

+ЗАТВЕРДЖЕНО

Наказ Міністерства освіти і науки України  
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.02

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Інститут екологічної економіки і менеджменту**

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

**Кафедра екології**

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

УДК 504.06

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

**магістр**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Розкладання відходів пластику личинками**

**Zophobas morio Fabricius**

Виконав: студент б курсу, групи ЕК-61м  
напряму підготовки (спеціальності)

101 Екологія

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Пурель В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Панківський Ю.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент доц.Марутяк С.Б.

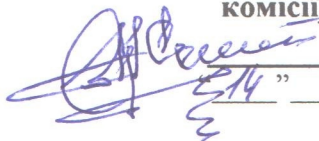
(прізвище та ініціали)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення екологічної економіки і менеджменту  
Кафедра, циклова комісія екології  
Освітньо-кваліфікаційний рівень  
магістр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Спеціальність 101 Екологія  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри, голова циклової  
комісії проф.Копій Л.І.

  
" 11 " 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Пурель Володимир Антонович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розкладання відходів пластику  
личинками *Zophobas morio* Fabricius.

керівник проекту (роботи) Панківський Юрій Іванович к.ф.-м.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 12 » 11.2024 р. №С-873

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 13.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): статистичні дані Департаменту екології та природних ресурсів ЛОДА про обсяги накопичення твердих побутових відходів; наукові публікації про біологічні методи переробки пластику.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ; 1. Пластик – загальна характеристика; 1.1. Поняття про полімерні матеріали; 1.2. Виготовлення виробів з пластику; 1.3. Екологічні проблеми використання пластмас; 2. Утилізація і біодеградація пластику; 2.1.

пластикових відходів; 3. Zophobas morio – тропічний жук; 3.1 Характеристика Zophobas morio; 3.2. Промислове розведення Zophobas morio; 4. Методика експериментів; 4.1. Матеріали і обладнання; 4.2 Опис лабораторної експериментальної установки; 5. Експериментальна частина; 5.1 Експеримент №1; 5.2 Експеримент №2; 5.3 Обговорення результатів дослідження; Висновки; Список використаних джерел; Додатки.

5. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 05.08.2024

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз обсягів відходів пластику Львівської області	05.08.24-17.08.24	<i>Викон</i>
2	Аналіз стану переробки та утилізації відходів пластику у Львівській області	18.08.24-08.09.24	<i>Викон</i>
3	Проведення експерименту №1	09.09.24-11.10.24	<i>Викон</i>
4	Аналіз результатів експерименту №1	12.10.24-19.10.24	<i>Викон</i>
5	Проведення експерименту №2	20.10.24-01.11.24	<i>Викон</i>
6	Аналіз результатів експерименту №2	02.11.24-09.11.24	<i>Викон</i>
7	Оформлення пояснювальної записки	10.11.24-13.12.24	<i>Викон</i>

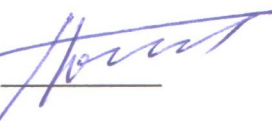
Студент

  
(підпис)

Пурель В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)  
Ю.І.

  
(підпис)

Панківський

(прізвище та ініціали)

## АННОТАЦІЯ

**УДК 504.06. Пурель В.А. Розкладання відходів пластику личинками *Zophobas morio* Fabricius: кваліфікаційна робота магістра: 101 Екологія/ Володимир Антонович Пурель; наук. кер.: Юрій Іванович Панківський; НЛТУ України. – Львів, 2024. – 101 с.**

У дипломній роботі проаналізовано процес розкладання відходів полістиролу личинками *Zophobas morio* Fabricius. На основі проведених експериментів були зроблені висновки про потенціал личинок *Zophobas morio* Fabricius до бородьби з пластиковим забрудненням.

*Ключові слова:* диполімерізація, біодеградація, організми, ферменти, полістирол.

## SUMMARY

**UDK 504.06. Parel V.A. Decomposition of plastic waste by *Zophobas morio* FABRICIUS larvae: Master Diploma Thesis: 101 Ecology/ Volodimir Parel; scientific supervisor: Yuriy Pankivskyi; UNFU.– Lviv, 2024. – 101 p.**

The diploma work analyzed the process of decomposition of polystyrene waste by *Zophobas morio* Fabricius. On the basis of the conducted experiments, conclusions were made about the potential of *Zophobas morio* Fabricius larvae to combat plastic pollution.

*Key words:* dipolymerization, biodegradation, organisms, enzymes, polystyrene.

## Зміст

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТИКУ.....	9
1.1 Поняття про полімерні матеріали.....	9
1.2 Виготовлення виробів з пластику .....	13
1.3 Екологічні проблеми використання пластмас .....	14
Висновок до розділу .....	15
РОЗДІЛ 2 УТИЛІЗАЦІЯ І БІОДЕГРАДАЦІЯ ПЛАСТИКУ.....	16
2.1 Утилізація пластику: методи, етапи, особливості .....	16
2.2 Біодеградація пластикових відходів .....	19
Висновок до розділу .....	30
РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКА <i>ZOPHOBAS MORIO FABRICIUS</i> .....	31
3.1 Опис виду <i>Zophobas morio</i> Fabricius .....	31
3.2 Промислове розведення <i>Zophobas morio</i> Fabricius .....	36
Висновок до розділу .....	38
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	39
4.1. Матеріали і обладнання.....	39
4.2 Опис лабораторної експериментальної установки .....	40
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	42
5.1 Експеримент №1 .....	42
5.2 Експеримент №2 .....	48
5.3 Обговорення результатів дослідження.....	54
Висновок до розділу .....	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
ДОДАТКИ.....	68

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Двадцяте століття і початок двадцять першого справедливо називають «Віком пластику», відбулася синтетична революція, у життя людства увійшли нові матеріали – пластмаси.

Пластмасу винайшов англійський металург і винахідник Олександр Паркс в 1855 році, коли вирішив знайти заміник дорогої слонової кістки (з якої робилися більярдні кулі). Він змішав нітроцелюлозу (бавовна + азотна та сірчана кислота), масло камфорного дерева та спирт. При нагріванні вийшла рідка однорідна суміш, яка при охолодженні застигла і стала твердою. Через сто років, у 1953 році, німецький професор Штаудінгер відкрив синтетичну макромолекулу (молекула з дуже великою кількістю атомів і великою масою), яка стала прародицею різноманітних видів промислового пластику.

Полімери – високомолекулярна речовина, що складається з молекул з структурними ланками (мономери), що повторюються, які відповідають за цілісність і єдину форму виробу.

Пластмаси – це широкий спектр синтетичних матеріалів, які використовують полімери як основний інгредієнт.

Для досягнення різних цілей до пластмас застосовують різні добавки: – композити; –пластифікатори; – стабілізатори; –антипірени.

Матеріали з наповнювачами – пластик.

Пластик є найпоширенішим у світі синтетичним матеріалом, він широко використовується у всіх галузях науки, техніки та побуту, має підвищену щільність і зносостійкість, міцність і термопластичність, легкість і довговічність.

Пластмасові вироби (полімери) характеризуються великою сферою застосування, їх використовують у автомобілебудуванні, кораблебудуванні, авіатехніки, залізниць, військовому та космічному устаткуванні, для виготовлення різного виду упаковки, будівництві, виготовленні канцелярських товарів, прикрас та ін.[31].

При всіх своїх корисних властивостях цей матеріал досить дешевий, тому обсяги та сфери застосування полімерів у світі продовжує зростати і робить наше життя простіше та зручніше. Зростання виробництва та споживання полімерів – один із основних напрямків розвитку світової економіки. Останніми роками темпи зростання виробництва полімерних матеріалів неухильно зростають.

Але пластик має і зворотний, темний бік, який завдає величезної шкоди навколишньому середовищу, людство зіштовхнулося із накопиченням пластикових відходів, які не розкладаються швидко за допомогою природних факторів.

Менше ніж за сто років виробництво пластику завдало серйозних збитків екології та біосфері Землі. Синтетичні пластмаси є серйозною загрозою глобального забруднення, особливо морських екосистем, через їх надтривалий термін природного розкладання. У зв'язку з цим потрібні ефективні методи утилізації пластику. Сучасні засоби утилізації пластику такі: – фізичні; – хімічні; – термічні;

В даний час на практиці використовуються три методи боротьби з відходами пластмас: поховання, спалювання та переробка.

Поховання та спалювання відходів пластику призводять до викиду у навколишнє середовище небезпечних вторинних забруднювачів. Переробка полімерів вирішує певні екологічні проблеми перших двох методів, проте цей процес обмежений сортировкою та дороговизною обладнання.

Останнім часом біодеградація пластикових відходів привертає все більше уваги як екологічно чиста альтернатива іншим методам. Процес вимагає помірної температури, невеликого енергоспоживання, нескладного апаратного оформлення процесу. Продукти біодеградації можуть бути легко вбудовані у існуючі технологічні лінії.

Різні підходи до аналізу еколого-економічної оцінки впливу відходів на природне навколишнє середовище враховуючи методи утилізації відходів, а також питаннями, які пов'язані з управлінням та впровадженням систем

поводження з відходами можна знайти у наукових роботах багатьох вчених: О.Ф. Балацький, Р.І. Байцар, О.О.Білопільська, О.О. Веклич, Х.І. Депко, Т.М. Довга, С.С. Душкін, О.П.Ігнатенко, В.О. Лук'янихін, Ю.М. Маковецька, Л.Г. Мельник, Є.В. Мішенін, В.С. Міщенко, М.Ю. Шабалов, Т.І. Шевченко.

**Мета роботи:** дослідити процес біодеградації пластику личинками *Zophobas morio* Fabricius.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати пластикові відходи;
- проаналізувати методи утилізації пластику в Україні та світі;
- проаналізувати та охарактеризувати організми-деструктори пластику;
- виконати експериментальні дослідження деструкції полістиролу

личинками *Zophobas morio* Fabricius.

**Об'єкт дослідження :** личинки *Zophobas morio* Fabricius.

**Предмет дослідження:** процес біологічної деструкції полістиролу личинками *Zophobas morio* Fabricius.

**Методи дослідження:** експериментальні та аналітичні.

# РОЗДІЛ 1

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТИКУ

### 1.1 Поняття про полімерні матеріали

Спочатку слід зазначити, що «полімером» називається сировинний матеріал, який буде використаний у виробництві, а готовий продукт «пластик» має назву

Пластичні маси (пластмаси) – це полімери (високомолекулярні органічні із'єднання) та композиції на їх основі, які при нагріванні переходять в пластичний стан і при формовці приймають бажану форму.

Серед достатку найрізноманітніших за будовою та властивостями органічних з'єднань є особливий клас – полімери (від грецької «полі» – «багато» та «мерос» – «частина»). Полімери – складні речовини, які складаються з безлічі однакових або різних за будовою ланок, з'єднаних у довгі макромолекули координаційними або хімічними зв'язками [26].

Для цих речовин характерна величезна молекулярна маса – від десятків тисяч до мільйонів атомних одиниць маси, тому часто їх називають високомолекулярними сполуками. Довжину макромолекул виражають середнім числом ланок мономеру, яке називають ступенем полімеризації.

Полімери мають лінійну, розгалужену та сітчасту будови (Рис.1.1) [15].



Рис.1.1 Будова полімерів

Пластмаси або пластики – це матеріали органічної природи, створені на основі полімерів, властивості залежать від речовини з якої отримано полімер. За методом застосування пластики поділяються на групи: конструкційні, з них роблять деталі, призначені для несення механічних

навантажень; сировина для несилкових деталей; ущільнювальні, прокладочні; вогнестійкі; фрикційні, антифрикційні; теплоізоляційні; електроізоляційні; декоративні.

Пластмаси - це композиційні матеріали. Роль зв'язуючого компонента виконують полімери. Виробництво сучасних полімерів базується на продуктах переробки нафти, вугілля, попутного і природного газу [9].

Існує два види полімерів: термопластичні та термореактивні. Істотною відмінністю термореактивних матеріалів від термопластичних є те, що вони є неповністю полімеризовані продукти.

Використання повторно термореактивних полімерів неможливе.

Термореактивні полімери: здатні розм'якшуватися, повністю або частково плавитися, надалі набувають твердого стану, основні властивості після нагрівання втрачаються (Рис.1.2).



Рис.1.2 Термореактивний пластик

Термопластичні полімери: повністю розм'якшуються та плавляться під впливом певних температур, при охолодженні набувають твердого стану, можливість повторного використання після додаткового формування (Рис.1.3). Переробка робить їх більш прийнятними для пакувальних цілей.



Рис.1.3 Термореактивний пластик



Пластмаси крім полімерів також містять інші найважливіші складові, які надають певних властивостей пластмасі: наповнювачі, пластифікатори, спеціальні добавки.

Наповнювачі: підвищують жорстокість, знижують вартість виробів. Функції наповнювачів виконують порошки органічного й неорганічного походження, волокна, тканини, деревний шпон.

Пластифікатори: підвищують еластичність полімеру, пластичність, знижують в'язкість. Це ефіри фталевої кислоти, складні ефіри фосфорної кислоти, різні оливи.

Стабілізатори: затримують деградацію пластмас через вплив тепла, УФ-випромінювання, кисню та інших факторів навколишнього середовища, це – аміни, феноли, сажа.

Для надання необхідних властивостей можливі комбінації компонентів. У кожному випадку необхідно передбачити можливі варіанти взаємодії добавок, оскільки це може покращувати властивості матеріалу, так і призвести до погіршення властивостей.

Різноманітність синтетичних полімерів нині досить велика. Синтетичні полімери представлені: поліпропіленами, поліетіленами, поліамідами, а також фенолформальдегідними смолами.

Найпоширеніші типи полімерів та їх властивості приведені в Додатках А, Б, маркировка, структура полімерів в Додатоку В.

Технологія виробництва пластику побудована на процесах синтезу (поліконденсація, полімеризації, поліпрієднання), в результаті цього виникають високомолекулярні зв'язки з величезною кількістю вихідних молекул. Типи пластмас, їхні властивості, використання, вторинне перероблення в Додатоку Г.

Кожен із розглянутих типів пластику має свої плюси, мінуси та особливі сфери застосування. Вибір того чи іншого виду пластику залежить від вимог до виробу та умов роботи.

Усі види пластика маркеруються, на упаковці повинен стояти значок у вигляді трикутника зі стрілок, або стрілки утворюють коло, Додаток В.

Основні переваги використання пластмас у промисловості та інших сферах діяльності людини є: легкість, достатня механічна міцність, невелика щільність, високі пластичність, пружність, хімічна та радіаційна стійкість, термо- та зносостійкість, незначні електро- та теплопровідність, тріщиностійкість в умовах значних навантажень.

Виробництво виробів з різних видів пластику, Додаток Д.

## 1.2 Виготовлення виробів з пластику

Технологія виготовлення виробів з пластмас діляться на такі групи: лиття термопластів під тиском – 33%; екструзія – 30%; пресування – 26%; каландрування – 5%; інші методи – 6%. Вибір методу виготовлення залежить від призначення виробів, від їх конфігурації та габаритів.

Виготовлення виробів із реактопластів супроводжується реакціями утворення тривимірного полімеру – затвердженням [36].

Існує багато методів виготовлення пластмасових виробів (пресування, лиття під тиском, формування, екструзія та інші), які усувають відходи виробництва та сприяють можливості широкої автоматизації виробництва (Рис.1.6).



Рис.1.6 Способи переробки пластику

Для переробки та виготовлення певного виробу із пластику використовуються різні технології (Додаток Е).

### 1.3 Екологічні проблеми використання пластмас

Нині життя без пластику неможливо уявити. XXI століття – століття відкриттів, винаходів, які роблять життя людини простішим. Але блага цивілізації можуть нашкодити і завдати величезної шкоди планеті.

Щорічно у світі виробляється більше 350 мільйонів тонн пластику. Більшість виробів використовуються одноразово, потім виявляються на полігонах побутових відходів або на звалищах у навколишньому середовищі. Забруднення планети набуває катастрофічних масштабів.

Полімерні відходи, накопичуючись на природі, потрапляють у річки і далі в океани. Океани приймають на себе основний удар пластикового забруднення: через кругообіг течій у них утворюються «сміттєві острови» – по два в Атлантичному та Тихому (північніший і південніший від екватора), один в Індійському (Рис.1.7).



Рис.1.7 Сміттєві острови в Світовому океані

Найгірша ситуація на Півночі Тихого океану: наприкінці 1980х років вчені передбачили появу плями сміття між Каліфорнією і Гавайями [51]. Екологи уточнили розмір плями. Виявилося, що вона вчетверо більше, ніж вважалося раніше: 1,6 млн. квадратних кілометрів, 80 тис. тонн пластику. Більшість плями складається з пластикових частинок і мікропластику, що дрейфують на поверхні води. Пластик, що у воді, розкладається довше, ніж на суші. Черепахи, риби та птаці – приймають пластикові пляшки, пакети та інше

сміття за їжу. Він стає їжею для мешканців морського середовища, що призводить їх до смертельного результату. Це призводить до скорочення біорізноманіття.

Людина при вживанні таких птахів і риб стає жертвою пластикового забруднення. Додатки, що використовуються для виробництва пластику, мікропластик та нанопластик які утворюються при розкладанні пластику шкідливі для здоров'я, їх можна виявити в сечі, крові, жирової тканини майже всіх людей, що живуть на землі. Вони проникають в організм:

– через шкіру (при контакті з виробами); – органи дихання (частки з повітря); – разом з їжею, наприклад з рибою, що проковтнула мікроскопічні частинки, які плавають у воді.

Мікропластики і нанопластики потрапляючи в організм людини уповільнюють розвиток дітей, викликають пошкодження мозку, підвищують ризик безпліддя, можуть викликати онкологічні захворювання та відхилення в організмі, які в результаті призведуть до смерті.

### **Висновок до розділу**

Пластмаса або «Пластик» – полімерний матеріал, який створений штучно. Він утворюється з полімерів (хімічних сполук) молекули яких складаються з численних ланок, що повторюються, – мономерів.

При нагріванні пластику можна надати будь-якої форми, і після охолодження вона збережеться. Завдяки цій властивості пластик може застосовуватися скрізь, головне правильно підібрати склад та форму.

Пластик використовується як заміна природних матеріалів – металу, скла, дерева та інших, виріб виходить легшим, а виробництво – дешевшим. Критеріїв класифікації пластика безліч – це і сфери застосування, і хімічні мономери, що входять до складу пластику, та його жорсткість чи м'яккість.

Гнучкий та міцний, доступний за ціною пластик огорнув сучасне життя, забруднення душить морську флору і фауну, завдає шкоди ґрунту та отруєє підземні ви, призводить до серйозних наслідків для здоров'я людини.

## РОЗДІЛ 2

### УТИЛІЗАЦІЯ І БІОДЕГРАДАЦІЯ ПЛАСТИКУ

#### 2.1 Утилізація пластику: методи, етапи, особливості

Вже не один рік гостро стоїть питання про забруднення відходами пластику нашої планети Земля. Пластикове сміття знаходиться всюди: на землі, в морі, глибоко на дні океану. Планета від забруднення відходами пластику, буде мати справжню екологічну катастрофу [61]:

- відходи пластика забруднюють ґрунт, ґрунтові води, моря та океани;
- під час спалювання в атмосферу виділяються токсичні речовини;
- 50% виготовленого пластику, використовується один раз і викидається;
- переробляється лише 5% пластмас, які виробляються;
- на виробництва пластмас іде 8% світового видобутку нафти;
- щорічно в світі використовують близько 500 млрд пластикових пакетів.

Звичайно, відмовитися від використання пластику важко, тому що йому зараз нема заміни, але можна зайнятися переробкою відходів пластику. Адже чистий від відходів пластика світ – це здоров'я та щасливе майбутнє планети та наших дітей.

В зв'язку з тим, що тривалість розкладання пластику становить у середньому 150-500 років, його переробка допомагає:– скоротити кількість відходів, адже щорічно утилізується 13 мільярдів пластикових пляшок;– економити ресурси;– збільшувати ринок вторсировини та забезпечувати виготовлення нових речей;– робити цей світ чистішим та покращувати екологічну ситуацію.

Пластикові відходи представляють велику можливість, якщо їхню економічну цінність можна зберегти після переробки. В ідеалі це можна зробити шляхом розщеплення пластикових полімерів на мономері або

олігомери для подальшої переробки [54]. Сучасні методи переробки пластику можна розділити на дві категорії на основі фізичної та хімічної технології. Фізичні або механічні методи переробки пластику ґрунтуються на фізичній сегрегації, сортуванні, митті та подрібненні пластикових відходів (Додаток Е).

Переробка відходів пластику, для отримання нового матеріалу, включає кілька етапів (Рис.2.1) .



Рис.2.1 Етапи процесу переробки пластику

Промислові хімічні методи переробки пластмас є перспективними завдяки відновленню енергії та виробництву економічно важливих продуктів, таких як мономери та сировина. Однак мінливість пластикових відходів робить цей процес непослідовним і економічно не вигідним. Крім того, з екологічної точки зору, ці методи є енергоємними, потребують токсичних і небіорозкладних розчинників (наприклад, при сольволизі) і виробляють смертельно небезпечні газоподібні продукти (наприклад, чадний газ, ціаністий водень і хлористий водень) [45].

Хімічний метод має деякі переваги в порівнянні з механічним. Механічна переробка вимагає серйозного сортування відходів і тому дорога. Хімічний метод найчастіше використовується для переробки забруднених відходів, Додаток Ж.

Він має два напрями:

– P2P (пластик-в-пластик) – відходи перетворюють на готову вторсировину (полімери), з якої вийде кінцевий продукт;

– P2F (пластик-в-сировину) – відходи переробляють на нафтохімічні продукти (транспортне паливо, матеріал для свічок, синтетичну нафту).

Хімічний метод теж починається зі збору та сортування матеріалу. Спосіб вимагає багато часу та дорогий.

Експериментальний метод переробки:

– **радіаційний**: є перспективним при переробки армованих пластиків. Руйнує молекули полімерів під дією високоенергетичного випромінювання нейтронів, бета-частинок та гамма-випромінювань з утворенням низькомолекулярних продуктів. Перевага – універсальність, руйнуються усі полімерні матриці з збереженням незмінними фізичних характеристик наповнювача. Недоліки – радіаційне навантаження на людину і довкілля.

Видалення на полігони та спалювання є найбільш поширеними методами утилізації пластику. Видалення відходів на полігони не лише призводить до значних земельних витрат, але й створює додаткові проблеми через те, що пластмаси не піддаються біологічному розкладанню [33]. Це може призвести до дефіциту землі в густонаселених країнах, а пластик на звалищах може стати джерелом вторинних забруднювачів навколишнього середовища, таких як складні вуглеводні, сполуки, що порушують роботу ендокринної системи, та сірководень, що вивільняється у вигляді фільтратів і газів, що призводить до забруднення повітря, води та ґрунту.

Для подолання обмеженості простору пропагується спалювання, яке має додаткову перевагу в одночасному виробництві енергії. Однак спалювання може призвести до утворення шкідливих сполук, таких як парникові гази та вуглецево-кисневі вільні радикали, а також поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАУ) та поліхлоровані біфеніли (ПХБ) [43].

При порівнюванні двох методів: захоронення та спалювання з отриманням енергії, і було зроблено висновок, що захоронення є найгіршим вибором через його вплив на навколишнє середовище. Крім того, спалювання

не повністю знищує пластикові відходи, оскільки в донній золі зберігаються МП [19]. Тим не менш, енергетична цінність пластику порівнянна з енергетичною цінністю мазуту, але використання його як вторинного палива потребує суворого контролю відповідно до Директиви про спалювання небезпечних відходів [51].

Тому вчені звернулися до біодеградації пластикових відходів як до «зеленого» рішення. Хоча фізичні та хімічні методи деградації пластику були прийняті в промислових умовах, ферментативна деградація є відносно новою концепцією.

## 2.2 Біодеградація пластикових відходів

Традиційні пластмаси, такі як поліетилен (PE), полістирол (PS), поліпропілен (PP), полівінілхлорид (ПВХ), поліетилентерефталат (PET), поліуретан (PUR) та інші, мають тривалий час розкладання і тому постійно накопичуються у навколишньому середовищі, тим самим викликають серйозну екологічну проблему.

Зазвичай механізми руйнування пластмас включають різні типи: фотоокисленням, каталітичне, викликане озоном, термічне, механічне та біодеградацію. Кінцевими продуктами біодеградації є CO<sub>2</sub> та вода, в зв'язку з чим вона має переваги екологічно чистого захисту навколишнього середовища та низького енергоспоживання [20].

Біодеградація синтетичних пластмас - дуже повільний процес, який також пов'язаний із факторами довкілля та дією диких видів мікробів. У цьому процесі біодеградації пластмас гриби відіграють ключову роль, вони впливають на пластмаси, виділяючи деякі ферменти, що розкладають, тобто кутиназу, ліпазу і протеази, лігноцелюлолітичні ферменти, а також присутність деяких іонів-прооксидантів може викликати ефективне розкладання. Система самоочищення, створена природою, не може самостійно протистояти величині та темпам розвитку техногенного забруднення

пластиком, тому необхідно дати цій системі поштовх і створити сприятливі умови для протікання природних механізмів нейтралізації відходів.

В даний час дослідники виявили, що багато штамів бактерій і грибів можуть розкласти пластик в лабораторних умовах та в навколишньому середовищі. Виявилося, що є мікробіологічна деградація первинних чи вторинних пластиків за допомогою мікроорганізмів чи ферментів. Мікроби, що розкладають пластик, та їх типи, показані у Додатку И.

У результаті окислення або гідролізу ферментом утворюються функціональні групи, які підвищують гідрофільність полімерів і, отже, розкладають високомолекулярний полімер до низькомолекулярного. Це призводить до розкладання пластмас протягом кількох днів. Деякі добре відомі види, які демонструють ефективне розкладання пластмас, - це *Aspergillus nidulans*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus nomius*, *Penicillium griseofulvum*, *Bjerkandera adusta*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Cladosporium cladosporioides* та інші. Та деякі сапротрофні гриби, такі як *Pleurotus abalones*, *Pleurotus ostreatus*, *Agaricus bisporus* і *Pleurotus eryngii*, які також сприяють розкладанню пластмас, виростаючи на них [5].

Вчені визнали, що багато видів комах руйнують пластик: борошняні черв'яки (личинки *Tenebrio molitor*), суперчерви (личинки *Zophobas atratus*), личинки воскової молі (*Galleria mellonella* L.), суперчерви (личинки *Zophobas morio*). У недавньому дослідженні, проведеному у 2022 році, ефективність борошняних черв'яків у розкладанні полієфірно-поліуретанової піни досягла 67%. На даний час широко відомі типи пластмас, що розкладаються *Tenebrio molitor*, включають PE, PS, полієфірний поліуретан та ПВХ. Личинки *Tenebrio molitor* розкладають не тільки поліетилен низької густини (LDPE), але також лінійний поліетилен низької густини (LLDPE) і поліетилен високої густини (HDPE) [14].

На здатність до деполімеризації впливає тип пластику, молекулярна маса та кількість розгалужень. Жовті борошняні черв'яки можуть повністю

розкладати PS до CO<sub>2</sub> та асимілювати його у свою біомасу. *Zophobas atratus* мають більш високу здатність до розкладання PS, ніж жовті борошняні черв'яки. Личинки *Zophobas atratus* можуть розкласти PS та PE. Біодеградація пластику комахами є більш екологічним варіантом, вони не виробляють у своїх залишках NPS (Рис. 2.2)

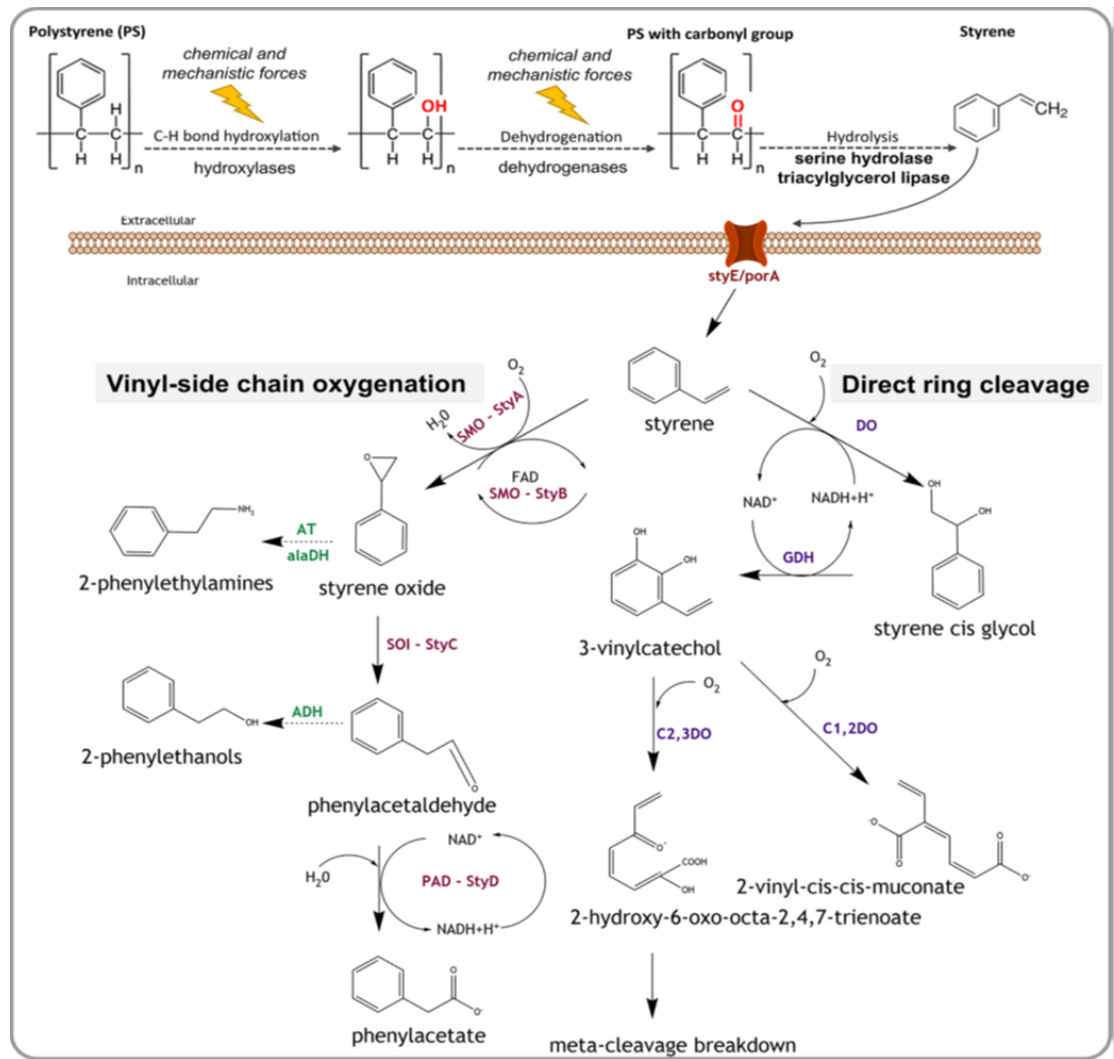


Рис. 2,2 Цикл переробки пластику личинками *Zophobas morio* Fabricius

Також було доведено, що *Tribolium castaneum* розкладає PS, і нещодавно було виділено *Acinetobacter* з личинок *Tribolium castaneum*. *Plodia interpunctella* може жувати поліетиленовий пластик, але розкладання пластику викликається *Enterobacter asburiae* та *Bacillus* у кишківнику. Біодеградація пластикового полімеру також була підтверджена іншими безхребетними, включаючи дрібну воскову моль (*Achroia grisella*), гігантський равлик (*Achatina fulica*), малий борошняний хрущак (*Tribolium confusum*).

У Додатоку К, вказані комахи, що розкладають пластик, і їхня здатність розкладати різні пластикові матеріали.

Через різні хімічні властивості різних пластмас, здатність до біологічного розкладання у комах також різна. *Galleria mellonella L.* розкладає поліетилен (PE) швидше, ніж полістирол (PS). Дослідження підтвердили, що жовті борошняні черв'яки, для поліпшення розкладності пластмас, вважають за краще вживати в їжу суміші пластмас і поживних речовин.

Механізм деградації, ймовірно, задіяний у раціонах з високим вмістом поживних речовин, які збільшують різноманітність кишкового мікробіома черв'яків. Отже, мають бути виявлені організми, здатні розкладати цільові пластмаси, і має бути розроблена найкраща дієтична формула для змішування пластику та поживних речовин. Доведено, що актинобактерії філи (*Microbacterium awajiense*, *Rhodococcus josii*, *Mycobacterium vanbaalenii* і *Streptomyces fulvissimus*) і фірмікути (*Bacillus simplex* і *Bacillus sp.*), виділені з кишківника *Lumbricus terrestris*, мають високу ефективність переробки – 60%.

Через різні види безхребетних, пластикових матеріалів і методів оцінки важко просто описати відмінності у швидкості розкладання різних комах, але конкретні дані про ефективність розкладання узагальнені в Додатоку К. Крім того, за винятком безхребетних, які підтвердили свої здібності до біодеградації пластику, повідомлялося, що інші безхребетні також споживали пластик у їжу, Додаток Л.

Процес розкладання пластмас комахами можна розділити на шість етапів на основі відповідних досліджень: – пластик фізично пережовується ротовими апаратами і потрапляє в кишковий тракт; – мікроби в кишечнику прилипають до пластику і руйнують його; – пластик деполімеризується на олігомерні фрагменти шляхом окислення або гідролізу ферментів, які виробляються як мікробіомом господаря, так і кишковим мікробіомом; – господар виробляє біоемульгуючі агенти, що підвищують ефективність біодеградації ферменти мікроорганізмів і господаря для впливу на полімери; –

зв'язки олігомерів розриваються з утворенням жирних кислот; – жирні кислоти розкладаються за допомогою біологічного метаболізму комах.

Для пошуку ефективних підходів до біодеградації пластику слід враховувати функцію кишкової мікробіоти комах. Після пригнічення активності кишкових бактерій антибіотиками, жовті борошняні черв'яки втратили здатність розкладати PS, це показує, що кишкові бактерії відіграють ключову роль у біодеградації пластику.

Примітно, що фізико-хімічні «процедури» пережовування, проковтування, змішування з вмістом кишківника та ферментами, що виділяються черв'яками, можуть мати вирішальне значення для швидкого розкладання PS *in vivo*.

На додаток до кишкових бактерій комах, кишкові гриби також можуть розкладати пластик. Було виділено грибок, що розкладає PE, *Aspergillus flavus*, з кишечника личинки воскової молі (*Galleria mellonella*), який може розкладати HDPE MP до низькомолекулярного MP після 28 днів культивування. Крім того, два гени лакказоподібної багатоконпонентної оксидази (LMCOS), *Afla\_053930* і *Afla\_006190*, активуються в процесі деградації, що пов'язано з деградацією PE.

Ферменти, що виділяються бактеріями та грибами комах, можуть бути безпосередньою причиною розкладання пластику. Пластикові полімери здебільшого деполімеризуються позаклітинними ферментами в короткі ланцюжки або невеликі молекули, а потім транспортуються в клітини для повного окислення [44].

Бактерії можуть продукувати безліч позаклітинних ферментів для розкладання пластикових макромолекул, таких як ліпаза, деполімераза, естераза, протеїназа, кутиназа, уреаза і дегідратаза, Додаток Н. Дослідження біодеградації пластику комахами показали, що можлива біодеградаційна обробка різноманітних матеріалів, включно з поліетиленом, PS, PP, PET і поліуретаном (Рис. 2.3).

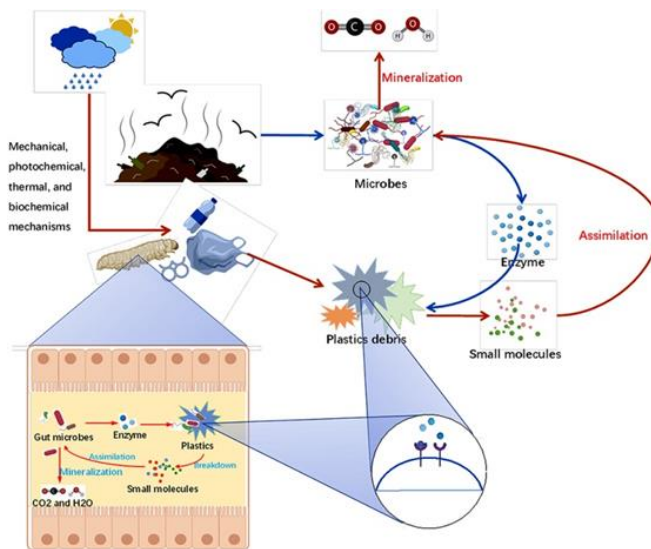


Рис. 2.3 Біодеградація пластика комахами і мікробами

Поряд з важливістю мікробів кишківника комах для біодеградації, велику роль відіграє і численна мікробіота, яка розкладає пластик у навколишньому середовищі. Було проведено дослідження різних актиноміцетів, водоростей, бактерій і грибів, здатних до біодеградації різних пластикових полімерів. Виявлено біодеградацію поліетилену більш ніж 56 видами бактерій і грибів, що належать до 25 родів, основними джерелами яких є ґрунт і звалища [62].

Було виявлено, що *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Rhodococcus ruber* та інші бактерії розкладають PE. Можлива деградація PET бактеріями *Thermobifida fusca*, *Aspergillus Niger* і *Bacillus subtilis*. Виявлено розкладання PUR бактеріями *Curvularia senegalensis* і *Fusarium solani*.

Біологічна обробка поліетиленових листів *Anabaena spiroides* (синьо-зелені водорості), *Navicula ripula* (діатомові водорості) і *Scenedesmus dimorphus* (зелена мікроводоросль) показала, що водорості, особливо мікроводорості, здатні розкласти пластик за допомогою систем токсинів або ферментів, які вони виділяють. Після інкубації, (при кімнатній температурі  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , освітленні – 12 годин у темряві та 12 годин на світлі, протягом 1 місяця), *Anabaena spiroides* показала ефективне розкладання пластику, яке може розкласти LDPE з ефективністю 8,18% [56].

При розкладанні мікробами поліетиленових полімерів, процес пов'язаний зі зменшенням енергії активації для ослаблення хімічних зв'язків поліетиленових полімерів і споживання полімерів як джерела вуглецю. *Спіруліна sp.* може біодеградувати PET і PP, але ефективність розкладання була значно нижчою порівняно з бактеріями та грибами. Причина полягає в тому, що мікробами, на відміну від бактерій, використовують атмосферний CO<sub>2</sub> як єдине джерело вуглецю і сонячне світло як основне джерело енергії.

Однак ефективність розкладання пластику різними мікроорганізмами відносно низька, що перешкоджає практичному застосуванню біодеградації пластику в промисловості.

Основним фактором, що визначає біорозкладність поліетиленових полімерів, є властивість зв'язків, що зв'язують мономерні одиниці разом. Серед шести основних типів синтетичних пластмас (PE, PP, PS, ПВХ, поліуретан і PET), C-C-основи PE, PP, PS і ПВХ володіють високою стійкістю, тоді як поліуретан і PET з основою, що гідролізується, є більш вразливими до ферментативної біодеградації. Розкладання пластику мікробами навколишнього середовища може відбуватися на таких етапах [55]:

- мікроби докільця виділяють гідролазу, що специфічно зв'язується з рецепторами поверхні пластику, а потім гідролізують пластик до молекул;
- невеликі молекули кислот або ліпідів, що утворилися в результаті попереднього процесу, можуть проникати в мікроорганізми та брати участь у їхньому фізіологічному метаболічному процесі, а потім розкладаються на воду і вуглекислий газ, вивільняючи енергію для росту клітин.

Ефективне біодеградування пластику може бути досягнуто на основі механізму розкладання. Що стосується розкладання поліетилену, то процес біодеградації зазвичай включає біофрагментацію поліетиленового полімеру секретованими ферментами з подальшою біоасиміляцією невеликих літичних фрагментів мікроорганізмами. Зокрема, відбувається процес окислення –C–C– групи довголанцюгового каркаса PE мікробом до –C=O– (карбонільної) групи,



Розкладання ПВХ відрізняється від PE та PP, оскільки він містить Cl—. Окислення хлорованих вуглеводнів набагато складніше, ніж PE і PP. *Tenebrio molitor* може мінералізувати PE, PP і PS, але мінералізація ПВХ низька, більша частина ПВХ перетворюється на хлоровані проміжні речовини [47].

Як ПВХ, так і PP мають високу гідрофобність і стійкість до хімічного стирання, що ускладнює їх розкладання за допомогою мікробної активності. Доведено, що кілька штамів мікроорганізмів мають здатність розкласти ПВХ і PP, але основні ферменти розкладання і механізм розкладання невідомі.

При розкладанні ПЕТ, пов'язаного з ефіром, ПЕТ і ПЕТ– гідролаза можуть впливати на кінцеву або кільцеву структуру полімерних ланцюгів для ферментативного гідролізу, що підвищує гідрофільність ПЕТ і покращує ефективність подальшого ферментативного гідролізу.

*Ideonella Sakaiensis* 201-F6, бактерія з роду *Ideonella*, розкладає та асимілює ПЕТ. В бактерії *Ideonella sakaiensis* виявлені ферменти ПЕТаза та МГЕТаза, які можуть перетравлювати полімери пластику ПЕТ. (Рис.2.5).

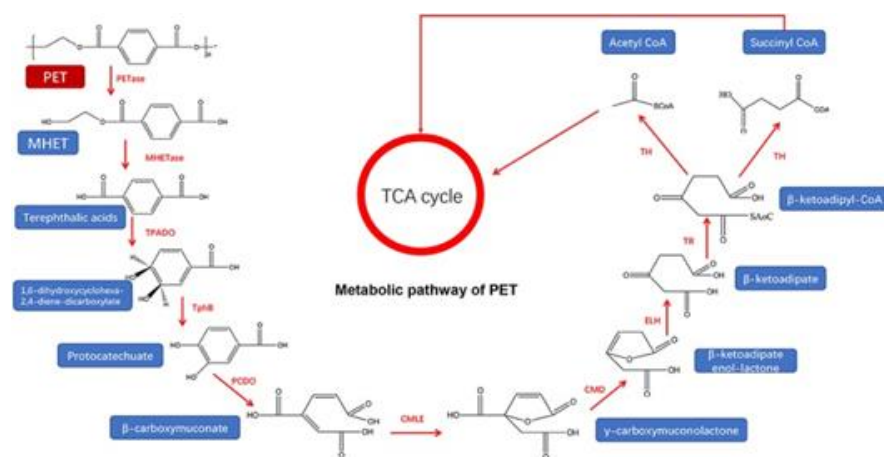


Рис. 2.5 Метаболічний шлях ПЕТ

Клітини *Ideonella sakaiensis* зв'язуються з поверхнею ПЕТ і розщеплюють її на моногідроксіетилтерефталеву кислоту (МНЕТ), гетеродімер терефталевої кислоти (ТРА) та етиленгліколю, використовуючи секретовану гідролазу ПЕТ, або ПЕТase. Перша ПЕТase була виявлена в *Ideonella sakaiensis*, і вона працює шляхом гідролізу складноефірних зв'язків, виявлених у ПЕТ, з високою специфічністю.

Отриманий МНЕТ потім розщеплюється на два мономерні компоненти ліпідно-закріпленим ферментом гідролази МНЕТ, або МНЕТase. У результаті обидві молекули, отримані з РЕТ, використовуються клітиною для виробництва енергії та створення необхідних біомолекул. В кінцевому підсумку асимільований вуглець може бути мінералізований до вуглекислого газу і викинутий в атмосферу [18].

Оскільки більша частина виробленого РЕТ є висококристалічною (наприклад, пластикові пляшки), вважається, що будь-які потенційні застосування ферменту РЕТази *Ideonella sakaiensis* у програмах переробки потребуватимуть генетичної оптимізації ферменту. У поєднанні з ферментом РЕТазою фермент МГЕТаза може бути оптимізовано та використано в додатках із переробки або біодеградації.

Він перетворює МГЕТ, що генерується РЕТазою, на етиленгліколь і терефталеву кислоту. Ці дві сполуки, після утворення, можуть бути біорозкладені у вуглекислий газ за допомогою *Ideonella sakaiensis* або інших мікробів, або очищені та використані для виробництва нового РЕТ на промислових заводах з переробки. РЕТаза, розщеплює пластик на більш дрібні будівельні блоки РЕТ, в першу чергу МГЕТ. МГЕТаза розщеплює його на два основні прекурсорні будівельні блоки РЕТ, терефталеву кислоту та етиленгліколь. Тривимірна архітектура МНЕТase має деякі унікальні характеристики: ферменти, такі як МНЕТase, спочатку зв'язуються з цільовою молекулою, перш ніж вступити в хімічну реакцію.

Поліуретан, пов'язаний уретановими зв'язками, складається з ди- або поліізоціанату і поліолів. PUR може бути деполімеризований мікробними уреазами, естеразами і протеазами для гідролізу уретанових і складноєфірних зв'язків (Рис.2.6).

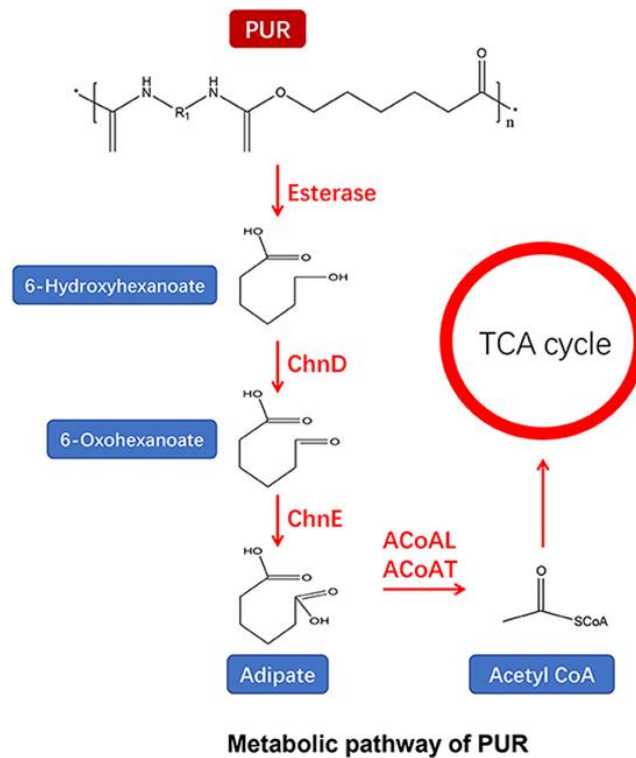


Рис.2.6 Метаболічний шлях PUR

Було постульовано, що протеази можуть гідролізувати амідні та уретанові зв'язки, тоді як уреази можуть атакувати сечовинні зв'язки. Естерази і протеази можуть гідролізувати складноєфірні зв'язки як основний механізм деполімеризації поліуретану. Ферменти, що розкладають PUR, поділяються на мембранозв'язані та секретовані типи. Мембранозв'язані ферменти безпосередньо прилипають до поверхні поліуретану і гідролізують уретановий зв'язок, що призводить до вивільнення мономерів поліуретану. Що стосується нерозчинного PUR, то для розкладання PUR вивільняється багато секретаз.

Ферментативний метод може конкурувати з виробництвом первинних нафтохімічних пластмас через можливість переробки за замкненим або розімкненим циклом. Переробка пластикових відходів із залученням мікробів і ферментів для досягнення кругової біоекономіки являє собою інноваційний та екологічний підхід [53]. Використання біоінформатики наступного покоління та обчислювальних інструментів для вилучення PDM та PDE, білкової інженерії для підвищення стабільності ферментів, ефективності та зв'язування ферменту з субстратом для підвищення розкладання пластмас є ключем до досягнення цілей сталого розвитку, Додаток П.

## Висновок до розділу

При біодеградації процес ініціюється мікроорганізмами, тобто бактеріями та грибами. В цілому, це біодеградація пластмас включає зростання грибків на поверхні пластику, де пластик споживається грибами як джерело їжі під впливом факторів навколишнього середовища, таких як температура та рН. Ці гриби виділятимуть ферменти, такі як кутиназа, ліпаза та протеази, карбоксилестерази, естерази, лігноцелюлолітичні ферменти та деякі іони-прооксиданти, які розкладають пластмаси.

Фермент окислення / гідролізу розкладає високомолекулярний полімер до низькомолекулярного. Оскільки високомолекулярна сполука являє собою велику сполуку, яка не може бути перенесена через клітинну мембрану грибів, вона в першу чергу деполімеризує її до невеликих мономерів, перш ніж вони перетнуть клітинну мембрану. Активність ферменту в основному залежить від властивостей розчинника і активність ферменту збільшується з полярністю і зменшується з в'язкістю розчинника при біодеградації полімерів. Процес стає більш ефективним, коли за фотодеградацією та термоокислювальною деструкцією слідує біодеградація, залишки пластику будуть розщеплені зі складного матеріалу в простій, тому біодеградація на такому матеріалі буде легкою і не вимагатиме багато часу.

## РОЗДІЛ 3

### ХАРАКТЕРИСТИКА *ZOPHOBAS MORIO FABRICIUS*

#### 3.1 Опис виду *Zophobas morio Fabricius*

Зофобас, відомий також як гігантський борошняний черв'як, superworm, zophobas, super mealworm, нерідко фігурують неправильні найменування: зоофобас, зоофобус, зофобус.

Зофобас моріо - вид жуків із родини чорнотілок (лат. Tenebrionidae). Чорнотілки - одна з найбільших родин жорсткокрилих комах, що налічує до 20 000 видів, з них на території Європи мешкає приблизно 1775 видів.

Описаний відомий датським ентомологом Йоганном Християном Фабрицієм у 1776 році. [7]

Йоганн Крістіан Фабріціус (7 січня 1745 - 3 березня 1808) був датським зоологом, який спеціалізувався на «комахах», до яких на той час входили всі членистоногі: комахи, павукоподібні, ракоподібні та інші. Він був учнем Карла Ліннея і вважається одним із найважливіших ентомологів 18 століття, назвавши майже 10 000 видів тварин і заклавши основу для сучасної класифікації комах.



Рис.3.1 Й.Х.Фабріціус

Наукова класифікація: Царство–Тварини; Тип–Членистоногі; Клас–Комахи; Загін–Жорсткокрилі; Підзагін–Polyphaga; Сімейство–Чорнотілки;

Латинська назва: *Zophobas morio* FABRICIUS, 1776.

Початковий ареал проживання *Zophobas morio* Fabricius знаходився на території від південних регіонів Мексики до Венесуели, Куби та багатьох

островов в Карибському морі. Потім він розширився майже по всій Центральній Америці. У Південній Америці зустрічається тільки в її північній частині. У природних умовах він селиться в дощових тропічних лісах.

Дорослих жуків легко виявити під гнилими стовбурами повалених дерев або в лісовій підстилці. Від них виходить різкий гнильний запах, тому більшість хижих тварин намагаються триматися від них подалі.

У природних умовах зофобас живе в ґрунтових відкладеннях. Як і інші всеїдні, він шукає місця, де скупчуються тваринні та рослинні рештки. Самки відкладають яйця в ущелини землі або в пні, яйце завдовжки 1,2-1,5 мм має витягнуту форму.

Личинки зофобаса моріо мешкають у ґрунтових відкладеннях, соломі, лісовій підстилці. Молоді личинки пожирають все, що їм трапляється, переважно личинкові форми інших комах. Великі личинки, забарвлені в кольори від жовтого до коричневого, в останній стадії починають мігрувати в пошуках відповідного притулку в гнилій деревині. У цей період вони не приймають ніякої їжі, а гострі щелепи служать їм для того, щоб проробляти ходи і глибокі камери для лялечок.

Личинка досягає довжини до 55-60 мм і маси - до 1-1,5 г. Загальний фон забарвлення - світло-жовтий, пшеничний. По передньому краю сегментів тіла йде темна смуга, посередині ряд із темних крапок. У личинки останнього віку задні сегменти черевця, голова і передньогруди сильно затемнені.

Лялечка гола, вона лежить на щетинистому форзаці передньоспинкою. Ноги та вусики лежать зібраними на черевці. Довжина - 28-30 мм. Кремового кольору. Спинна поверхня тіла вкрита групами потужних щетинок. Імаго. Довжина - 30-35 мм. Вусики чітко видні. Забарвлення - матово-чорне. Надкрила з поздовжніми борознами. Жуки, що злиняли на імаго, мають молочно-біле забарвлення. Протягом кількох годин відбувається затвердіння покривів, у результаті вони набувають світло-бурого або червоного забарвлення, яке може зберігатися протягом 1-2 діб. Жуки, які щойно вилупилися, ще не повністю зміцніли, через короткий час виходять на

поверхню. Для захисту від ворогів вони використовують охоронні залози, що виділяють при небезпеці отруйний секрет.

В імаго, або дорослої комахи, чітко сформувалися голова, груди та черевце з 6 сегментів. Тіло комах чорно-матове, колір зазвичай однотонний і темний, варіюється від темно-бурого до чорного. Покривні крила досягають довжини 2 см і мають плоскі подовжені борозенки. Вторинні статеві ознаки проявляються насамперед у розмірах голови. У самця вона приблизно на 1 мм ширша, ніж у самки. Досягає довжини у 2,5 см. Самки виростають до 3,4 см, самці трохи дрібніші: граничний розмір - 3,3 см. Тривалість життя дорослого жука - 5 місяців.

Самця від самки легко відрізнити за передньою частиною голови та за розміром тіла. Самки (Рис.3.3) незначно менші за самців. (Рис.3.2). [8]



Рис.3.2 Самець



Рис.3.3 Самка

На лапках дуже чіпкі кігтики, завдяки яким жук може висіти на шматку яблука й утримуватися на субстраті, нахиленому під кутом у 100 градусів. У вусиках 11 сегментів (Рис.3.4).



Рис.3.4 *Zophobas morio*

Після смерті тіло розпадається на частини: голову, груди та черевце. Дорослі жуки виділяють специфічний запах.

Личинки, які щойно вилупилися, жовто-пшеничного кольору. На останній стадії розвитку вони мають три задні сегменти і голову темно-коричневого забарвлення. Усі інші сегменти на кінці черевця прикрашені коричневими поперечними кільцями і маленькими крапками.

Личинка жука має циліндричне тіло, з міцним хітином, досягає в довжину 6 см. Має 6 маленьких ніг і дві рудиментарні задніх псевдоніжки. Є потужні щелепи. Личинки всеїдні. Груди і черевце складають 12 сегментів, останні 2 сегменти темні (Рис. 3.5). Лялечка вільна, у неї видно всі зовнішні органи майбутнього жука. Досягає довжини в 3 см, біла. Має добре сформовані голову, груди і черевце з 8 сегментів. Перед вилупленням лапки та вусики темніють (Рис. 3.6).



Рис.3.5 Личинки



Рис.3.6 Лялечка

Жук Зофобас належить до комах з повним перетворенням (повним метаморфозом). Це означає, що з яйця у них виходить личинка, яка зовсім не схожа на дорослого жука і наприкінці свого росту перетворюється спочатку на нерухому лялечку, а вже потім на імаго (дорослу комаху).

Живе особина в середньому 4 місяці. За цей час вона проходить усі властиві кохам цикли. Личинка вилуплюється з яйця розміром 1,5 мм. У момент появи на світ комаха має довжину до 0,5 см і вагу 1,5 грама. Кожен сегмент тіла має дуже оригінальне забарвлення. На передньому краї присутня темна смуга, посередині можна розглянути візерунок з точок, а загальне

забарвлення комахи світло-жовтого кольору. Голова і нижня частина у личинки, що підросла, стають темнішими.

Лялечка забарвлюється в кремовий колір. Поверхня тіла покривається потужною щетиною. На цій стадії розмір комахи може досягати вже 3 см. У стадії імаго комаха доростає до 3,5 см і набуває матово-чорного забарвлення. Після линьки імаго спершу стають білими, а через кілька годин - червоними або світло-бурими. Таке забарвлення зберігається протягом двох діб. Комаха розвивається з повним перетворенням і весь цикл за сприятливих умов становить 3,5-4 місяці.

Загальний фон забарвлення - світло-жовтий, пшеничний. По передньому краю сегментів тіла йде темна смуга, посередині ряд із темних крапок. У личинки останнього віку задні сегменти черевця, голова і передньогруди сильно затемнені.

Перші 1,5-2 місяці після вилуплення з яєць личинки інтенсивно зростатимуть, потім їх зростання припиниться, а ще через 1,5 місяці вони почнуть лялькувати. Коли личинка готова до лялькування, вона набуває дугоподібної пози і перестає рухатися. Якщо залишити личинку в загальному контейнері з великою кількістю корму і родичами, що кишать, то лялькнути вона не зможе. Личинки зофобасу відчують, що поряд хтось перебуває, і ніколи не лялькують у загальному контейнері.

Період розмноження цього виду комах триває протягом усього року.

Найчастіше самка відкладає яйця в місцях проживання кажанів. Як живильний субстрат для личинок зазвичай використовується гуано.

В оптимальних умовах тривалість розвитку яйця - 8-12 діб, личинки - 45-60 діб, лялечки - 12-15 діб. Тривалість життя імаго - до 1 року, частіше 5-6 місяців. Розмір повної кладки - до 60 яєць. Протягом життя за сприятливих умов самка здатна відкласти 1300-1500 яєць. Статевозрілість - у віці 14-17 діб. Перше відкладання яєць - через 7-9 діб після спарювання. За своїми особливостями біології *Zophobas morio* Fabricius всеїдний, проте імаго переважно рослинної діти.

Дорослі жуки не конфліктні і рідко з'ясовують один з одним стосунки, але якщо почнуть битися, то легко відривають один одному вусики та лапки. При занадто високій щільності проживання дорослі самці знищують молодих імаго, оскільки бачать у них конкурентів, а личинки, що підросли, намагаються задовольнити свої зростаючі потреби в білку, поїдаючи свіжі кладки яєць.

Зофобас веде активний денний спосіб життя. Для орієнтації у просторі та пошуків їжі жуки *Zophobas morio* Fabricius використовують нюх. Головними органами нюху у них є вусики (антени). Дорослі жуки вміють літати, але не в змозі пересуватися гладкими поверхнями. У хвилини хвилювання, переляку вони виділяють речовину з різким неприємним запахом. Цю речовину важко відмити від рук, вона надовго зберігає свій запах.

### 3.2 Промислове розведення *Zophobas morio* Fabricius

У промислових масштабах *Zophobas morio* Fabricius розводиться на висівках (з додаванням тирси на одному з етапів), якими він одночасно годується. Однаково гарні як пухнасті висівки, так і мелені гранульовані (з останніми простіше працювати, оскільки можна підібрати оптимальну фракцію).

Виробництво складається з трьох частин.

**Маточник.** Як маточник використовуються, очевидно, жуки-виробники обох статей. Жук зофобаса досить великий (до 3 см), по гладких поверхнях не ходить (що скло, що пластик), зате чудово пересувається по брудних поверхнях (тож лотки треба періодично мити).

Жуки діляться на сім'ї з однаковою кількістю (кількість рахується за вагою, маса жука – 0,65 гр), скільки буде жуків у сім'ї залежить від необхідного виходу і розміру лотка. Наприклад, у лоток розміром 60x40x30 відмінно поміщається 500-1000 жуків. Як субстрат використовуються висівки

+ невелика кількість тирси. Далі в лоток засипаються личинки і кладеться картонний лоток з-під яєць, який служить одночасно укриттям і утримує вологість. Жукам потрібна вологість 60-70%, для цього їх необхідно регулярно обприскувати, краще щодня.

Жуків слід годувати раз на 1-2 дні, можна тертою морквиною. У принципі цього достатньо, але краще, якщо раціон буде більш різноманітним (яблука, апельсини, банани).

Температура в приміщенні з маточником має бути 27-28 градусів. Таким чином сім'ї стоять тиждень-два, потім жуків знімають руками (жуки моторошно смердять, тому працювати з ними треба строго в рукавичках), скидають в одну ємність, туди ж додають молодих жуків, які встигли вилупитися за цей термін. Далі субстрат з-під жуків пересипається в нижчі лотки (50-40-20) для подальшого розвитку, а жуки діляться на нові сім'ї.

**Розвиток личинок.** Субстрат з-під жуків з відкладеними яйцями (тобто висівки + тирса) стоїть в окремому приміщенні з температурою 26 гр. і звичайною вологістю. Личинки починають виходити приблизно через 2 тижні після відкладання яєць, це помітно за ворущінням у субстраті.

Личинки різного віку годуються 3 рази на тиждень тертою морквою, кількість моркви залежить від віку личинок. Личинкам варто давати тваринний білок, чи то шматок риби, фарш або рибне борошно.

Загалом, так личинки і ростуть, поки не зжеруть усі висівки (коли це відбувається, зрозуміти просто: весь субстрат складається з їхніх екскрементів). Тоді видаляють тирсу (або руками, або ситом, якщо тирсу відкалібрували), личинок просівають від їхніх екскрементів і розподіляють по лотках із висівками. Співвідношення личинок і висівок може бути, наприклад, 1,5 кг:3 кг.

**Заляльковування.** Серед жуків присутня смертність, це очевидно. Тому регулярно потрібні молоді жуки на заміну. Смертність становить приблизно 10% за 2 тижні (цифра зі стелі, я точно рахувала тільки в борошняника), з цього можна розрахувати, скільки личинок слід залишати для

заяляльковування. Для заяляльковування береться доросла, велика і товста личинка вагою в 1 гр. Коли личинка готова заялялькуватися, вона часто виповзає на поверхню, де їх можна збирати.

Личинки зофобаса - страшні індивідуалісти, заяляльковуватися серед своїх побратимів вони не будуть. Для нормального заяляльковування личинок слід по 1 помістити в окремі ємності: контейнери, банки з-під дитячого харчування, маленькі пластикові пляшечки тощо. Закривати ємності не обов'язково, втекти не повинні, якщо висота відповідна. Насипати в них теж нічого не треба. Ємності з майбутніми лялечками прибираються кудись у затишне містечко, можна в тому ж приміщенні, де розвиваються личинки, просто на інший стелаж. Температури достатньо 26°C, вологість висока не потрібна, від неї вони гниють.

Якщо личинки були насправді потрібного віку, то перші жуки полізуть через 3 тижні. Ще протягом тижня-двох долізуть всі інші. Молоді жуки тримаються мінімум тиждень окремо від дорослих, поки не почорніють і не зміцніють.

### **Висновок до розділу**

Вчені з Наньянського технологічного університету в Сінгапурі створили штучне бактеріальне середовище, що повторює кишечник личинок виду *Zophobas morio* Fabricius, здатних перетравлювати пластик. Масштабування цього підходу може підвищити успіхи у боротьбі із забрудненням Землі сміттєвим пластиком.

В останнє десятиліття личинки лускокрилих та твердокрилих комах, таких як *Tenebrio molitor*, *Spodoptera frugiperda*, *Galleria mellonella* та *Zophobas morio* Fabricius продемонстрували свою здатність розщеплювати пластик. Зокрема, скринінг мікробіома кишківника цих личинок показав нові бактеріальні штами, що спеціалізуються на цьому: *Klebsiella* sp. EMBL-1, *Massilia* sp. FS1903, *Pseudomonas* sp. EDB1, *Bacillus* sp. EDA4 та *Brevibacterium* sp. EDX.

## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

#### 4.1. Матеріали і обладнання

Список матеріалів та обладнання: Контейнер з жорсткого поліпропілену (пластик 5 – PP) розмірами 17\*23\*10см (Рис. 4.1); Технічна вага з точністю в 1г (Рис. 4.2); Термометр спиртовий з точність в  $\Delta T -1^{\circ}\text{C}$  (Рис. 4.3); Мірний стакан з носиком (Рис. 4.4); Пульвілізатор (Рис. 4.5); Зразок полістиролу (пластик 6 – PS) (Рис. 4.6); Цукор (Рис. 4.7); Личинки *Zophobas morio* Fabricius 200 особин (Рис. 4.8).



Рис. 4.1



Рис. 4.2



Рис. 4.3



Рис. 4.4



Рис. 4.5



Рис. 4.6



Рис. 4.7



Рис. 4.8

## 4.2 Опис лабораторної експериментальної установки

Лабораторна експериментальна установка представляє собою контейнер з жорсткого поліпропілену (пластик 5 – PP) на дно якого розміщуються шматок полістиролу (пластик 6 – PS), личинки *Zophobas morio* Fabricius, та термометр для фіксації температури, яка постійно утримується у межах 20-25°C.

Уміст лабораторної експериментальної установки (а саме полістирол та личинки) щоденно зрошували за допомогою пульвілізатора для збереження задовільного для личинок рівня вологості повітря та субстрату, приблизно 60-70%.

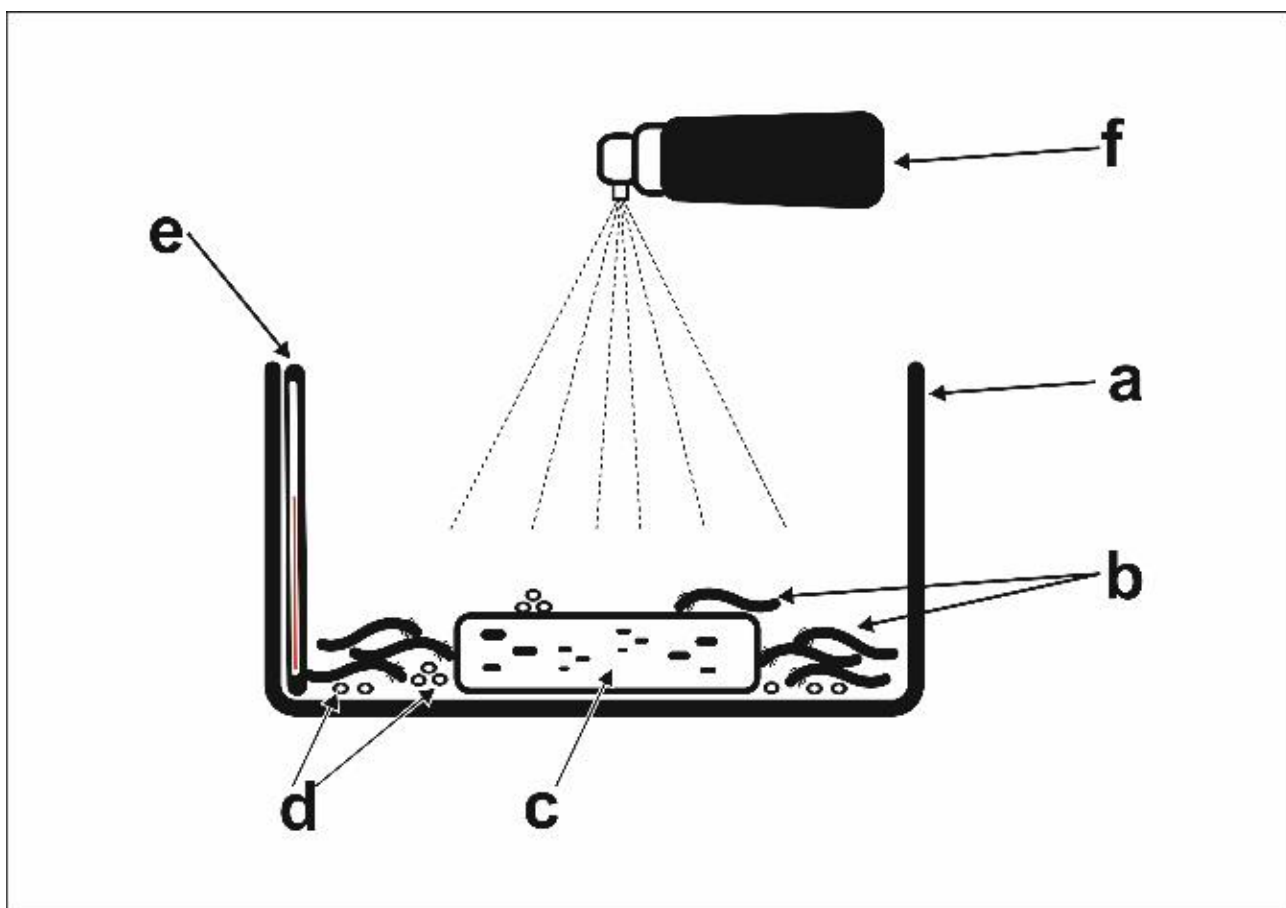


Рис. 4.10

- a). Контейнер з жорсткого поліпропілену (пластик 5 – PP);
- b). Личинки *Zophobas morio* Fabricius;
- c). Полістирол (пластик 6 – PS);
- d). Екскрименти;
- e). Термометр спиртовий;
- f). Пульвілізатор.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Підчас роботи над дипломним проектом було проведено два експерименти.

**Метою першого експерименту** є перевірити можливості личинок *Zophobas morio* Fabricius до виживання підчас харчування полістиролом (пластик 6 – PS) та його переробки у процесі, а також оцінка ефективності процесу.

**Метою другого експерименту** є спроба підвищити швидкість та ефективність процесу деструкції за рахунок зміни монополістирольної дієти, на дієту: полістирол з додаванням стимулятора.

У ході проведення експериментів: 1) фіксували температуру і вологість середовища в середині лабораторної експериментальної установки «біореактора»; 2) впровадили оцінку змін обсягів субстрату (полістиролу), кількості особин личинок, їхній розмір; 3) кількість продуктів деструкції субстрату – екскрементів личинок; 4) виконували фотофіксацію етапів біодеструкції; 5) визначали вхідну масу субстрату та личинок, вихідну масу личинок та продуктів розпаду; 6) фіксували час експерименту; 7) математичний аналіз отриманих результатів.

#### 5.1 Експеримент №1

Експеримент проводився протягом 33 днів згідно з методикою, наведеною вище. Ціль експерименту №1, перевірити можливості личинок до руйнування пластику і виживання на цій монодієті.

09.09.24, 5г полістиролу та 200 личинки *Zophobas morio* Fabricius, загальною вагою 80г, були закладені у підготовлену лабораторну експериментальну установку. Для зрошування було взято 50мл відстояної води. Воду використовували з центрального водогону, попередньо її

відстоювали у відкритій посудині протягом 24 год. для звільнення від залишкового хлору, продуктів її знезараження. Усі компоненти були зважені і зафіксовані на фото (Додаток Р).



Рис.5.1 – 09.09.24



Рис.5.2 – 10.09.24



Рис.5.3 – 17.09.24



Рис.5.4 – 21.09.24



Рис.5.5 – 24.09.24



Рис.5.6 – 27.09.24



Рис.5.7 –11.10.24

На другий день експерименту, 10.09.24 личинки почали поїдати полістирол.

Через сім днів були помічені перші радикальні зміни в лабораторній експериментальній установці, 17.09.24 личинки активно продовжували споживати полістирол, можна було бачити велику кількість білих випорожнень першого циклу травлення. Через чотири дні, 21.09.24 шматок полістиролу почав руйнуватися, а замість білих випорожнень першого циклу, бачимо велику кількість випорожнень другого циклу (повторно перетравлених) бежевого кольору.

24.09.24 шматок полістиролу продовжує активно руйнуватися. При перевірці лабораторної експериментальної установки 27.09.24 було помічено, що полістирол був повністю зруйнований.

Проте 11.10.24 личинки втратили інтерес до дрібних рештків полістиролу (можна припустити, що настала стадія насичення), вода для зрошування закінчилася і експеримент №1 було закінчено.

Таблиця 5.1

## Детальний огляд експерименту №1

Дні	Полістирол маса (г)	Випорожнення маса (г)	Полістирол об'єм (см3)	Випорожнення об'єм (см3)	Температура (°C)
1	5	0	100	0	25
2	4,9	0,07	98	1,46	24
3	4,8	0,15	96	2,92	22
4	4,75	0,18	95	3,65	23
5	4,65	0,25	93	5,11	23
6	4,6	0,29	92	5,84	22
7	4,5	0,37	90	7,3	20
8	4,35	0,47	87	9,49	21
9	4,2	0,58	84	11,68	22
10	4	0,73	80	14,6	20
11	3,85	0,84	77	16,79	20
12	3,75	0,91	75	18,25	20
13	3,5	1,1	70	21,9	22
14	3,35	1,2	67	24,09	20
15	3,1	1,39	62	27,74	22
16	2,75	1,64	55	32,85	21
17	2,25	2	45	40,15	23
18	2	2,19	40	43,8	22
19	1,7	2,41	34	48,18	23
20	1,35	2,66	27	53,3	20
21	1,05	2,88	21	57,67	25
22	0,75	3,1	15	62,05	24
23	0,7	3,14	14	62,78	21
24	0,55	3,25	11	64,97	22
25	0,4	3,36	8	67,16	20
26	0,3	3,43	6	68,62	23
27	0,25	3,47	5	69,35	22
28	0,25	3,47	5	69,35	22
29	0,2	3,5	4	70,1	23
30	0,2	3,5	4	70,1	22
31	0,2	3,5	4	70,1	25
32	0,2	3,5	4	70,1	25
33	0,2	3,5	4	70,1	22

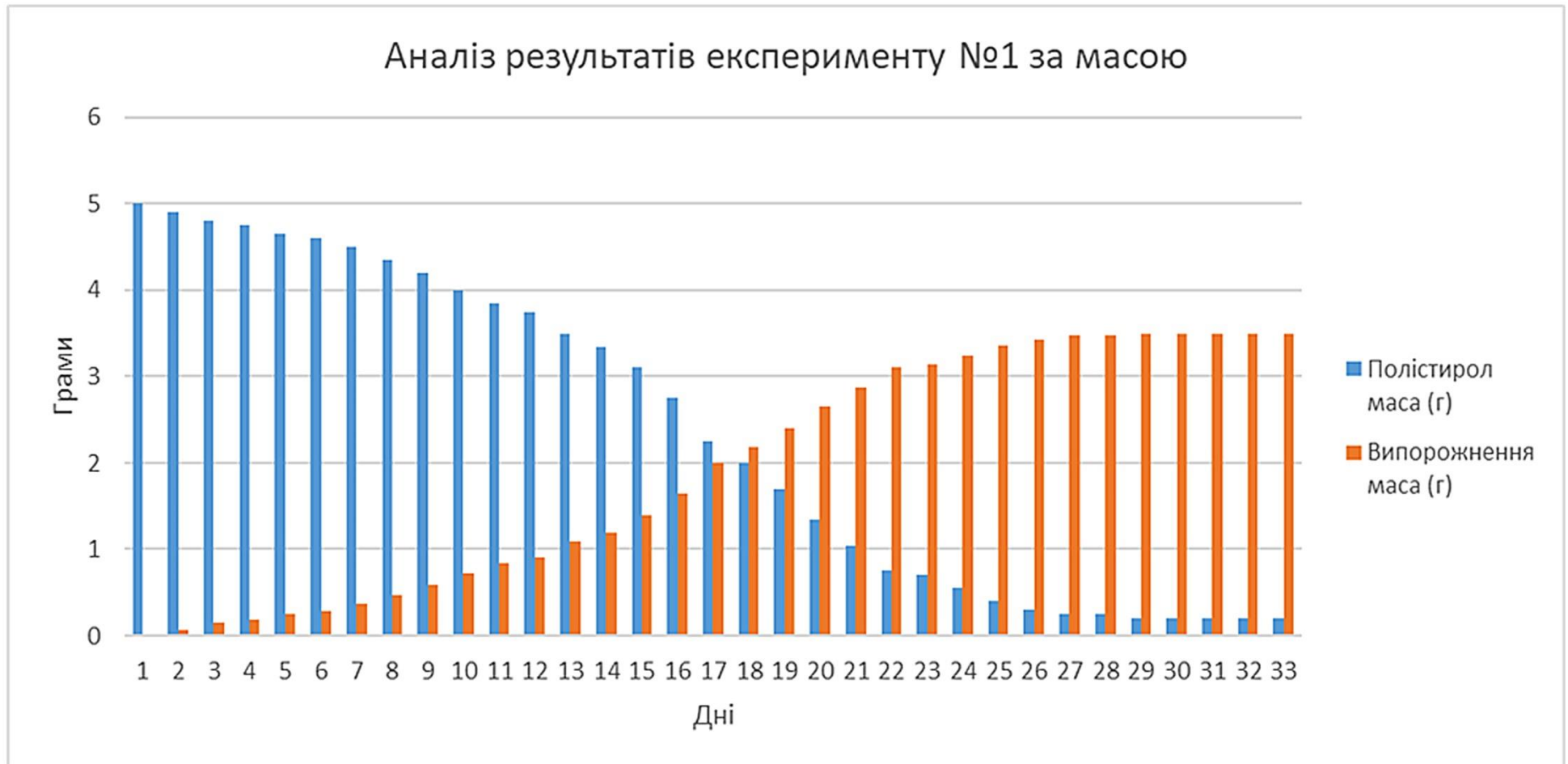


Рис.5.8 Зміна маси субстрату (полістиролу) та продуктів його розпаду

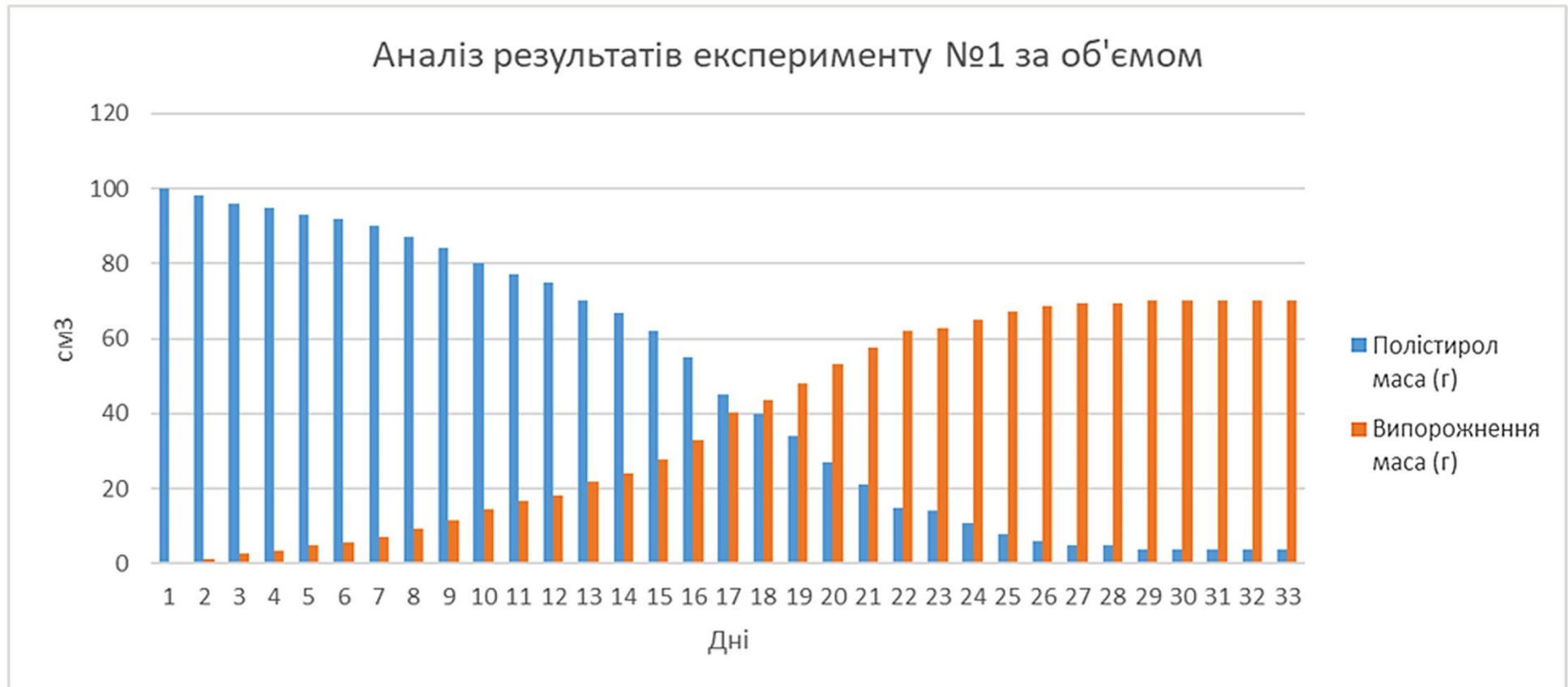


Рис.5.9 Зміна об'єму субстрату (полістиролу) та продуктів його розпаду

Ефективність процесу дорівнює.

$$\text{За масою: } \eta_m = ((m_{\text{п}} - m_{\text{в}}) / m_{\text{п}}) * 100 = ((5 - 3,5) / 5) * 100 = 30\%$$

$$\text{За об'ємом: } \eta_v = ((v_{\text{п}} - v_{\text{в}}) / v_{\text{п}}) * 100 = ((100 - 70,1) / 100) * 100 = 29,9\%$$

Щоб не порушувати чистоту експерименту, вносячи додатковий стрес для личинок, продукти зважувалися лише на початку та в кінці експерименту, а зміни у ході експерименту оцінювалися візуально та розрахунково.

Після закінчення експерименту усі 200 личинок були живі та їхня загальна вага збільшилася на 1г. Усі вихідні продукти (випороження та рештки полістиролу) були вилучені та висушені. Усі компоненти були зважені і зафіксовані на фото (Додаток Р).

Експеримент вважаємо успішним.

## 5.2 Експеримент №2

Експеримент проводився протягом 13 днів згідно з вказаною вище методикою. Ціль експерименту №2, перевірити можливість підвищення ефективності роботи личинок за допомогою додання в їхній раціон цукру у вигляді слабосолодкого розчину замість звичайної води. Концентрація розчину – 2г цукру на 50мл води.

20.10.24, усі вхідні компоненти експерименту №2 були аналогічні компонентам експерименту № 1, окрім води, в яку біло додано слабосолодкий розчин, що має стимулювати активність личинок. Усі компоненти були зважені і зафіксовані на фото (Додаток С).



Рис.5.9 – 20.10.24



Рис.5.10 – 21.10.24

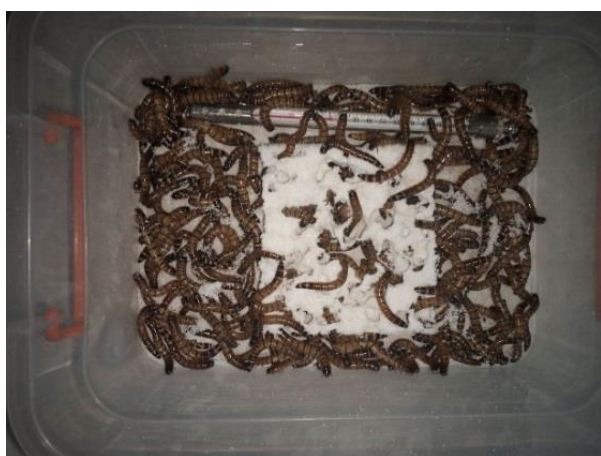


Рис.5.11 – 24.10.24

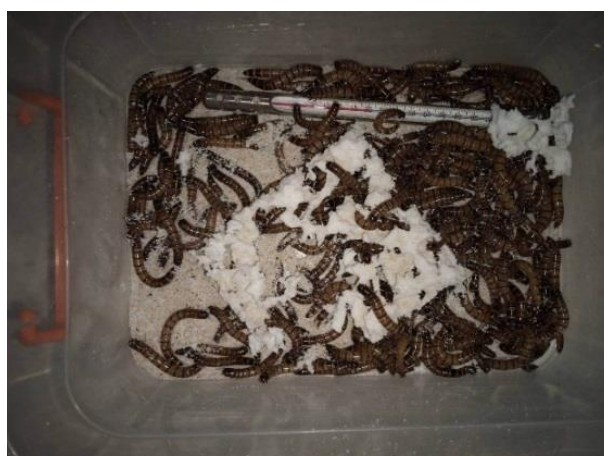


Рис.5.12 – 26.10.24



Рис.5.13 – 27.10.24



Рис.5.14 – 31.10.24



Рис.5.15 – 01.11.24

На другий день експерименту, 21.10.24 личинки почали поїдати полістирол значно швидше у порівнянні з аналогічним днем експерименту №1. Додавання цукру до раціону дає перші результати.

Вже через п'ять днів, 26.10.24 шматок полістиролу починає помітно руйнуватися. Активність личинок значно зросла порівняно з експериментом №1. При огляді лабораторної експериментальної установки 27.10.24 ми бачили, що шматок полістиролу майже повністю зруйновано, а 31.10.24 від полістиролу залишилися лише невеликі шматки.

Аналогічно до експерименту №1 щоб не порушувати чистоти експерименту продукти зважувалися на початку та вкінці експерименту, а зміни оцінювалися візуально та розрахунково.

Навідмінну від експерименту №1, вже на 13-тий день експерименту, 01.11.24 полістирол був повністю зруйнований. Таким чином, експеримент №2 вважаємо закінченим.

Таблиця 5.2

## Детальний огляд експерименту №2

Дні	Полістирол маса (г)	Випорожнення маса (г)	Полістирол об'єм (см3)	Випорожнення об'єм (см3)	Температура (°C)
1	5	0	100	0	21
2	4,75	0,18	95	3,65	22
3	4,5	0,36	90	7,3	21
4	4	0,73	80	14,6	20
5	3,5	1,1	70	21,9	23
6	2,75	1,64	55	32,85	22
7	2,25	2	45	40,15	21
8	1,5	2,56	30	51,5	21
9	1,25	2,74	25	54,75	22
10	1	2,92	20	58,4	22
11	0,75	3,18	13	63,51	23
12	0,25	3,47	5	69,35	21
13	0	3,65	0	73	25

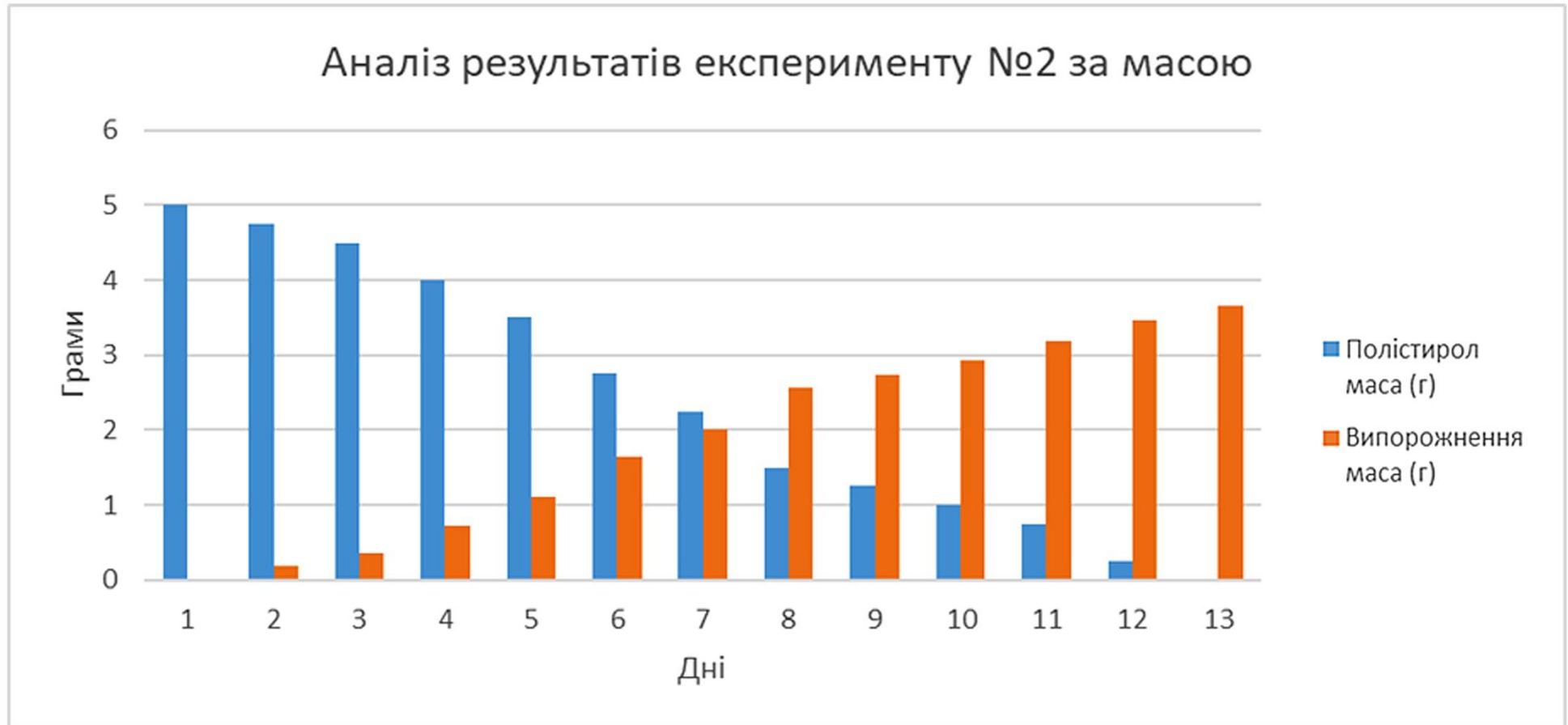


Рис.5.16 Зміна маси субстрату (полістиролу) та продуктів його розпаду

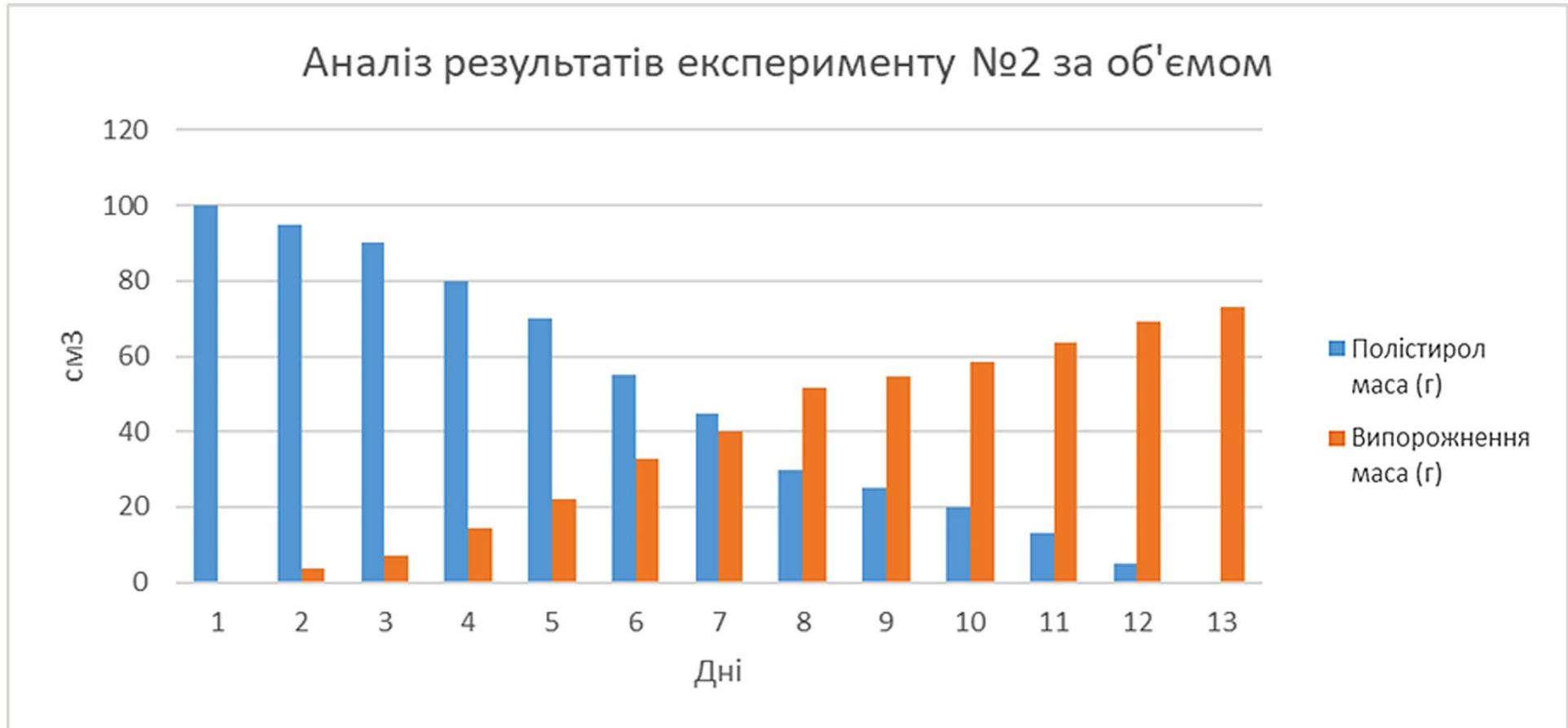


Рис.5.17 Зміна об'єму субстрату (полістиролу) та продуктів його розпаду

Ефективність процесу дорівнює.

За масою:  $\eta_m = ((m_{\text{п}} - m_{\text{в}}) / m_{\text{п}}) * 100 = ((5 - 3,65) / 5) * 100 = 27\%$

За об'ємом:  $\eta_v = ((v_{\text{п}} - v_{\text{в}}) / v_{\text{п}}) * 100 = ((100 - 73) / 100) * 100 = 27\%$

Після закінчення експерименту усі 200 личинок були живі та їхня загальна вага збільшилася на 16г (імовірно через цукор у раціоні). Активність личинок вдалося значно підвищити, час експерименту скоротився більше ніж в два рази, а ефективність досягла 100%. Усі вихідні продукти (випороження та рештки полістиролу) були вилучені та висушені. Усі компоненти були зважені і зафіксовані на фото (Додаток С).

Експеримент вважаємо успішним.

### 5.3 Обговорення результатів дослідження

Як зазначено вище, обидва експерименти успішно підтвердили свої гіпотези. Це дає нам зрозуміти, що личинки *Zophobas morio* Fabricius здатні до ефективного і повного руйнування полістиролу, а при додаванні у раціон цукру час розкладання можна прискорити більше ніж вдвічі, уникаючи стадії насичення до повного розкладання полістиролу.



Рис.5.17

Залишки полістиролу



Рис.5.18

Випороження личинок  
(експеримент №1)

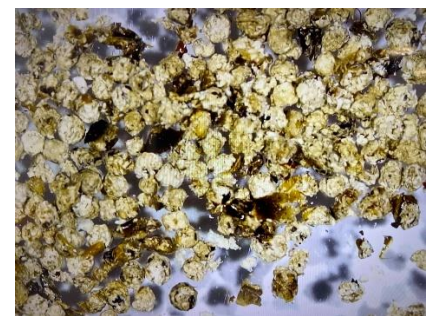


Рис.5.19

Випороження личинок  
(експеримент №2)

На мікроскопічних фото (масштаб усіх фото однаковій) залишків полістиролу з експерименту №1 та випорожнень личинок з експериментів №1 та №2 можна побачити радикальні зміни у структурі полістиролу, що є зовнішнім індикатором його руйнації.

На прикладі екскриментів з першого експерименту ми бачимо, що у порівнянні з залишками полістиролу, ми не бачимо характерої для нього пористої структури з волокон пластику. Нова структура складається з гранул, що за розміром і кольором більше нагадують дрібний пісок. Зміна у кольорі скоріше за все є результатом окисних процесів. Екскрименти з другого експерименту мають аналогічні зміни, але у порівнянні з першим експериментом, гранули темніші та мають більшу фракцію, можливо через цукор у раціоні. Глюкоза, як моносахарид, провокує в організмах тварий пришвидшення метаболізму, травлення в тому числі.

Імовірно, здібність до розкладання полістиролу доступна личинкам завдяки особливим штамам бактерій, що живуть у їхньому кишківнику. Це є прикладом симбіозу у якому личинка механічно подрібнює полістирол на дрібніші частинки, а бактерії всередині кишківника за допомогою спеціалізованих ферментів розкладають його на більш прості молекули, придатні для травлення. При цьому частина продуктів травлення перетворюється на енергію для життєдіяльності організмів та на вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), а решта виділяється з випорожненнями у зміненому вигляді.

В нашому випадку ефективність процесу становила від 27% до 30%, що є відносно невеликим результатом, проте це компенсується тим, що змінені в ході травлення відходи не мають стійкості аналогічної до початкового полістиролу. Це в свою чергу означає, що в залежності від їхнього складу їх можна буде використувати як матеріал для створення нових пластикових виробів (у випадку розщеплення полістиролу до стиролу, а стиролу до фінілацетату), або додавати в компост для повного руйнування рештків.

## **Висновок до розділу**

У ході першого експерименту було встановлено, що личинки *Zophobas morio* Fabricius здатні не тільки харчуватися відходами полістиролу (Полістирол 6 – PS), а і успішно виживати на цій дієті. В процесі вони здатні

навідь набирати вагу. Ефективність процесу склала в середньому 30%, але через настання стадії насичення полістирол не був повністю перероблений.

У ході другого експерименту ми встановили, що при зміні монополістирольної дієти на дієту полістирол з стимулятором (у ролі стимулятора взяли цукор) можна більше ніж вдвічі прискорити процес (у нашому випадку на 20 днів менше), та уникнути стадії насичення до повного розкладання полістиролу. Ефективність перероби при цьому зменшилася до 27% (на 3% менше), але вказані вище переваги компенсують це.

## ВИСНОВКИ

Незаперечним фактом є те, що навколишнє середовище та його біорізноманіття сильно порушені та пошкоджені внаслідок нестримного та неконтрольованого використання та утилізації небіорозкладних пластикових відходів, що підтверджує актуальність роботи над пошуками нових методів переробки відходів пластику.

Привабливість біологічних методів переробки, в свою чергу полягає у тому, що біодеградація найбільш екологічно чистим методом розкладання пластику, оскільки зазвичай не має токсичних побічних продуктів, що потребуватимуть зберігання, а також є відносно дешевим у порівнянні з іншими методами.

Особливість личинок *Zophobas morio* Fabricius в даному питанні полягає у їхній невибагливості, великій доступності, легкості розведення, відносно великому розмірі, що полегшують руйнування великих шматків полістиролу, тим самим виключаючи необхідність у додатковому подрібненні відходів, а також неможливістю метаморози до дорослої особини без вилучення окремих особин з групи, що дозволяє використовувати їх довше інших видів комах.

Однак, як і більшість багатоклітинних організмів, вони здатні до стресу, що заважало фіксувати маси продуктів експерименту відповідно не наражаючи їх на стрес і не порушуючи тим самим хід їхньої роботи і експерименту в цілому.

У ході роботи було встановлено, що середня ефективність перероби по масі та об'єму становить від 27 до 30% відповідно, але ця відносно невелика цифра компенсується тим, що отримані відходи можна використовувати у подальшому.

Також, можливим варіантом є виділення мікробів, що розкладають полістирол, визначення їхніх ферментів, які беруть участь у біодеградації, з подальшою ферментною інженерією та великомасштабним виробництвом, але це вже перспективи для майбутніх досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арустамова О.А. Види і масштаби негативного впливу людини та промисловості на природне середовище. Природокористування: підручник. Миколаїв, 2018. 80–87 с.
2. Гаврилишин І.М. Використання пластику. Проблеми забруднення відходами. Київ, 2016. Випуск. 12. 65 с.
3. Глік, Б. Молекулярна біотехнологія. Принципи та застосування: [пер.сангл.] / Б. Глік, Дж. Пастернак. - М. : Світ, 2002. - 589 с., Іл. ISBN 5-03-003328-9.
4. Нікітченко О. Ю. Конспект лекцій з дисципліни «Промислова екологія» (для студентів 3 курсу денної форми навчання. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2016. 65–89 с.
5. Широких І.Г. Потенціал біорозкладання пластику базидіальними грибами та актинобактеріями (огляд) Київ. 2024 г..
6. Філатов В.І. Технологічна підготовка виробництва пластмасових виробів. - Л. : Машинобудування, 1990.
7. Ситар В.І. Промислова екологія при виробництві та переробці полімерних матеріалів // В.І. Ситар, М.В. Бурмістр, О.С. Кабат. – Дніпропетровськ : Вид-во ДВНЗ УДХТУ, 2012. – 117 с.
8. Самойлюк А.О. Способи використання матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія, Видавництво «Політехніка». 2009. 265 с.
9. Анісімов Ю.А., Анісімов Ю.М. Вплив наповнювачів на кінетику формування та властивості полімерних композитів на основі модифікованих епоксидних смол. //Пластичні маси. - 2007, №2,С.47-50.
10. А.Т., Степанова С.А. Екологія, охорона природи, екологічна безпека. М.: МНЕПУ, 2019. 648 с.
11. Радовенчик В.М., Гомеля М.Д. Тверді відходи: збір, переробка, складування: навч. посібн. Київ: Видавництво "Кондор". 2010. 552 с.

12. Саприкін А. І., Самойлов П. П. Мікро- і нанопластики в навколишньому середовищі (Аналітика, джерела, розподіл і проблеми екології) = Micro- and nanoplastics in the environment (Analytics, sources, distribution and environmental issues) : аналітичний огляд : ДПНТБ СО РАН, 2021. - 115 с. - (Сер. Екологія. Вип. 110).
13. Турілова Х.О., Рязанова Н.Л. Тверді побутові відходи в Україні: 95 Потенціал розвитку галузі поводження з твердими побутовими відходами. Київ 2015. 152с
14. Белов Д. В., Беляєв С. Н. Перспективи переробки пластикових відходів на основі поліетиленглікольтерефталату із застосуванням живих систем (огляд) June 2022 Proceedings of universities Applied chemistry and biotechnology 12(2):238-253 DOI:10.21285/2227-2925-2022-12-2-238-253
15. Канцельсон В.Ю., Балаєв Г.А. Пластичні маси: Властивості та застосування: Довід. : Хімія, 1978. - 384 с.
16. Суберляк О.В., П. І. Баштаник. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів: підруч. для студентів ВНЗ; М. освіти і науки України. 2-ге вид. Львів: Растр-7, 2016. 456 с.
17. Крижановський В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паніматченко А.Д. Виробництво виробів з полімерних матеріалів: Навч. посібник.: 2004. - 464 с.
18. Кузнецов А.Є., Градова Н.Б., Лушніков С.В. (2012) Прикладна екобіотехнологія: 1. навчальний посібник: 2 т., Т. 1. Біном, 629 с. [Kuznesov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V. (2012) Applied ecobiotechnology: Tutorial in 2 volumes, V.1. Vinom, 629 p.].
19. Власопулос А., Малінаускайте Я., Жабненська-Гура А., Юхара Х. Оцінка життєвого циклу пластикових відходів та відновлення енергії. Energy. 2023;277: 127576.
20. Алі, С. С., Ельсамахі, Т., Аль-Тохамі, Р., Чжу, Д., Махмуд, Ю. А., Кутра, Е. та ін. (2021). Біодеградація пластикових відходів: механізми, проблеми та перспективи на майбутнє. Наука. Загальна екологія. 780, 146590. doi: 10.1016/ j.scitotenv.2021.146590

21. UJRN/ hvnltu 2014 162(5)13. Хоменко І. О., Бабаченко Л. В., Падій Я. В. Проблеми та напрями переробки твердих побутових відходів в Україні. Мукачівський державний університет. Економіка і суспільство. 2017. С. 454.
22. Наповнювачі для полімерних композиційних матеріалів (довідковий посібник). Під ред. Г.С. Каца і Д.В. Мілевський. - М. : Хімія, 1981.
23. Погляд на біодеградацію пластику: склад спільноти та функціональні можливості мікробіома суперчерв'я (*Zophobas morio*) у випробуваннях з годування пінополістиролом Дослідницька стаття Відкритий доступ Логотип *Microbial Genomics* Том 8, випуск 6.
24. Директива (ЄС) 2019/904 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року щодо скорочення впливу деяких пластмасових виробів на довкілля.
25. Директива 2008/98/ЄС про відходи Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. URL: [https://eurlex.europa.eu/LexUriServ.do&uri=CELEX:32008L0098:en:NOT](https://eurlex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0098:en:NOT) (дата зверення 14.11.2020).
26. Пластмаси, полімери і синтетичні смоли. Хімічні назви. Терміни та визначення : ДСТУ 2406-94. – [Чинний від 01.01.1995]. – К. : Держстандарт України, 1996. – 14 с. – Національний стандарт України
27. Пластмаси. Словник термінів : ДСТУ ISO 472:2008 (ISO 472:1999, IDT). – [Чинний від 01.01.2010]. – К. : Держстандарт України, 2010. – 24 с. – Національний стандарт України
28. Ножевніков О.М. Біотехнологія та мікробіологія анаеробної переробки органічних комунальних відходів: колективна монографія / загальна ред. та складл. А.Н. Ножевнікова, А.Ю. Калістова, Ю.В. Летіє, М.В. Кевбіна; . – М.: Університетська книга, 2016. – 320 с.
29. Tournier V, Duquesne S, Guillaumot F, Cramail H, Taton D, Marty A та ін. Потужність ферментів для деградації пластмас. *Chem Rev.* 2023;123:5701
30. Карасевич, Ю.М. Основи селекції мікроорганізмів, що утилізують

синтетичні органічні сполуки/Ю.М. Карасевич. – : наука, 2002. – 144 с. ISBN 5-76802-386-8

31. Микульонок І.О. Основні методи і шляхи використання полімервмісних відходів / І.О. Микульонок, Г.Л. Рябцев // Наукові вісті НТУУ "КПІ" : наук.-техн. журнал. – 2001. – № 2. – С. 135-147.

32. Пиріков О.В. Огляд сучасних тенденцій використання полімерів у пакувальній галузі /О.В. Пиріков, В.Н. Ардатов //Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. – № 1 (37). – 2009. – С. 31-37.

33. Радовенчик В.М. Тверді відходи: збір, переробка, складування : навч. посібн. / В.М. Радовенчик, М.Д. Гомеля. – К. : Вид-во "Кондор", 2010. – 552 с.

34. Білявський Г.О., Бутченко Л.І., Навроцький В.М. Основи екології: теорія та практикум. Навчальний посібник. К.: Лібра, 20012. 352 с.

35. Хром'як У.В. Вторинне використання відходів полістирольних матеріалів /У.В. Хром'як, І.Д. Борщизин // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності : зб. на- ук. праць. – Львів : Вид-во Львівського ДУ БЖД. – 2012. – № 6.– С. 208-213.

36. Михайлова Є. О. Аналіз методів перероблення пластикових відходів / Є. О. Михайлова, Д. М. Дейнека, Г. М. Панчева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.

37. Романів М. В. Проблеми утилізації сміття в Україні. III Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інновації та традиції в сучасній науковій думці» Секція: Соціум. Наука. Культура, Екологія. 2012. URL: <http://intkonf.org/romaniv-mv-problema-utilizatsiyi-smitty-a-v-ukrayini>.

38. Торосян, Г.О. Розробка ефективного способу утилізації полімерних відходів/Г.О. Торосян, А.А. Ісаков // Хімічна безпека. - 2017. - Т. 1, № 2. - С. 198-204.

39. Насіров М.Ф. Інерційний та інноваційний сценарії поводження з відходами пластику у середньо- та довгостроковій перспективі. Економіка та держава № 8/2018. 152 с.
40. Екологія та економіка природокористування: Підручник для вузів / Під ред. Е.В. Гірусов, 2-е вид., Перераб. і доп. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002
41. Михайлюк В.М. Механізм і кінетичні закономірності процесу переробки твердих органічних відходів методом високотемпературного піролізу. Автореф. дис. к.т.н. 05.17.08 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Ч: 2017. 18с.
42. Maciel-Vergara G, Jensen AB, Eilenberg J. Каннибализм как возможный путь проникновения условно-патогенных бактерий в насекомых-хозяев на примере *Pseudomonas aeruginosa*, патогена гигантского мучного хрущака *Zophobas morio*. *Insects* 2018; 9:88 [Просмотреть статью] [PubMed].
43. Вебб Х.К., Арнотт Д., Кроуфорд Р.Д., Иванова С.П. Деградація пластику та її екологічні наслідки з особливим посиленням на поліетилентерефталат. Полімери (Базель). 2013;5:1-18.
44. Моханан Н., Монтазер З., Шарма П.К., Левін Д.Б. Мікробіологічне та ферментативне розкладання синтетичних пластмас. Фронтальна мікробіологія 2020; 11: 580709.
45. Рагаерт К., Дельва Л., Ван Гім К. Механічна та хімічна переробка твердих пластикових відходів. Поводження з відходами. 2017;69:24-58.
46. Йошида С., Хірага К., Такехана Т., Танігуті І., Ямадзі Х., Маеда Ю. та ін. Бактерія, яка розкладає та асимілює поліетилентерефталат. Наука. 1979;2016 (351): 1196-9.
47. Джавід Ф., Алі Р., Рехман А., Наїм Р., Алі І., Наз І. Оцінка розкладання пластику місцевими бактеріями із місць поховання відходів. *Emergency Contam.* 2024; 10: 100323.
48. Біодеградація полістиролу за допомогою *Pseudomonas* sp, виділених з кишечника суперчерв'яків (личинок *Zophobas atratus*). Технологія охорони навколишнього природного середовища. 2020; 54: 6987-96.

49. Rumbos CI, Athanassiou CG. Суперчерв, *Zophobas morio* (Coleoptera: Tenebrionidae): «сплячий гігант» у джерелах поживних речовин. *J Insect Sci* 2021; 21:13
50. Плаван В. П. Переробка полімерних відходів: сучасний стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / В. П. Плаван, Б. М. Савченко, В. В. Денисюк // Київський національний університет технологій і дизайну. – 2020. – Режим доступу :<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2021/paper/viewFile/13658/11491>.
51. Miao S-J, Чжан Y-L. Вплив живлення та деградації на пластик *Zophobas morio*. *J Environ Entomol* 2010; X174:
52. Навід М., Навід Р., Азіз Т., Азім А., Афзал М., Васім М. та ін. Біодеградація ПВХ шляхом ідентифікації in-vitro *Bacillus albus* та комп'ютерного аналізу шляху ферменту АВН. *Біодеградація*. 2024;35:451-68.
53. Орландо М., Молла Г., Кастеллані П., Пірілло В., Торретта В., Ферронато Н. Біотехнологія мікробних ферментів для досягнення циклічності пластикових відходів: Поточний стан, проблеми та перспективи. 2023. <https://doi.org/10.3390/ijms24043877>
54. Особливості розвитку личинок *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) на різних стадіях <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201521839156092>.
55. Одноразові пластмаси – проблеми та рішення. [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.d2eb5bc1-675704be-e45ae897-74722d776562/https/www.geeksforgeeks.org/single-use-plastics-concerns](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.d2eb5bc1-675704be-e45ae897-74722d776562/https/www.geeksforgeeks.org/single-use-plastics-concerns).
56. Останні тенденції в мікробіологічному та ферментативному розкладанні пластику: вирішення проблем, пов'язаних із забрудненням пластику <https://academic.oup.com/jinsectscience/article/21/2/13/6218202>
57. Зофобас/ тваринний світ вікі <https://animalsworld.fandom.com/ru/wiki/%D0%97%D0%BE%D1%84%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D1%81>
58. Зофобас/ ЕкоClub .by <https://exoclub.by/zophobas-morio.html>
59. Пластмаси - швидкі факти 2023 року - Пластмасова Європа.

<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>.

60. Пластикове забруднення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://recyclemag.ru/news/minpriodi-sostavilo-spisok-regionov-pererabotke>.

61. Методи розкладання пластикових відходів  
<https://cyberleninka.ru/article/n/metody-razlozheniya-plastikovyyh-othodov>

62. Що таке біодеградація пластику  
[https://ru.gbpitester.com/blog/what-is-plastic-biodegradation-\\_b146](https://ru.gbpitester.com/blog/what-is-plastic-biodegradation-_b146)

63. Ситуація з пластиком у країнах ВЕКЦА та у світі: законодавство, виробництво, споживання та утилізація. <https://www.segodnya.ua/economics/enews/shtraf-8500-grn-v-ukraine-hotyat-zapretit-pakety-1337516.html>.

64. Liu M, Zhang T, Long L, Zhang R, Ding S. Efficient enzymatic degradation of poly ( $\epsilon$ -caprolactone) by an engineered bifunctional lipase-cutinase. *Polym Degrad Stab.* 2019;160:120–5.

65. Tao X, Ouyang H, Zhou A, Wang D, Matlock H, Morgan JS, et al. Polyethylene degradation by a Rhodococcous Strain isolated from naturally weathered plastic waste enrichment. *Environ Sci Technol.* 2023;57:13901–11.

66. Khandare SD, Chaudhary DR, Jha B. Marine bacterial biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *Biodegradation.* 2021;32:127–43.

67. Skariyachan S, Megha M, Kini MN, Mukund KM, Rizvi A, Vasist K. Selection and screening of microbial consortia for efficient and ecofriendly degradation of plastic garbage collected from urban and rural areas of Bangalore. *India Environ Monit Assess.* 2015;187:1–14.

68. Tiong E, Koo YS, Bi J, Koduru L, Koh W, Lim YH, et al. Expression and engineering of PET-degrading enzymes from *Microbispora*, *Nonomuraea*, and *Micromonospora*. *Appl Environ Microbiol.* 2023;89(11):1-12.

69. Mohanan N, Wong MCH, Budisa N, Levin DB. Polymer-degrading enzymes of *Pseudomonas chloroaphis* PA23 display broad substrate preferences. *Int J Mol Sci.* 2023;24:4501.

70. Gao R, Liu R, Sun C. A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene. *J Hazard Mater.* 2022;431:128617.
71. H V, Ramalingappa, Krishnappa M, Thippeswamy B. Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum*—SEM, FTIR, and NMR analyses. *Environ Monit Assess.* 2014;186:6577–86.
72. Jeon HJ, Kim MN. Functional analysis of alkane hydroxylase system derived from *Pseudomonas aeruginosa* E7 for low molecular weight polyethylene biodegradation. *Int Biodeterior Biodegradation.* 2015;103:141–6.
73. Parthasarathy A, Miranda RR, Eddingsaas NC, Chu J, Freezman IM, Tyler AC, et al. Polystyrene degradation by *Exiguobacterium* sp. RIT 594: Preliminary evidence for a pathway containing an atypical Oxygenase. *Microorganisms.* 2022;10:1619.
74. Adıgüzel AO, Şen F, Könen-Adıgüzel S, Kıdeyş AE, Karahan A, Doruk T, et al. Identification of cutinolytic esterase from microplastic-Associated microbiota using functional metagenomics and its plastic degrading potential. *Mol Biotechnol.* 2023;1–18. <https://doi.org/10.1007/s12033-023-00916-7>.
75. Nikolaiivits E, Taxeidis G, Gkountela C, Vouyiouka S, Maslak V, Nikodinovic-Runic J, et al. A polyesterase from the Antarctic bacterium *Moraxella* sp. degrades highly crystalline synthetic polymers. *J Hazard Mater.* 2022;434:128900.
76. Zhang Y, Lin Y, Gou H, Feng X, Zhang X, Yang L. Screening of polyethylene-degrading bacteria from *Rhizopertha dominica* and evaluation of its key enzymes degrading polyethylene. *Polymers (Basel).* 2022;14:5127.
77. Frey B, Aiesi M, Rast BM, Rüthi J, Julmi J, Stierli B, et al. Searching for new plastic-degrading enzymes from the plastisphere of alpine soils using a metagenomic mining approach. *PLoS One.* 2024;19:e0300503.
78. Lu H, Diaz DJ, Czarnecki NJ, Zhu C, Kim W, Shroff R, et al. Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization. *Nature.* 2022;604(7907):662–7.

79. Howard SA, McCarthy RR. Modulating biofilm can potentiate activity of novel plastic-degrading enzymes. *NPJ Biofilms Microbiomes*. 2023;9(1):1–10.
80. Pérez-García P, Danso D, Zhang H, Chow J, Streit WR. Exploring the global metagenome for plastic-degrading enzymes. *Methods Enzymol*. 2021;648:137–57.
81. Zampolli J, Orro A, Manconi A, Ami D, Natalello A, Di Gennaro P. Transcriptomic analysis of *Rhodococcus opacus* R7 grown on polyethylene by RNA-seq. *Sci Rep*. 2021;11(1):1–14.
82. Wright RJ, Bosch R, Gibson MI, Christie-Oleza JA. Plasticizer degradation by marine bacterial isolates: A proteogenomic and metabolomic characterization. *Environ Sci Technol*. 2020;54:2244–56.
83. Buchholz PCF, Feuerriegel G, Zhang H, Perez-Garcia P, Nover LL, Chow J, et al. Plastics degradation by hydrolytic enzymes: The plastics-active enzymes database—PAZy. *Proteins*. 2022;90:1443–56.
84. Naveed M, Naveed R, Aziz T, Azeem A, Afzal M, Waseem M, et al. Biodegradation of PVCs through in-vitro identification of *Bacillus albus* and computational pathway analysis of ABH enzyme. *Biodegradation*. 2024;35:451–68.
85. Amjad K, Shah T, Khan Z, Haider G, Sheikh Z, Adnan F, et al. Genome-wide identification and characterization of lipases from ascomycetes, and molecular docking analysis with various plastics. 2024. Preprint <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3951591/V1>.
86. Watts T, Khoba K, Purty RS. In silico approach for evaluating the degradation efficiency of plastic degrading enzyme mono(2-hydroxyethyl) terephthalic acid hydrolase (MHETase) of selected bacteria. *Bioremediat J*. 2023. <https://doi.org/10.1080/10889868.2023.2279201>.
87. Pawano O, Jenpuntarat N, Streit WR, Pérez-García P, Pongtharangkul T, Phinyocheep P, et al. Exploring untapped bacterial communities and potential polypropylene-degrading enzymes from mangrove sediment through metagenomics analysis. *Front Microbiol*. 2024;15:1347119.

88. Salam LB. Metagenomic investigations into the microbial consortia, degradation pathways, and enzyme systems involved in the biodegradation of plastics in a tropical lentic pond sediment. *World J Microbiol Biotechnol.* 2024;40(6):1–37.

## **ДОДАТКИ**

Таблиця А.1

## Полімери та їх властивості

Назва полімеру	Вид та властивості
<b>Поліетиленові</b> полімери. Виробляється за допомогою полімеризації етилену.	Маса схожа на віск, досить пластична, несприйнятлива до дії вологи та хімічної агресії.
<b>Поліпропіленові</b> полімери. Виготовляється за допомогою полімеризації пропілену	Білий порошок із різним діаметром фракцій, невелика вага. Непроникність при впливі будь-якого газу та пари.
<b>Полівінілхлоридні</b> полімери. Виробляється за допомогою полімеризації вінілхлориду.	Гранулами різного діаметра. Мають підвищену щільність, відмінну морозостійкість. Діелектрик
<b>Поліізобутиленові</b> полімери. Виробляється за допомогою полімеризації ізобутилену	Еластичний, візуально нагадує каучук.
<b>Полістирольні</b> полімери. Виготовляється за допомогою полімеризації стиролу	Знебарвлені гранули. Ключові недоліки – відносна крихкість
<b>Полівінілацетатні</b> полімери. Складний ефір полівінілового спирту та оцтової кислоти	Низька стійкість до дії кислот та лугів, властива прозорість, здатність фарбуванню. Можуть розчинятися у деяких видах спиртів
<b>Поліакрилатні</b> полімери. Одержують за допомогою полімеризації двох кислот: акрилової та метакрилової	Маса схожа на уламки скла Не мають кольору і мають достатню прозорість
<b>Фенолоформальдегідні</b> полімери. Реакції сполуки фенолу та формальдегіду.	Гранули різного діаметру. Міцності та стійкості до теплової дії
<b>Аміноформальдегідні</b> полімери. Поліконденсація базового компонента з формальдегідом	Безбарвний розчин у рідкому стані, може мати гранульований вигляд
<b>Поліуретанові</b> полімери. Отримують шляхом реакції діізоціанату з окремими видами спирту.	Гранули різних фракцій. Висока плавність, здатність до формування. Плавиться за невисоких температур. Не реагує з деякими лугами та кислотами

Таблиця Б.1

## Полімери та їх властивості








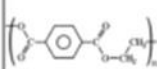

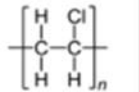
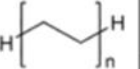
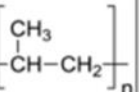
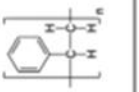
Полімер	Основні властивості
<p data-bbox="236 443 699 544">Поліетилен (високої щільності ПЕВП/HDPE, низькій щільності ПЕНП/LDPE).</p> $n \text{CH}_2=\text{CH}_2 \xrightarrow{\text{kat.}} \left( -\text{CH}_2-\text{CH}_2- \right)_n$ <p data-bbox="276 678 659 707">ethylene polyethylene</p>	<p data-bbox="751 443 1410 544">Полімеризація етиленового газу під тиском або підвищеною температурою із застосуванням металевих каталізаторів.</p> <p data-bbox="751 551 1505 1171">Можуть мати однакові значення молекулярної ваги. На їх властивості впливає характер розгалуження бічного ланцюга. Різниця – у значеннях густини. Молекули лінійної структури ущільнюються компактно, утворюючи ПЕВП (щільність 0,941 – 0,959 г/см<sup>3</sup>), розгалужені ланцюжки перешкоджають тісному ущільненню, у ПЕНП – (0,910 – 0,925 г/см<sup>3</sup>). ПЕВП є стійким до хімічних речовин, витримує температурний діапазон від – 80°C до +110°C, має відносну масло- та жиростійкість. Найчастіше використовується виготовлення технічних виробів. ПЕНП зберігає міцність при низьких температурах (до –70°C), хімічно стійок, схильний до впливу олії та жиру, є водо- та паронепроникним. Застосовується виготовлення тари – бочок, судин, каністр, з метою здійснення транспорту та зберігання розчинів кислот і лугів. Піддається переробці у «вторинну гранулу».</p>
<p data-bbox="309 1180 624 1245">Поліетилентерефталат (ПЕТ/РЕТЕ/РЕТ).</p> 	<p data-bbox="751 1180 1505 1574">Полімеризація терефталевої кислоти та етиленгліколю. Наявність кисню у структурі речовини надає матеріалу здатність витримувати низькі температури, а бензольного кільця – високі. Не розчиняється у воді та в розчинах слабких кислот, є практично газонепроникним. Масло- та жиростійок. Матеріал нешкідливий лише для нетривалого зберігання без нагріву, без прямих сонячних променів. Найпоширеніше застосування ПЕТ як сировини для пластикових пляшок. Може бути повторно перероблено.</p>
<p data-bbox="245 1583 687 1615">Полівінілхлорид (ПВХ/PVC/V )</p> $\text{CH}_2=\text{CHCl} \longrightarrow \left[ -\text{CH}_2-\text{CHCl}- \right]_n$ <p data-bbox="229 1727 675 1756">vinyl chloride polyvinyl chloride</p>	<p data-bbox="751 1583 1353 1648">Полімеризація газоподібного синтетичного вінілхлориду.</p> <p data-bbox="751 1655 1505 1977">Використання різних типів пластифікаторів дозволяє отримати різноманітні види плівок: тверді, м'які, розтяжні та тендітні. За відсутності пластифікатора у складі застосовуються стабілізатори, щоб запобігти частковому розкладу з виділенням HCl. Товсті плівки ПВХ застосовуються для виготовлення упаковок побутової хімії, мастил. Цей матеріал не стійкий до нагрівання, розпадається легко, процес вторинної переробки має труднощі..</p>

## Продовження додатку Б

<p style="text-align: center;">Поліпропілен (ПП/PP)</p> $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 \longrightarrow \left[ \text{H}_2\text{C}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$ <p style="text-align: center;">propylene                      polypropylene</p>	<p>Полімеризація газоподібного пропілену. Має поліпшені характеристики масло- і жиростійкості, механічної щільності. Невисоку здатність витримувати низькі температури. Водо-, паронепроникний, не пропускає кисень. Високу температуру плавлення (~170°C), продукти, які упаковані даним пластиком витримують короткочасну обробку температурою 130°C.</p> <p>Широко застосовується в харчовій промисловості для упаковки молочних продуктів, олії, кондитерських виробів, сухих сніданків та інших продуктів, де необхідні бар'єрні властивості матеріалу, також із ПП виготовляють контейнери, часто називається «харчовим пластиком».</p>
<p style="text-align: center;">Полістирол(ПС/PS).</p> $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5 \longrightarrow \left[ \text{H}_2\text{C}-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_n$ <p style="text-align: center;">styrene                                      polystyrene</p>	<p>Полімеризації рідкого синтетичного стиролу. Є досить твердим та жорстким полімером. Має невисоку проникність для газів, має властивості паропроникності. Хімічно стійкий до кислот та лугів. Полістирол, отриманий методом спінювання, широко зустрічається як матеріал для виготовлення одноразового посуду, захисної та термоформувальної упаковки – підноси для яєць, лотки для м'яса, птиці та риби.</p>

Таблиця В.1

## Полімери: їх маркування, структура

Identification Code							
	<b>PET</b>	<b>PE-HD</b>	<b>PVC</b>	<b>PE-LD</b>	<b>PP</b>	<b>PS</b>	<b>0</b>
Polymer Name	Polyethylene terephthalate	High-density polyethylene	Polyvinyl Chloride	Low-density polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Other plastics (eg. PLA, polycarbonate)
Structure							-
Melting temperature	245-265°C	130-140°C	100-260°C	85-125°C	165-175°C	240°C	-
Density	1.3-1.4 g/cm <sup>3</sup>	0.94-0.97 g/cm <sup>3</sup>	1.3-1.7 g/cm <sup>3</sup>	0.917-0.940 g/cm <sup>3</sup>	0.9-0.91 g/cm <sup>3</sup>	1.04-1.05 g/cm <sup>3</sup>	PLA- 1.23-1.25 g/cm <sup>3</sup>
Recyclability	Commonly recycled	Commonly recycled	Sometimes recycled	Occasionally recycled	Occasionally recycled	Commonly recycled (but difficult)	Difficult to recycle

Додаток Г  
Таблиця Г.1

Типи пластмас, їхні властивості, використання, вторинне перероблення

Типи пластмас	Використання	Властивості (характеристика)	Вторинна переробка
Поліетилентерефталати	Одноразовий посуд, столові прилади	Прозорий, міцний, стійкий до розчинників, бар'єр для газу і вологи, розм'якшується за 80 °С	Наповнення подушок і спальних мішків, пляшки для безалкогольних напоїв, килимові покриття, теплоізоляція будівель
Поліетилен високої щільності	Господарські сумки, пакети для заморозки, відра, пляшки для молока, контейнери для морозива, пляшки для соку, пляшки для хімікатів і мийних засобів, ящики,	Твердий або напівеластичний, стійкий до хімічних речовин та вологи, непрозорий, розм'якшується за 75 °С, легко забарвлюється, обробляється, формується	Сміттєві баки, компостні баки
1. Полівінілхлорид (ПВХ); 2. Пластифікований полівінілхлорид (ПВХ-П)	Контейнер для косметики, водопровідні труби і фітинги, електропроводка, блістерна упаковка, облицювання стін, покрівельне покриття, пляшки, садовий шланг, підосви для взуття, медичні трубки	1. Міцний, розм'якшується при 80 °С, може бути прозорим, може піддаватися зварюванню розчинником; 2. Гнучкий, прозорий, еластичний, можна зварювати розчинником	Компостний ящик
Поліетилен низької щільності	Мішки для сміття, шланги для зрошення, плівка мульчувальна, харчова плівка, пластикові пляшки	М'яка гнучка, воскова поверхня, напівпрозора, розм'якшується при 70 °С, легко дряпається	Вкладиші для сміттєвих відер, палетні листи
Поліпропілен (ПП)	Посуд для мікрохвильовки, ланч- боксы, пакувальна стрічка, садові меблі, чайники, пляшки, пакети для картопляних чіпсів, соломинки	Твердий і напівпрозорий, розм'якшується за 140 °С, стійкий до розчинників, універсальний	Кілочки, кошики, труби, піддони
1. Полістирол (ПС); 2. Пінополістирол (ПС-Е)	Футляри для компакт- дисків, пластикові столові прилади, імітація скла, недорогі тендітні іграшки, відеофутляри, склянки зі спіненого полістиролу, захисне пакування, будівельна та харчова ізоляція	1. Прозорий і непрозорий, склоподібний жорсткий, напівтвердий, розм'якшується при 95 °С, схильний до впливу жиру, кислот і розчинників, але стійкий до лугів, розчинів солей 2. Спеціальні типи полістиролу (PS)	Кошики
Інші типи	Компоненти автомобілів і побутової техніки, комп'ютери, електроніка, пляшки-холодильники, пакування	Включає всі властивості смол і матеріалів, що залежать від виду пластику або комбінації пластиків	Кошики

Таблиця Д.1

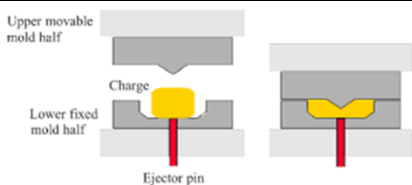
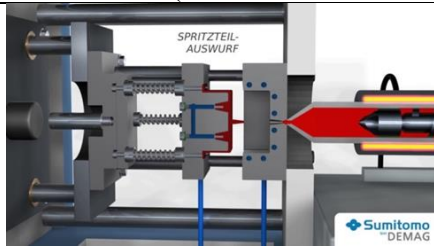
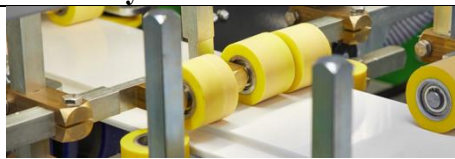
## Вироби які роблять із пластику різних видів

Вид	Пластики	Що виробляють
Термопласти	Поліетилен	Упаковка, трубочки для напоїв, різні види плівки, труби, меблі
	Полістирол	Будматеріали, медичні вироби, харчові контейнери, валізи, меблі
	Полівінілхлорид	Будматеріали, штучна шкіра, труби, вивіски
	Поліамід	Синтетичні тканини, канати, деталі автомобілів, пакувальна плівка
Реактопласти	Фенопласти	Деталі кораблів, палубні настили, меблі, освітлювальні прилади
	Епоксипласти	Деталі автомобілів, клей чи герметик
	Ефіропласти	Меблі, тканини, електроізоляційні матеріали
Еластоміри	Каучук	Автомобільні шини, шланги, рукавички, гумові чоботи, медичні вироби
	Поліуретан	Фарби, труби, захисні плівки, аксесуари та деталі для автомобілів, клей та герметик

Таблиця Е.1

## Технології виготовлення певного виробу із пластику

Метод виготовлення	Технологія виготовлення
<b>Зварювання пластмас</b>	<p>Зварювання двох або більше деталей, які необхідно з'єднати. Щоб з'єднати два різні типи полімерів, використовується наповнювач, особливо коли ці два пластики мають значну різницю в температурах плавлення. Створюється адгезійний зв'язок між двома пластиками, який забезпечує більшу міцність. Методи зварювання: контактний, обертання, високочастотна вібрація, виділення гарячого газу.</p>
<b>Комбінування пластику</b>	<p>Два або більше типів пластику комбінуються разом із добавками для утворення злиття. Пізніше з нього формуються різні частини за допомогою форм, штампів. Мета методу – створити матеріал, який обробляється легко і з необхідними характеристиками, цей процес змінює електричні, фізичні, теплові, естетичні характеристики пластику.</p>
<b>Ламінування пластику</b>	<p>Метод де різні шари пластику утримуються разом, створюючи бар'єр на поверхні іншого матеріалу. Це покращує довговічність та естетику продукту, знижує потенційну потребу в технічному обслуговуванні. Поширені два типи пластикового ламінування: плівка та просочення. Ламінування плівкою більш ефективне, ніж ламінування просоченням. Для створення бар'єру застосовується тепло та тиск.</p>
<b>Лиття під тиском (Рис. 1)</b>	<p>Розплавлений пластик упорскується в прес-форму і потім охолоджується для отримання відформованих виробів. Його використовують для виготовлення як великих деталей так і невеликих. Процес: завантаження гранул пластику в термопластавтомат, розплавлення гранул під впливом сили тертя та тепла від кільцевих нагрівачів циліндра, ін'єкція пластику у форму, охолодження та затвердіння деталі, вилучення готового виробу.</p> <p>Лиття може бути найрізноманітніших типів: в холодноканальні прес-форми, в гарячеканальні форми зі спіральними нагрівачами, гнучкими або патронними ТЕНами, під тиском з роздуванням заготовки, зі вставкою, з формуванням, з комбінацією різних матеріалів та інші.</p>
<b>Компресійне формування</b>	<p>Пластик нагрівається, а потім стискається за допомогою силового притиску для отримання бажаної форми з подальшим затвердінням. Кінцевий продукт зберігає цілісність і не деформується. Використовується для виготовлення виробів різної довжини, товщини та складності. Отриманий виріб міцніший, легший, жорсткіший і стійкіший до корозії, ніж деталі, виготовлені з металів. Перевага цього метод – можливість виготовлення складних конструкцій.</p>



## Продовження додатку Е

<p><b>Ротаційне формування</b></p> 	<p>Метод виготовлення порожнистих деталей. Використовуються обертальні рухи форми для покриття внутрішньої частини нагрітим пластиком, формується шар поверх шару і зрештою створюється бажана деталь. Використовується для виготовлення різноманітної продукції, немає обмежень за формою та розміром. Практично відсутні відходи, весь зайвий пластик можна використовувати для наступної деталі.</p>
<p><b>Видувне формування</b></p> 	<p>Процес включає нагрівання пластику та його передачу у форму. Трубки із пластику, звані заготівлею, нагріваються і переносяться у форму, а потім при відкритті трубки вдується повітря, щоб надуту трубку до бажаної форми. Метод популярний під час виготовлення пляшок, паливних баків.</p>
<p><b>Екструзія</b></p> 	<p>Розплавлений пластик витягується всередині нагрітого кільцевими нагрівачами циліндра екструдера, а потім виштовхується з фільтри, щоб отримати бажану форму: труби, плівки, огорожі, перила настилу, віконні рами та інше.. Розплавлений пластик поміщається в матрицю, яка надає йому бажаної геометрії і дозволяє розплавленому пластику охолонути.</p>
<p><b>Термоформування</b></p> 	<p>Термопласти нагріваються та змінюють форму під тиском. Це унікальний процес, який включає використання дуже тонкого пластику та виконується різними методами, включаючи згинання пластикових листів та вакуумне формування. Він використовується для виготовлення виробів пакування харчових продуктів, виготовлення одноразових стаканчиків, іграшок, лобового скла літаків та підносів у кафетерії..</p>
<p><b>Вирізання штампами</b></p> 	<p>Процес виготовлення пластмасових виробів, у якому використовуються спеціалізовані машини та верстати для перетворення сировини шляхом різання та формування у нестандартні форми та стилі. Це гнучкий метод, який підтримує налаштування.</p>
<p><b>Пултрузія</b></p> 	<p>Це процес, при якому на волокна діють безперервні сили під час безперервного механічного руху. Плетені волокна спочатку протягуються через ванну з розплавленим пластиком, а потім протягуються двома нагрітими металевими матрицями. Залежно від складу полімерної ванни вироби можуть бути захищені від вогню, хімікатів, тепла, електрики, факторів навколишнього середовища.</p>

## Продовження додатку Е

<p><b>Пресування</b></p> 	<p>Удари наносяться на пластикові заготовки для надання їм заданої форми. Залежно від температури, що використовується під час процесу, пресування буває холодне та гаряче.</p> <p>Гаряче пресування – заготовка нагрівається. Під час удару при температурах вище за температуру рекристалізації, газ з заготовки витісняється назовні, покращуючи зернисту структуру виробу.</p> <p>Коли холодне пресування, процес іде при температурі навколишнього середовища. Це забезпечує хорошу точність та підвищену в'язкість. Використовується для виробництва інструментів, столових приладів та деталей для автомобілів та залізниць.</p>
<p><b>Вакуумне ЛИТТЯ</b></p> 	<p>Процес лиття з поліуретану, в силіконові форми для формування пластмасових та гумових компонентів під вакуумом. Лиття високоякісне, без бульбашок з гладкою текстурою поверхні та бес дефектів</p>

## Фізичний метод (ресайклінг пластмас)

Етапи та обладнання	Технологія виконання етапів
Складання	Невеликі контейнери для прийому утилізованих ПЕТ– пляшок.
Сортування	Сортування ручним способом(за типом, кольором та інших ознак), процес трудомісткий. Існують автоматизовані лінії, але вони дорогі.
Автоматичне сортування	Розкидувач - установка, що розбиває відходи полімерів на частини.
Бункер-накопичувач	Ємкість, для подачі відходів на конвеєр після сортування.
Стрічкові конвеєри	Транспортування відходів для подальшого сортування та пере робки
Сортування за кольором	Залежно від коефіцієнта відбиття світла від матеріалу (темний чи світлий).
Спектрофотометрія	Прилад ІЧ або УФ-спектрометрії на основі світлового потоку та оцінки довжини хвилі виконує розподіл. Сортування відбувається не тільки за кольором, але і чистотою полімеру на наявність домішок
Повітряне сортування	Обладнання у вигляді циклонів, що розділяє матеріал за щільністю. Відбувається відокремлення поліетилену від ПВХ.
Флотація	Сортування за вагою. У флотаційній ванні одні види пластику пливуть, а інші тонуть. У ванну додають рідину різної щільності для точного відділення тонких та плавучих пластиків.
Подрібнення	Подрібнення пластику на дрібніші фракції для полегшення процесу транспортування та подальшої переробки.
Дробарки	Спеціальні ножі, під кожен вид пластику. Каскадні – під жорсткий пластик товщиною до 10 мм, ластівчин хвіст – під плівкові матеріали, косий різ – для порожнистих виробів,на кшталт каністр і ПЕТ – пляшок. Бувають легкі, середні та важкі ротаційні дробарки для роботи з пластиком різної товщини. Принцип роботи: зустрічний рух ріжучих кромки, встановлених на роторі.
Шредери	Відрізняються від дробарок формою ножів, який не ріжуть, а "вгризаються" в матеріал. Шредери використовуються для первинної переробки (великі фракції), а дробарки для вторинної.
Мийка, сепарація	Подрібнені відходи пластику піддаються фізичному миття, для видалення піску, бруду та іншого сміття.
Ванна флотації	Очищення від великих забруднюючих фракцій. Ефективність процесу підвищує барабан, який здійснює перемішування.
Водний циклон	Інтенсивне миття подрібнених відходів пластику дозволяє видалити залишки етикеток та паперу
Гаряча мийка	Мийка в центрифугі. Обертання в гарячій воді дозволяє очистити пластик від жиру, лугів, залишків клею та іншого.
Сушка	Надмірна волога небажана домішка в подрібненому пластику
Горизонтальна центрифуга	Високошвидкісний ротор механічної очистки. При обертанні відходи пластику позбавляються вологи в сухому середовищі.
Циклон-осушувач	Активне сушіння при температурі до +110°C не більше 45 хвилин. Гарячий струмінь повітря удаляє владу з поверхні пластику.
Повітряний роздільник	Сушильна шафа. Волога видаляється під впливом гарячого повітря. Для нагрітого пластику, обдув холодним повітрям, при цьому конденсат не утворюється.

## Продовження додатку Ж

Прес-віджим	Видалення вологи відбувається в плівковій вичавці за рахунок проходження через конічний шнек.
Вивантаження в Біг-Беги	Продукована флекса вважається готовою вторинною сировиною для подальшої обробки.
Грануляція	Кінцева переробка пластику.
Гранулятор	Прилад виконує розплавлення з подальшою кристалізацією завантаженого подрібненого пластику. Пластик перетворюється на різні гранули: ПНД, ПВД, поліпропілен, нейлон, поліуретан
Екструдер:	Пластик плавиться під впливом високої температури та обертання шнеків, потім здійснюється видавлювання через фільтру. Розплавлена маса пластику охолоджується водою чи повітрям, ріжеться ножами на частинки. За бажанням на виході пластику можна надати потрібну форму необхідного вирібу: лист, труба, профіль або щось інше.

## Хімічні та термічні методи утилізації пластику

Методи	Результати утилізації
Хімічні методи утилізації пластику	
Гідроліз	Пластик розщеплюють за допомогою високих температур та водно-кислотного розчину. Початковий продукт, максимально очищені гранули. Гідроліз використовується рідше, оскільки такий спосіб переробки є досить дорогим і витратним за часом.
Метаноліз	Розщеплення пластику відбувається за допомогою метанолу, під високим тиском у реакторі, де підтримується висока температура. Метаноліз також є дорогим способом утилізації пластику, вся сировина повинна бути ретельно очищена. Він вибухонебезпечний, тому до нього вдаються в особливих випадках для одержання поліефірів.
Гліколіз	Переробка виконується за допомогою гліколю та температури вище 210 – 250°C. Гліколіз вважається майже безвідходним і не потребує ретельного очищення сировини, що переробляється. Вторсировина в харчовій промисловості не використовується.
Сольволіз	При переробці застосовують широкий діапазон розчинників, каталізаторів (надкритична рідина та спирти), тисків, температур, В результаті виходить відновлене волокно та ненасичені поліефірні смоли.
Термокаталіз	спосіб перетворення пластикових відходів на рідке паливо. Спочатку відходи подрібнюють, потім нагрівають при температурі вище 400 °С в присутності каталізатора. Отримана маса готове котельне паливо. З неї можна отримати бензин, дизель чи мазут.
Термічні методи розрізняються за реакційним середовищем: кисневі та інертні (без кисню).	
Піроліз	Термічне розкладання відходів за відсутності кисню, при температурі до 600°C виходять рідкі продукти, за вищої – газоподібні. У твердому залишку утворюються технічний вуглець та з'єднання металів. Піроліз перевертає забруднені та змішані відходи. Руйнується 99% шкідливих речовин. Ефективний, але дорогих способів переробки пластику. Екологічний варіант, що вимагає великої кількості енергії;
Газифікація	Відходи обробляються потоком плазми за температуру 1000 – 2000°C. Спосіб дозволяє уникнути утворення смоли та допомагає добитися руйнування токсичних речовин. Відходи пластика перетворюється на газ. Горючі газу застосовуються як палива в різноманітних галузях народного господарства та в побуті, а також як сировини для хімічної промисловості. Переробляти пластик можна без сортування.

Таблиця К.1

## Мікроби, що розкладають пластик

Microbes	Types of plastics	References
<b>Bacteria</b>		
<i>Acinetobacter baumannii</i>	PE	Pramile and Ramesh 2015
<i>Anoxybacillus rupiensis</i>	Nylon	Mahdi et al. 2016
<i>Achromobacter denitrificans</i>	PE	Ambika et al. 2015
<i>Bacillus cereus</i>	PE	Ambika et al. 2015
<i>Bacillus spp. tenotrophomonas pavanii</i>	PE	Muhonja et al. 2018
<i>Bacillus simplex</i>	PE	Huerta Lwanga et al, 2018
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	PE	Novotny et al. 2018
<i>Bacillus sp.</i>	PE, PVC	Park and Kim 2019
<i>Enterobacter sp.</i>	PE	Ren et al. 2019
<i>Lysinibacillus sp. Salinibacterium sp.</i>	PE	Syranidou et al. 2017
<i>Ideonella sakaiensis</i>	PET	Sudhakar et al. 2008
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	PE	Ambika et al. 2015
<i>Paenibacillus sp.</i>	PP	Park and Kim 2019
<i>Brevibacillus borstelensis</i>	PE, Pet	Calabia and Tokiwa 2006
<i>Bacillus cereus. Pseudomonas putida</i>	PE	Muhonja et al. 2018
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	PVC	Danko et al. 2004
<b>B-22</b>		
<i>Pseudomonas sp.</i>	PS	Umamaheswari 2017
<i>Pseudomonas aestusnigri</i>	PET	Bollinger et al. 2020
<i>Pseudomonas protegens</i>	PU	Hung et al. 2016
<b>Fungi</b>		
<i>Aspergillus fumigatus Aspergillus oryzae</i>	PE	Muhonja et al. 2028
<i>Aspergillus nidulans</i>		
<i>Aspergillus tubingensis</i>	PE	Sangeetha Devi et al. 2015
<i>Aspergillus flavus</i>	PVC	Zhang et al. 2020
<i>Aspergillus nomius</i>	PE	Abraham et al. 2017
<i>Aspergillus terreus. Aspergillus sydowii</i>	PE	Sangale et al. 2019
<i>Aspergillus niger. Penicillium pinoph ilum</i>	PE	Volke-Sepulveda et al. 2002
<i>Cephalosporium sp. Mucor spp.</i>	PS	Chaudhary 2020
<i>Curvularia senegalensis Fusarium solani</i>	PUR	Howard 2002
<i>Cladosporiurn cladosporioides</i>	PU	Alvarez-Darragan et al 2016
<i>Cochliobolus sp.</i>	PVC	Sumathi et al. 2016
<i>Engyodontium album Phanerochaete chrysosporium</i>	PP	Jeyakumar et al. 2013
<i>Penicillium simplicissimum</i>	PE	Yamada-Onodera et al. 2001
<i>Pestalotiopsis microspore</i>	PUR	Russell et al. 2011
<i>Zalerion maritimum</i>	PE	Pako et al. 2017
<b>Actinomycete</b>		
<i>Streptomyces scabies</i>	PE	Jabloune et al. 2020
<i>Streptomyces sp.</i>	PET, PE	Farzi et al. 2019
<i>Streptomyces species (1) and (2)</i>	PE	Sathya et al. 2012
<i>Pseudonocardia Actinoplanes Sporichthya</i>		

## Продовження додатку К

<i>Actinomadura miaoliensis</i> sp.	PE	Tstng et al.	2009
<i>Nocardiopsis</i> sp.	PE	Sing and Sedhuraman	2015
<b>Algae</b>			
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	PE	Gopal	2017
<i>Spirulina</i> sp.	PET, PP	Khoironu et al.	2019

Таблиця Л.1

## Комахи, що поїдають пластик

Insect species	Types of plastic	References
<i>Ephestia cautela</i>	PVC, PP	Graham Bowditch 1997
<i>Rhyzopertha dominica</i>	PP, PE, PEST	Grnham Bowditch 1997
<i>Lasioderma serricorne</i>	PP, PE, PEST	Riudavets et al. 2007
<i>Sitophilus oryzae</i>	PP, PE, PEST	Riudavets et al. 2007
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	PE	Shukla et al. 1993
<i>Callosobruchus maculatus</i>	PE	Shukla et al. 1993
<i>Stegobium paniceum</i>	PS	Davidson 2012

## Здатність комах розкласти різний пластик

Insect species	Types of plastic	Degradation efficiency	Mechanisms
Tenebrio molitor	PE, PS	49.0± 1.4% loss of PE and PS weight for 32	Gut microbiome- Citrobacter sp. and days Kosakonia sp.
	PS	49.0± 1.4% loss of PE and PS weight for 32	Gut Microbiome- eight unique bacterial species
	Polyether-PU foam	67% loss of PE-PU foam for 35 days	Gut Microbiome- the families Enterobacteriaceae and Streptococcaceae
	PE	1.818 g PE of loss on the 58th day	Gut microbiome
	PS	0.07 mg PE/larvae/day	Gut Microbiome- Enterococcus, Enterobacteriaceae, Escherichia-Shigell, and Lactococcus
	PS	22.0 ± 0.5 g PS loss in 2 weeks	Cronobacter sakazakii and Lactococcus garvieae
	PVC	65.4% loss of ingested PVC for 16 days	Gut microbiome
Zophobas atratus	PS foam	36.7% loss of PS weight for 28 days	Gut microbiota
	PS	36.7% loss of PS weight for 28 days	Gut Microbiome-Pseudomonas sp. EDB1, Bacillus sp. EDA4 and Brevibacterium sp. EDX
	PS	2.78 mg PS/larvae/day	Gut Microbiome-Enterococcus, Enterobacteriaceae, Kluyvera, and Lactococcus NDa
	PS, LDPE	43.3 ± 1.5 mgPS/100 larvae per day, 52.9± 3.1 mg LDPE/100 larvae per day	Gut microbiota and microbial functional enzymes
	LDPE, EPS	58.7 ± 1.8 mg/100 larvae per day, 61.5 ± 1.6 mg EPS/100 larvae per day	Gut microbiota
Galleria mellonella	PE, PS 0.	88 and 1.95 g loss of PE and PS weight for 21days	Intestinal bacteria- Bacillus and Serratia
	LDPE	88 and 1.95 g loss of PE and PS weight for 21days	Gut Microbiome-Acinetobacter, Cloacibacterium, Corynebacterium, Curvibacter, Enhydrobacter and Staphylococcus genera
	LDPE	88 and 1.95 g loss of PE and PS weight for 21days	Gut microbiome
	PS	88 and 1.95 g loss of PE and PS weight for 21days	Gut microbiota
	PS	12.97 ± 1.05% loss weight of PS for 30 days	Intestinal bacteria-Massilia sp. FS1903

## Продовження додатку М

Plodia interpunctella	PE	6.1 ± 0.3% and 10.7 ± 0.2% loss of PE weight for 28 days	Two bacterial strains-Enterobacter asburiae YT1 and Bacillus sp.YP1
	PE	15.87% loss of PE weight for 60 days	Meyerozyma guilliermondii ZJC1 (MgZJC1) and Serratia marcescens ZJC2 (SmZJC2)
Tribolium castaneum	PS	12.14% loss of mass weight and 13%/25% (Mw/Mn) reduction of molecular weight for 60 days	An intestinal bacterium-Acinetobacter bacterium
Tenebrio obscurus	PS	32.44 ± 0.51 mg/100 larvae per day	Intestinal bacteria-Enterobacteriaceae, Spiroplasmataceae, and Enterococcaceae
Tribolium confusum	PS, PE, and EVA(Ethyl vinyl acetate)	51.92, 46.84, and 2.9% loss of PS, PE, and EVA, respectively, for 30 days	Intestinal bacteria-Enterobacteriaceae, Spiroplasmataceae, and Enterococcaceae
Achroia grisella	HDPE (high-density Polyethylene)	Loss weight of PE- (43.3 ± 1.6%) and PE + wax / (69.6 ± 3.2%) for 8 days	Intestinal bacteria-Enterobacteriaceae, Spiroplasmataceae, and Enterococcaceae
Spodoptera frugiperda	PVC	19.57% loss of PVC weight for	Intestinal bacterium -Strain EMBL-1
Alphitobius diaperinus	PS	/19.57% loss of PVC weight for	Intestinal bacteria- Pseudomonas sp. 2 m/c
Uloma sp.	PS	37.14 mg of PS per day per 100 larvae	Gut microbiota
Corcyra cephalonica (Stainton)	LDPE	Weight loss: without antibiotic feeding - 25% with antibiotic feeding - 21%	Gut microbiota
Plesiophthaimus davidis	PS	34.27 ± 4.04 mg PS loss/larva	Gut microbiota

Додаток Н  
Таблиця Н.1

Дослідження PDE та PDM з використанням біоінформаційних та передових обчислювальних інструментів

Мета дослідження	Тип пластику	Біоінформатичні інструменти, що використовуються	Основні висновки	
Підвищення ефективності утворення біоплівки та ідентифікація нових ферментів, що розкладають ПЕТ	ПЕТ	Геномний аналіз	Виявлено два нових ферменти, що розкладають ПЕТ, та максимальне збільшення утворення біоплівки	[79]
Максимальне розкладання ПЕТ за допомогою ферментної інженерії	ПЕТ	Алгоритм машинного навчання	Ефективний та новий фермент, що розкладає ПЕТ, активний при температурі 30-50 ° С та широкому діапазоні рН	[78]
Ідентифікація та характеристика нового PDE	ПЕТ	Скринінг на основі послідовності	Стандартизація протоколу для ідентифікації нових ферментів, що розкладають полімери, в культивованих та некультурних мікробах	[80]
Максимальне розкладання ПЕТ за допомогою ферментної інженерії	ПЕТ	Алгоритм машинного навчання	Ефективний та новий фермент, що розкладає ПЕТ, активний при температурі 30-50 ° С та широкому діапазоні рН	[78]
Ідентифікація та характеристика нового PDE	ПЕТ	Скринінг на основі послідовності	Стандартизація протоколу для ідентифікації нових ферментів, що розкладають полімери, в культивованих та некультурних мікробах	[80]
Ідентифікація ферментів для розщеплення пластику у пов'язаних із пластиком мікробіомах	ПС, ПВД, HDPE та ПВХ	Функціональна метагеноміка	Відкриття нової кутинолітичної естерази, стійкої до різних навантажень та активної щодо різних пластмас	[74]
Порівняння способу зв'язування ТРА з новими гомологічними ферментами РЕТ	ПЕТ	Молекулярний докінг, квантово-механічний аналіз	Підвищення каталітичної активності поліестергідролази та її термостабільності	[75]
Транскриптомний аналіз бактерій, вирощених на поліетилентерефталаті, методом РНК-секвенування	PE	Транскриптомний аналіз	Ідентифікація генів окиснення полімеру та кодування мембранних транспортерів	[81]
Виділення і характеристика мікробів, що розкладають пластифікатори, у морському середовищі	Різні пластифікатори, з дибутилфталатом, біс (2-етилгексил) фталатом і ацетилтрибутилцитратом	Протеогеноміка і метаболоміка	З'ясування шляхів розкладання дибутилфталату, біс (2-етилгексил) фталату та ацетилтрибутилцитрату мікробами в пластисфері	[82]
Створення бази даних відкритого доступу по ПЕТ та поліуретану	ПЕТ та поліуретану	Ідентифікація нового PDE з пластисфери	Вибух, ідентифікація послідовності	[83]

## Продовження додатку Н

Ідентифікація нового PDE з пластисфери	(Matter-Bi, Біоплівка та біофлекс) (61% PBAT + 13% PLA) та ecovio® (64% PBAT + 3% PLA)	Метагеноміка ДНК, секвенування та функціональний валідаційний скринінг	Ідентифікація нового ферменту естерази	[77]
Дослідження ферментативних можливостей <i>Bacillus albus</i> для розкладання мікропластику ПВХ	ПВХ	Молекулярний докінг, BLAST, філогенетичний аналіз, моделювання гомології, теплова карта генів	Дає уявлення про взаємодію альфа/бета гідролази з ПВХ як субстратом	[84]
Скринінг грибкових ліпаз на наявність потенціалу розкладання різних мікропластиків	Полікарбонат, ПЕТ, ПП, PS та ПВХ	БЛАСТИНГ, молекулярний докінг, вирівнювання численних послідовностей, філогенетичний аналіз, передбачення структури	Ідентифікація 71 нового гена ліпази у 13 видів грибів	[85]
Оцінка ефективності розкладання МГЕТази Гідролізний продукт із ПЕТ, МНЕТ	Вирівнювання множинних послідовностей, моделювання гомології, BLASTP, аналіз філогенетичного дерева та молекулярний докінг	Ідентифікація ферменту МЕТ-ази Р	<i>litoralis</i> з високою ефективністю розкладання МНЕТ	[86]
Дослідження динаміки бактеріального співтовариства за рахунок збагачення PP та задіяних ферментів	Стор.	Метагеномне секвенування Shotgun	З'ясування динамічної природи бактерій, що розкладають пластик, на різних стадіях розкладання та ідентифікація ферментів, що розкладають PP	[87]
Вивчення мікробних консорціумів, шляхів розкладання та ферментів, відповідальних за розкладання пластику у відкладеннях ставка	PHA, PLA, PBAT, ПЕТ, полігідроксибутират, нейлон, полівініловий спирт, PU, PE, PCL	Метагеномне секвенування Shotgun, визначення середнього рівня амінокислот та BLASTP	Розшифровка мікробних консорціумів, ферментів та шляхів, що беруть участь у виробництві 23 видів пластмас	[88]

## Продовження додатку Н

Оцінка ефективності розкладання МГЕТази	Гідролізний продукт із ПЕТ, МНЕТ	Вирівнювання множинних послідовностей, моделювання гомології, BLASTP, аналіз філогенетичного дерева та молекулярний докінг	Ідентифікація ферменту МЕТ-ази <i>P. litoralis</i> з високою ефективністю розкладання МНЕТ	[86]
Дослідження динаміки бактеріального співтовариства за рахунок збагачення РР та задіяних ферментів	Стор.	Метагеномне секвенування Shotgun	З'ясування динамічної природи бактерій, що розкладають пластик, на різних стадіях розкладання та ідентифікація ферментів, що розкладають РР	[87]
Вивчення мікробних консорціумів, шляхів розкладання та ферментів, відповідальних за розкладання пластику у відкладеннях ставка	РНА, PLA, PBAT, ПЕТ, полігідроксибутират, нейлон, полівініловий спирт, PU, PE, PCL	Метагеномне секвенування Shotgun, визначення середнього рівня амінокислот та BLASTP	Розшифровка мікробних консорціумів, ферментів та шляхів, що беруть участь у виробництві 23 видів пластмас	[88]

Додаток П  
Таблиця П.1

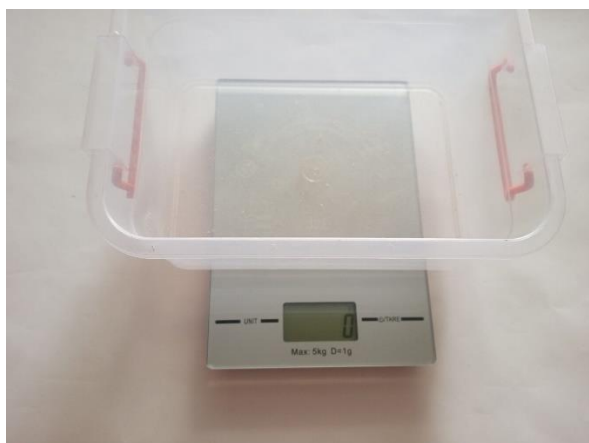
Ферменти які розкладають пластикові полімери

Ферменти	Тип пластмас	Інкубаційний період	% розкладання	Продукт розкладання / токсичність	Методи оцінки	Зареєстровані види	
Естераза	LDPE	90 днів	1.72	NR	Ферментативний аналіз	Halomonas sp.	[66]
Ліпаза	PEG	90 днів	40	NR	Ферментативний аналіз, молекулярний докінг	Консорціум Pseudomonas spp.	[67]
Багатокомпонентні оксидази, ліпази та естерази	PE	30 днів	1	Пальмітинова кислота	ГХ-МС, СЕМ, ІЧ-спектроскопія, протеомний аналіз, ферментативний аналіз	Rhodococcus штам A34	[53]
Кутиназа для компосту з листя і гілок (LCC)	ПЕТ, ВНЕТ	24 години	NR	МНЕТ, ВНЕТ	Геномний аналіз, вирівнювання послідовностей, ферментативний аналіз, ЖХ-МС	Micromonospora sp.	[68]
Ліпаза - LIP3, LIP4, РНА-деполімераза (PhaZ)	PLA, PCL, PES та ін.	96 годин	LIP3: 22.5, 27.9, 6.6 LIP4: 8.7, 49.3, 5.7 ФазА: 14.9, 27.6, 9.3	NR	GPC, ферментативна активність, секвенування, моделювання гомології, BLAST	Pseudomonas chloroaphis , PA23	[69]
Лакказа, пероксидаза, оксидоредуктази	PE	120 днів	95	Дигліклоамін, триметилсиліловий ефір 1-монолінолеоїлгліцерину, складний ефір біс (2-етилгексил) гександіоєвої кислоти, сквален.	Рентгенографія, SEM, FTIR, ГХ-МС, GPC	Alternaria alternata FB1	[70]
Лакказа, пероксидаза марганцю	PE	15 днів	13	NR	SEM, FTIR, ЯМР-спектроскопія	Trichoderma harzianum	[71]

## Продовження додатку П

Алкангідроксилаза (АН)	Низькомолекулярний поліетилен (LMWPE)	80 днів	40.8	NR	Секвенування, еволюція CO <sub>2</sub>	Синьогнійна паличка E7	[72]
Оксигеназа	PS	35 днів	NR	NR	ATR-FTIR, секвенування, SEM	<i>Exiguobacterium</i> sp. RIT 594	[73]
Кутинолітична естераза/ кутиназа	ПС, ПНД, ПВД і ПВХ	30 днів	6.94, 8.71, 7.47, 9.22	Нетоксичні побічні продукти	SEM, FTIR	NA	[74]
Бифункциональная липаза-кутиназа	PCL	48 часів	78	6-гідроксигексановая кислота, капролактон	Ферментативний аналіз, SEM, ГХ-МС	NA	[64]
Поліестераза (MoPE) GPC, ,	PU, PCL, полігідроксибутират, полібутиленсукцинат	3 дні	3.9, 33.4, 8.9, 5.3	NR	Ферментативний аналіз, ВЕЖХ	<i>Moraxella</i> sp.	[75]
Лакказоподібна багатокомпонентна оксидаза	PE	30 днів	2.54	NR	SEM, ATR / FTIR, WCA, GPC	<i>Acinetobacter baumannii</i> Rd-H2	[76].

## Додаток Р



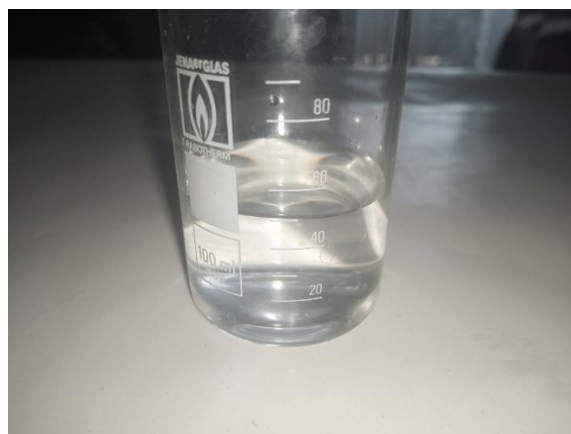
09.09.24



09.09.24



09.09.24



09.09.24



09.09.24



10.09.24

## Продовження додатку Р



11.09.24



12.09.24



13.09.24



14.09.24



15.09.24



16.09.24

## Продовження додатку Р



17.09.24



18.09.24



19.09.24



20.09.24



21.09.24



22.09.24

## Продовження додатку Р



23.09.24



24.09.24



25.09.24



26.09.24



27.09.24



28.09.24

## Продовження додатку Р



29.09.24



30.09.24



01.10.24



02.10.24



03.10.24



04.10.24

## Продовження додатку Р



05.10.24



06.10.24



07.10.24



08.10.24



09.10.24



10.10.24

## Продовження додатку Р



11.10.24

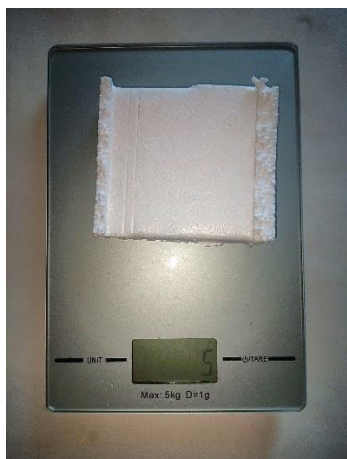


11.10.24



11.10.24

## Додаток С



20.10.24



20.10.24



20.10.24



20.10.24



20.10.24



21.10.24

## Продовження додатку С



22.10.24



23.10.24



24.10.24



25.10.24



26.10.24



27.10.24

## Продовження додатку С



28.10.24



29.10.24



30.10.24



31.10.24

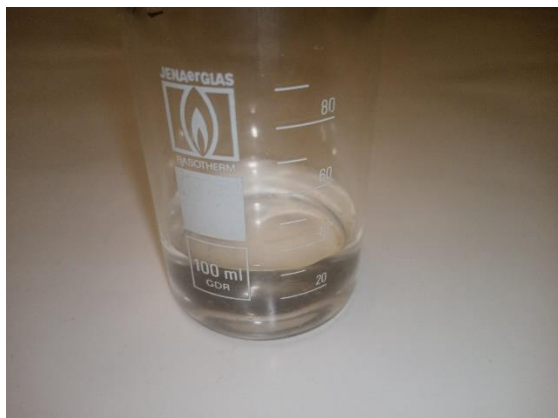


01.11.24



02.11.24

## Продовження додатку С



02.11.24



02.11.24