційні витрати;

E_H – нормативний коефіцієнт капітальних витрат (0,1);

K – капітальні витрати

$$B = 711254 + 0,1 \cdot 1298851 = 841139,1 \text{ (грн.)},$$

$$T_o = \frac{841139,1}{173281,8} = 4,9 \text{ (років)},$$

Оскільки термін окупності проекту складає 4,9 років, тому можна стверджувати, що він є економічно ефективним.

Проаналізувавши отримані значення можна зробити висновок, що впровадження сучасної установки фізико-хімічного очищення стічних вод на підприємстві дасть економічний ефект в розмірі 173,3 тис.грн. за рахунок суттєвого зменшення скидів у водні об'єкти і відповідного зменшення суми податку за скиди.

ВИСНОВКИ

Комплексний аналіз екологічних ризиків, пов'язаних з переробкою пластикових відходів, виявляє складну та багатогранну проблему, яка вимагає цілісного підходу. Хоча переробка пластику є важливим компонентом переходу до циркулярної економіки, вона не є універсальним рішенням. Механічна переробка, хоча й економічно ефективна та сприяє значному зменшенню викидів парникових газів порівняно з виробництвом первинного пластику, стикається з проблемами забруднення, даунсайклінгу та значного утворення мікро- та нанопластику. Хімічна переробка пропонує потенціал для обробки складних відходів та отримання високоякісних матеріалів, але її поточна енергоємність, утворення небезпечних побічних продуктів та проблеми масштабованості вимагають ретельного розгляду. Альтернативні матеріали та ієрархія управління відходами підкреслюють, що справжня стійкість починається з запобігання утворенню відходів та повторного використання.

Для ефективного управління екологічними ризиками, пов'язаними з переробкою пластикових відходів, необхідно:

- Пріоритизувати запобігання та повторне використання: Найефективнішою стратегією є зменшення потреби в пластику та сприяння багаторазовому використанню. Це вимагає переосмислення дизайну продукції та бізнес-моделей для мінімізації використання матеріалів та пріоритезації поновлюваних ресурсів.
- Інвестувати в передові технології сортування: Для підвищення ефективності як механічної, так і хімічної переробки критично важливо покращити сортування пластикових відходів. Це зменшить забруднення сировини, покращить якість перероблених матеріалів та дозволить більш ефективно використовувати передові технології.
- Запровадити комплексні оцінки життєвого циклу (LCA) та екологічні оцінки ризиків (ERA): Для прийняття обґрунтованих рішень щодо технологій переробки та політики необхідно проводити повні LCA, які враховують усі категорії впливу (ПГ, енергія, виснаження ресурсів, токсичність, забруднення повітря, води та

ґрунту). ERA, інтегровані з ISO 31000, повинні перетворювати ці наукові дані на дієві стратегії управління ризиками.

- Розробити та впровадити надійні механізми уловлювання забруднювачів: Оскільки процеси переробки можуть вивільняти мікро- та нанопластик, ЛОС та інші небезпечні побічні продукти, необхідно інвестувати в технології, які ефективно уловлюють та обробляють ці забруднювачі на всіх етапах переробки.
- Посилити регуляторні рамки та прозорість: Необхідні чіткі стандарти та регуляції для забезпечення екологічної безпеки процесів переробки пластику, особливо хімічної переробки. Це включає вимоги до прозорості щодо хімічного складу пластику, викидів та управління відходами, а також встановлення цільових показників для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Перехід до справді циркулярної економіки пластику вимагає скоординованих зусиль усіх зацікавлених сторін – урядів, промисловості, дослідників та споживачів – для впровадження інноваційних рішень, що зменшують вплив пластику на навколишнє середовище протягом усього його життєвого циклу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aste producers worldwide: Senseo Global Waste Index 2019. *Sensoneo*. URL: <https://sensoneo.com/sensoneo-global-waste-index-2019/> (accessed May 15, 2020).
2. Wong S. L., Ngadi N., Abdullah T. A. T., Inuwa I. M. Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. P. 1167–1180. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.063.
3. Andrady A. L., Neal M. A. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.² 2009. Vol. 364, no. 1526. P. 1977–1984. DOI: 10.1098/rstb.2008.0304.
4. Rosato D., Rosato D. 4 - PRODUCT DESIGN. *Plastics Engineered Product Design*. Amsterdam : Elsevier Science, 2003. P. 198–343. DOI: 10.1016/B978-185617416-9/50005-3.
5. Publications :: PlasticsEurope. URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/93-plastics-facts-2015> (accessed Feb. 25, 2021).
6. Anuar Sharuddin S. D., Abnisa F., Wan Daud W. M. A., Aroua M. K. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 115. P. 308–326. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
7. Siddiqui M. N. Conversion of hazardous plastic wastes into useful chemical products. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 167, no. 1–3. P. 728–735. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.042.
8. Siddiqui M. N., Redhwi H. H. Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products. *Fuel Processing Technology*. 2009. Vol. 90, no. 4. P. 545–552. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.01.003.
9. FakhrHoseini S. M., Dastanian M. Predicting Pyrolysis Products of PE, PP, and PET Using NRTL Activity Coefficient Model. *Journal of Chemistry*. 2013. Sep. 09. URL: [suspicious link removed] (accessed Feb. 10, 2021).
10. Abnisa F., Daud W. M. A. W. A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 87. P. 71–85.

11. Önal E., Uzun B. B., Pütün A. E. Bio-oil production via co-pyrolysis of almond shell as biomass and high. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 78. P. 704–710.
12. Demirbas A. Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004. Vol. 72, no. 1. P. 97–102. DOI: 10.1016/j.jaap.2004.03.001.
13. Kumar S., Singh R. K. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2011. Vol. 28, no. 4. P. 659–667. DOI: 10.1590/S0104-66322011000400011.
14. Marcilla A., Beltrán M. I., Navarro R. Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2009. Vol. 86, no. 1. P. 78–86. DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.07.026.
15. Sakata Y., Uddin Md. A., Muto A. Degradation of polyethylene and polypropylene into fuel oil by using solid acid and non-acid catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999. Vol. 51, no. 1. P. 135–155. DOI: 10.1016/S0165-2370(99)00013-3.
16. Onwudili J. A., Insura N., Williams P. T. Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009. Vol. 86, no. 2. P. 293–303. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.07.008.
17. Shah J., Jan M. R., Adnan. Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2014. Vol. 31, no. 8. P. 1389–1398. DOI: 10.1007/s11814-014-0016-4.
18. Scanlon J. T., Willis D. E. Calculation of Flame Ionization Detector Relative Response Factors Using the Effective Carbon Number Concept. *Journal of Chromatographic Science*. 1985. Vol. 23, no. 8. P. 333–340. DOI: 10.1093/chromsci/23.8.333.
19. Perry R. H., Green D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7th ed. 1997.
20. Marlair G., Cwiklinski C., Tewarson A. An analysis of some practical methods for estimating heats of combustion in fire safety studies. P. 13.

21. Esbensen K. H., Guyot D., Westad F., Houmoller L. P. *Multivariate Data Analysis: In Practice : an Introduction to Multivariate Data Analysis and Experimental Design*. Multivariate Data Analysis, 2002.
22. Mohabeer C., Abdelouahed L., Marcotte S., Taouk B. Comparative analysis of pyrolytic liquid products of beech wood, flax shives and woody biomass components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 127. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.07.025.
23. Elordi G. Product Yields and Compositions in the Continuous Pyrolysis of High-Density Polyethylene in a Conical Spouted Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. P. 6650–6659.
24. Conesa J. A., Font R., Marcilla A. Comparison between the Pyrolysis of Two Types of Polyethylenes in a Fluidized Bed Reactor. *Energy & Fuels*. 1997. Vol. 11, no. 1. P. 126–136. DOI: 10.1021/ef960098w.
25. Liu Y., Qian J., Wang J. Pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor to obtain styrene monomer and gasoline fraction. 2000. P. 11.
26. Bouster C., Vermande P., Veron J. Evolution of the product yield with temperature and molecular weight in the pyrolysis of polystyrene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1989. Vol. 15. P. 249–259. DOI: 10.1016/0165-2370(89)85038-7.
27. Kim Y.-M. et al. Catalytic co-pyrolysis of torrefied yellow poplar and high-density polyethylene using microporous HZSM-5 and mesoporous Al-MCM-41 catalysts. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 149. P. 966–973. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.033.
28. Dorado C., Mullen C. A., Boateng A. A. H-ZSM5 Catalyzed Co-Pyrolysis of Biomass and Plastics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2014. Vol. 2, no. 2. P. 301–311. DOI: 10.1021/sc400354g.
29. Boundy R. G., Davis S. C. Biomass Energy Data Book: Edition 3. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), ORNL/TM-2011/43, Dec. 2010. DOI: <https://doi.org/10.2172/1008840>.
30. Ballice L., Reimert R. Classification of volatile products from the temperature-programmed pyrolysis of polypropylene (PP), atactic-polypropylene (APP) and

- thermogravimetrically derived kinetics of pyrolysis. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2002. Vol. 41, no. 4. P. 289–296. DOI: 10.1016/S0255-2701(01)00144-1.
31. Adiwari, Batts B. D. The effect of aliphatic olefins on the stability of diesel fuel. USDOE Assistant Secretary for Fossil Energy, Washington, DC (United States). Office of Technical Management, CONF-941022-Vol.2, Apr. 1995. Accessed: Jan. 21, 2021. URL: <https://www.osti.gov/biblio/68693>
32. Pereira R. C. C., Pasa V. M. D. Effect of mono-olefins and diolefins on the stability of automotive gasoline. *Fuel*. 2006. Vol. 85, no. 12. P. 1860–1865. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.01.022.
33. Anuar Sharuddin S. D., Abnisa F., Wan Daud W. M. A., Aroua M. K. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. P. 925–934. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.046.
34. Hussain Z., Khan K. M., Hussain K. Microwave–metal interaction pyrolysis of polystyrene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2010. Vol. 89, no. 1. P. 39–43. DOI: 10.1016/j.jaap.2010.05.003.
35. Boukaous N. et al. Combustion of Flax Shives, Beech Wood, Pure Woody Pseudo-Components and Their Chars: A Thermal and Kinetic Study. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 8. P. 2146. DOI: 10.3390/en11082146.
36. Reyes L. et al. Energetic and exergetic study of the pyrolysis of lignocellulosic biomasses, cellulose, hemicellulose and lignin. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 244. P. 114459. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114459.
37. Reyes L. et al. Exergetic study of beech wood gasification in fluidized bed reactor using CO₂ or steam as gasification agents. *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 213. P. 106664. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106664.
38. Reyes L. et al. Energetic study of beech wood gasification in fluidized bed reactor under different gasification conditions (vol 164, pg 23, 2020). *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 166. P. 267–267. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.12.015.

ДОДАТОК А
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Екологічна безпека поводження з полімерними відходами

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,9 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.

(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Іщенко В.А.

Здобувач

Серединська І. В.

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ

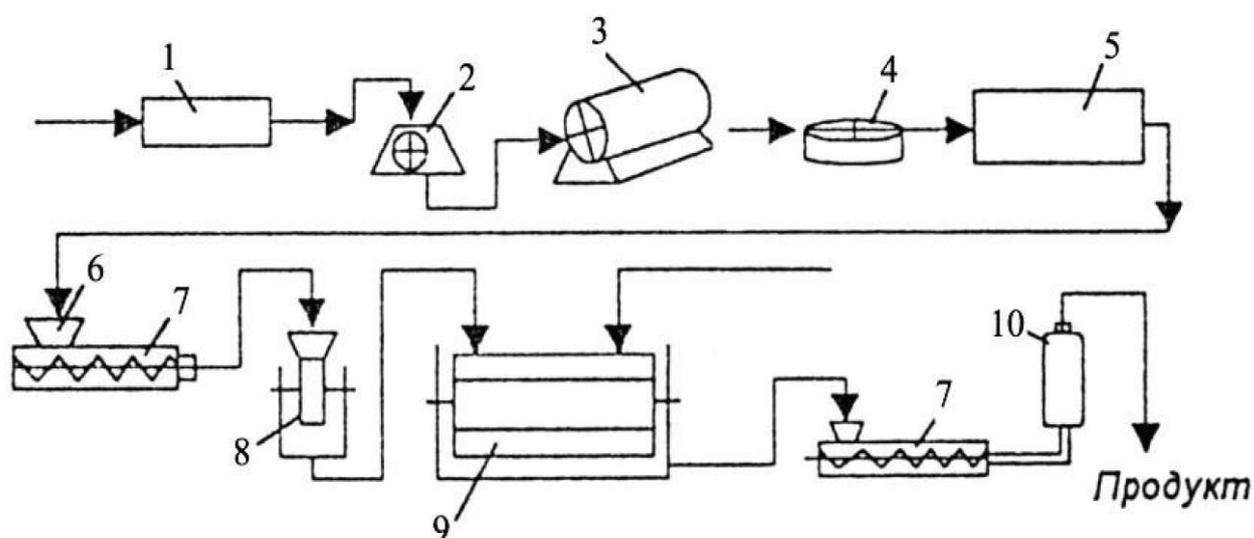


Рисунок Б.1 – Схема виробництва повторної поліетиленової плівки: 1 – вузол сортування відходів; 2 – дробарка; 3 – миюча машина; 4 – центрифуга; 5 – сушарка; 6 – живильник; 7 – екструзійні преси; 8 – гранулятор; 9 – змішувач; 10 – плівковий агрегат

Таблиця Б.2 – Вміст пластику у побутових відходах Вінницької області

Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Утворено відходів (т/рік)	359,6	690,8	445,9	627,4	970,0	800,0
Пластику у відходах (%)	15					
Пластику у відходах (т/рік)	53,94	103,62	66,885	94,11	145,5	120



Рисунок Б.2 – Управління пластиковими відходами в Європі



Рисунок Б.3 – Вплив пластику на людину

Таблиця Б.3 – Порівняльні викиди парникових газів для різних варіантів управління пластиковими відходами

Тип процесу	Викиди ПГ (кг CO ₂ e/тонну пластику)	Опис / Примітки
Виробництво первинного пластику		
ПНЦП (первинний)	~1400	Включає видобуток, обробку, транспортування
ПЕТ (первинний)	~2000	Включає видобуток, обробку, транспортування
Переробка пластику		
Механічна переробка ПНЦП	0.8 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом
Механічна переробка ПЕТ	1.4 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом
Механічна переробка змішаних пластмас	1.2 (RERF)	Чисте зменшення викидів порівняно з первинним виробництвом (для суміші 71% ПЕТ, 29% ПНЦП)
Хімічна переробка (піроліз) змішаних відходів	739	Прямі викиди від процесу (для 1 тонни змішаних відходів)
Хімічна переробка (піроліз) для 1 тонни ПНЦП	28% нижче до 30% вище, ніж викопне дизельне паливо	Залежить від потужності заводу та методів розподілу побічних продуктів
Утилізація відходів		
Спалювання 1 тонни змішаних пластикових відходів	1777	Прямі викиди від процесу
Захоронення на полігонах (для 1 тонни пластику)	40	Коефіцієнт викидів



Рисунок Б.4 – Схема очищення січних вод