

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

УДК 504.06

DOI: 10.31471/2415-3184-2023-1(27)-85-91

*В. Ф. Синящик, О. В Харламова,
В. М. Шмандій, Т. Є Ригас,
Л. А. Безденєжних*

*Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського*

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ У СИСТЕМІ ПОВОДЖЕННЯ З ПЛАСТИКОВИМИ ВІДХОДАМИ

Проаналізовано властивості мікроорганізмів, із забруднених пластиком територій. Результати досліджень показали, що кишковий мікробіом видів личинки великої воскової моли використовує пластик як джерело вуглецю, а кишковий мікробіом хробака здатний виживати на полістиролі. Також ідентифіковано ферменти, які розкладають поліетилен в слині воскових черв'яків, що є важливим для боротьби з забрудненням пластиком.

Ферментативна біодеградація пластмас здійснюється за допомогою традиційного цільноклітинного біокаталізу або безклітинного підходу. Показано, що використання штамів дикого типу в поєднанні з біоінформаційним аналізом дає можливість виявити потенційні ферменти, які ефективно біодеградують пластмаси та сприяють забезпеченню екологічної безпеки.

У статті обговорюється важливість підвищення ефективності існуючих процесів біодеградації пластику, зокрема застосування попередньої обробки, щоб збільшити сприйнятливості поліолефінів. Показано, що розробка ферментів може сприяти загальній біодеградації пластмас, наводяться приклади успішної конструювання ПЕТ-гідролази з використанням машинного навчання. Результати досліджень демонструють ефективність цих стратегій для біодеградації пластмас та можуть бути корисними для подальшого розвитку у цій галузі.

Досліджено процес біодеградації полістиролу (ПС) за допомогою личинок жука *Uloma sp*, які активно живляться ПС та виділяють ферменти, що розкладають його на біомасу та інші біохімічні сполуки. В результаті експерименту визначено рівень виживання та відсоток втрати ваги ПС. Встановлено, що личинки жука *Uloma sp* можуть ефективно деградувати ПС, що є важливим аспектом у зменшенні обсягів відходів та забезпеченні екологічно безпечного способу переробки пластику.

Ключові слова: Екологічні аспекти, сталий розвиток, поводження з пластиковими відходами, забезпечення екологічної безпеки, пластик, мікроорганізми, біодеградація, ферменти

Постановка проблеми. Найбільшими викликами сьогодення є управління пластиковими відходами та зменшення забруднення навколишнього середовища, особливо враховуючи зростаючий попит на пластикові вироби. Через виклики, які існують у поточному сценарії, існує потреба терміново змінити стратегію поводження з пластиком із захоронення та спалювання на більш стійку та екологічно чисту альтернативу [1].

Зі збільшенням кількості пластикових відходів, які утворюються в усьому світі, традиційні методи, такі як захоронення та спалювання, більше не є стійкими та негативно впливають на навколишнє середовище [2]. Сучасне виробництво та споживання великої кількості пластикових виробів призводить до накопичення величезної кількості пластикових відходів. Це негативно впливає на навколишнє середовище та здоров'я людей. Тому виникає проблема відновлення ресурсів та поводження з пластиковими відходами з використанням підходу біологічного розкладання.

Одним із найефективніших способів поводження з пластиковими відходами є добування з них енергії. Порівняно зі спалюванням і утилізацією на звалищах, перетворення пластику в паливо може зменшити небезпечні викиди та зараження патогенами. У процесі створення палива з пластикових відходів реакційні фактори (такі як температура, час перебування та швидкість підвищення температури) можуть контролювати загальний процес перетворення [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес біодеградації синтетичного пластику в основному залежить від характеристик полімерів і кількох факторів навколишнього середовища. Фізико-хімічні властивості синтетичних пластмас (кристалічність, гідрофільність, молекулярна маса та міцність) є вирішальними факторами, що визначають процес біодеградації. Пластмаси з меншим ступенем розгалуженості в структурі мають вищу кристалічність, що несприятливо для біодеградації; аморфні області в полімерній структурі більш сприйнятливі до мікробної атаки порівняно з кристалічними областями [4]. Отже, біорозкладаність LDPE (пластик низької щільності) вище, ніж з HDPE (пластик високої щільності), що пояснюється сильно розгалуженою структурою LDPE. Крім того, здатність до біологічного розкладання пластмаси зменшується зі збільшенням їх молекулярної маси, оскільки знижена розчинність полімеру перешкоджає мікробній дії та подальшій асиміляції продуктів розкладання в мікробних клітинах. Це також пояснює підвищену біорозкладаність гідрофільних пластиків в порівнянні з гідрофобними полімерами. Наявність функціональних груп у полімерній структурі також підвищує сприйнятливості пластмас до біодеградації, оскільки присутність цих функціональних груп сприяє підвищенню гідрофільності полімеру [5]. Крім того, м'який пластик, як правило, руйнується швидше, ніж твердий або міцний пластик.

Постановка завдання. Біорозкладані пластики мають потенційно менший вплив на навколишнє середовище, але їхнє використання не є безпечним і екологічно стійким. Швидкість розкладання біорозкладаної пластмаси в різних середовищах різна, що може призводити до накопичення хімічних забруднювачів та продуктів розкладання в навколишньому середовищі. Крім того, в дослідженні [6] показано, що біорозкладані пластики також можуть утворювати мікропластик, що створює екологічний ризик для водних екосистем.

Отже, доцільно проводити подальші дослідження та оцінювати екологічний ризик при використанні біорозкладаної пластмаси, і враховувати її можливий вплив на навколишнє середовище. Повна заміна звичайних синтетичних пластиків на біорозкладані пластики поки що є неможливою, і доцільно шукати компромісні рішення, такі як використання біорозкладаної пластмаси тільки в обмеженому обсязі та використання переробних технологій для зменшення відходів.

Виклад основного матеріалу. Нами досліджено різноманітних мікроорганізмів, які знайдені в місцях, забруднених пластиком (сільськогосподарські ґрунти та звалища відходів). Вони перевірені на здатність споживати пластик як джерело вуглецю з використанням традиційного методу культурального аналізу.

Результати дослідження показали, що кишковий мікробіом видів личинки великої воскової молі може використовувати пластикові субстрати як джерело вуглецю. Але розміри мікрочастинок LDPE спричиняють зменшення кількості бактерій, що виділяються з кишківника дощового черв'яка *Lumbricus terrestris*. Також, кишковий мікробіом хробака (*Zophobas morio*) здатний виживати на полістиролі (PS), що змінює морфологію поверхні цього матеріалу [7,8].

Окрім кишкового мікробіому, було успішно ідентифіковано два ферменти, що розкладають пластик, відомі як (*Ceres i Demetra*), які присутні в слині воскових черв'яків (*Galleria mellonella*). Ці ферменти здатні окислювати та деполімеризувати поліетилен після кількох годин витримки при кімнатній температурі та нейтральному рН. Відкриття нових ферментів, що розкладають пластик, є життєво важливим, оскільки ферменти відіграють вирішальну роль у фрагментації полімерів [9].

Ми провели дослідження та виявили, що можна здійснити ферментативну біодеградацію пластмас здійснити за допомогою традиційного цільноклітинного біокаталізу або безклітинного підходу. У процесі аналізу біодеградації пластику ми використовували початкову ферментацію мікробних штамів за оптимальних умов, таких як температура, рН і додавання поживних речовин. Після цього ми здійснили біокаталіз цілої клітини шляхом інкубації мікробних штамів при вищій щільності клітин з зразками пластику в середовищі біодеградації. Якщо використовувати безклітинний підхід, то необхідно руйнувати клітини мікроорганізмів після початкової ферментації. У традиційному цільноклітинному біокаталізі ферментативна дія ферментів, що

розкладають пластик, що виділяються з мікробних штамів (тобто дикого типу або рекомбінантних), призводить до фрагментації полімеру. При прийнятті цільноклітинного підходу умови бродіння, такі як доступність кисню, робоча температура та рН, є ключовими умовами для забезпечення виживання та росту мікроорганізмів, що експресують ферменти, відповідальні за біодеградацію пластику.

У традиційному цільноклітинному біокаталізі ферменти, що виділяються з мікробних штамів, розкладають пластик, що призводить до його фрагментації. Для успішного росту і виживання мікроорганізмів, які відповідають за біодеградацію пластику, ключовими є умови бродіння, такі як доступність кисню, робоча температура та рН. Потенційно можна використовувати біокаталіз цілої клітини для біодеградації поліолефінів з вуглецевими структурами. Оскільки ферменти, що відповідають за біодеградацію цих пластиків, ще потрібно ідентифікувати, традиційний цільноклітинний підхід з використанням штамів дикого типу в поєднанні з біоінформаційним аналізом може допомогти нам виявити потенційні ферменти, які ефективно біодеградуватимуть ці пластмаси і сприяють захисту навколишнього середовища [10].

Крім пошуку нових штамів і ферментів для розкладання пластику, важливо також розвивати стратегії для покращення існуючих процесів біодеградації. Для поліолефінів ми використовували попередню обробку, таку як ультрафіолетове опромінення, термічна та хімічна обробка, щоб підвищити їх сприйнятливості до біодеградації. Це сталося тому, що їх високогідрофобна природа, яка в основному пояснюється структурою вуглеводневого ланцюга, перешкоджає дії мікробів під час процесу біодеградації. Попередня обробка полімерів індукуює окислення полімеру та сприяє подальшому процесу біодеградації, який передбачає інкубацію попередньо обробленого пластику з мікроорганізмами. Інші нові стратегії попередньої обробки, такі як гамма-опромінення та плазмова обробка, також були досліджені для покращення загального процесу біодеградації пластику. Зазвичай, попередня обробка полімерів призводить до збільшення кількості функціональних груп у полімерному ланцюзі (наприклад, карбонільних, карбоксильних і складних ефірів). Нами виявлені зміни в морфології поверхні пластмас після процесу попередньої обробки, а швидкість біодеградації попередньо оброблених пластмас була вищою, ніж у пластмас без попередньої обробки [11].

Розробка ферментів з потрібними властивостями може сприяти підвищенню загальної біодеградації пластмас. Ферменти, які ефективно розкладають інші синтетичні пластмаси, ще потрібно ідентифікувати. Застосування структурного алгоритму машинного навчання дозволило створити надійну та активну ПЕТ-гідролазу (швидка ПЕТаза). Відмічену підвищену активність у біодеградації ПЕТ порівняно з ПЕТазою дикого типу та кількома іншими сконструйованими ферментами, які були розроблені до цього часу [12,13].

Біорозкладання піностиролу (PS) личинками жука *Uloma sp.* є одним із можливих способів переробки цього пластику в екологічно безпечний спосіб. Личинки можуть переробляти піностирол і перетворювати його на біомасу та інші біохімічні сполуки. Процес біодеградації полягає в тому, що личинки жука живляться піностиролом, а потім виділяють ферменти, які розкладають його на менші компоненти. Результатом цього процесу є утворення біомаси та інших біохімічних сполук, які можуть бути використані в різних галузях, наприклад, у виробництві добрив або як джерело енергії.

Личинки жуків вирощувалися в поліпропіленових пластикових контейнерах (11,5×8×6 см) у лабораторії в умовах навколишнього середовища (температура: 28 ± 1 °C, вологість: $80 \pm 2\%$) протягом 28 днів. Була взята випадкова група з ста личинок жуків і їх годували на єдиній дієті з PS у дозі 2,5 г. Личинки були піддані контролю, шляхом годування лише сотами з бджолиного воску або режиму голодування. Усі випробування були проведені тричі. Встановлено рівень виживання та відсоток втрати ваги ПС. Різницю мас визначали за допомогою аналітичних ваг з точністю зчитування 0,01 мг, і вимірювання продовжували один раз на 4 дні протягом 28 днів експерименту. Протягом 28 днів проводили випробування деградації матеріалу ПС на личинках жука *Uloma sp.* Личинки активно жували фрагменти ПС (рис.1), особливо коли він був у прямому контакті з ними. З часом, з'являлися заглиблення в матеріалі ПС, які збільшувалися з часом. Швидкість споживання фрагментів личинками оцінювали за втратою маси матеріалу, яку спричиняли личинки.

Під час експерименту було помічено покращення споживання матеріалу ПС. З початкових 2,5 г загальна втрата ваги наприкінці експерименту становила $1,04 \pm 0,02$ г (рис.2). Середня норма споживання ПС кожною личинкою *Uloma* оцінювалася в 0,37 мг на день.



Рис.1. Експеримент зі споживання піностиролу личинками жука

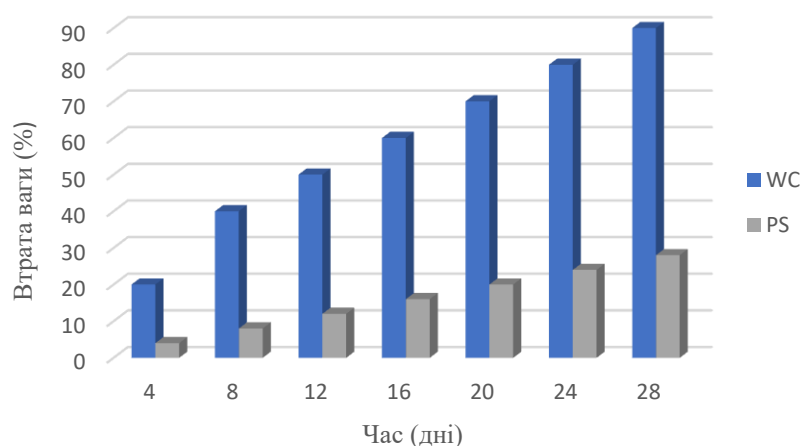


Рис. 2. Порівняння відсотка втрати ваги воскових стільників (WC) і полістиролу (PS) після споживання личинок *Uloma*

Личинки жука, які харчувалися WC і PS, завершили свій ріст і пройшли всі стадії розвитку (личинка, лялечка і дорослий жук), тоді як негодовані личинки не сформували лялечок і не змогли завершити свій життєвий процес. Личинки жука, які отримували WC та PS, завершували свій життєвий цикл відповідно за 210 ± 2 та 171 ± 1 дня (табл.). Помічено, що личинки, яких годували PS, мали меншу тривалість життя дорослих порівняно з личинками, яких годували WC. Дорослі жуки, утворені з личинок, які харчувалися кормом як PS, так і WC, були здатні виробляти наступне покоління. Самки жуків відкладають яйця, і протягом тижня з яєць вилуплюються личинки. Однак щойно вилупилися личинки жука, що годували PS, не змогли закріпитися. У випадку личинок, які харчуються PS, відсутність належних поживних речовин може бути причиною зниження довголіття дорослої особини та невдалого другого покоління. І личинки, і жук показують канібалізм і підрахунок мертвих личинок або жуків у кормі для PS показує зменшення кількості мертвих, що свідчить про те, що личинки, яких годують лише PS, поглинають основні поживні речовини, необхідні для росту та виживання, споживаючи мертвих личинок/жука. Отже, можна стверджувати, що *Uloma* sp. схильні споживати його суспензію, коли є дефіцит їжі або основних поживних речовин, необхідних для розвитку [14,15].

Результати вказують на те, що PS корм підтримує ріст личинок жука, а перетравлення проковтнутого PS може забезпечити енергію для підтримки та виживання личинок жука. Хоча

PS-корм не виявляв жодного летального впливу на личинки жуків, він явно вплинув на ріст і розвиток личинок другого покоління.

Таблиця

Зміна біомаси та здатності до завершення життєвого циклу для негодованих личинок *Uloma* та личинок при різних типах харчування

Тип харчування	Початкова маса, мг/личинки	Маса в кінці тесту, мг/личинки	Зміна маси (%)	Тривалість стадії розвитку (днів)		
				Личинка	Лялечка	Жук
Віск (WC)	64	78	+23	50	8	153
Полістирол (PS)	62	64,6	+4	39	8,5	124
Полістирол+Віск (PS-WC)	62,2	76	+22	42	8	138
Негодовані	62,3	57	-8	16,4	—	—

Вид *Uloma*, зазвичай харчується восковими сотами. Коли личинок жука *Uloma* годували WC у присутності PS, вони спочатку їли WC, а потім PS. Доданий восковий стільник значно збільшив швидкість деградації PS на відміну від одного PS. Втрата ваги після деградації (%) становила 41,5 % для личинок, які отримували лише PS, і 63 % для личинок, які отримували PS-WC. Середня норма споживання PS для кожної личинки *Uloma* була оцінена і виявилася, що вона становить 0,37 мг на день для личинок, яких годували лише PS, і 0,56 мг на день для личинок, яких годували PS-WC.

Додаткове живлення забезпечило швидшу деградацію PS і вищу живучість черв'яків, які харчувалися PS-WC. Крім того, було помічено, що використання PS як єдиної дієти призводить до збільшення ваги на 4,5 % від початкової ваги. З іншого боку, при контакті з раціоном WC та PS-WC личинки мали приріст маси 23 % та 22 % відповідно. Негодовані личинки мали втрату ваги 8 % від початкової. Спостереження за стадіями розвитку личинок, яких годували PS-WC, показали, що личинки були здатні утворювати лялечки, а потім, будучи дорослим жуком, завершувати свій життєвий цикл. Личинки мали тривалість життя дорослих особин 138 днів, і жуки були здатні виробляти ефективне наступне покоління. Новоутворені личинки, які споживали PS-WC, мали вищу виживаність порівняно з личинками другого покоління, яких годували PS; виявлено, що вони живуть більше одного місяця. Стандартний корм WC здатний забезпечувати вищу продуктивність личинок жуків. Це пояснюється тим, що до складу бджолиного воску, входять мед, пилок, а ексувія личинок медоносних бджіл є джерелом вітамінів, білків, амінокислот і мікроелементів, які можуть засвоюватися шляхом травлення. Таким чином, WC може бути кращим джерелом дієтичних потреб, ніж вуглеводні з PS.

Отже, результати свідчать про те, що екзувії личинок медоносної бджоли є джерелом вітамінів, білків, амінокислот і мікроелементів, які можуть бути засвоєні шляхом травлення. Таким чином, WC може бути більш ефективним джерелом дієтичних потреб, ніж вуглеводні з PS.

Висновки. Сучасні підходи до поводження з відходами пластмас нездатні забезпечити екологічну безпеку з одночасним розкладанням кількох типів синтетичних пластмас. На сьогоднішній день дослідження біодеградації пластику були зосереджені на перевірці здатності мікроорганізмів і ферментів деполімеризувати один тип пластику. Показано, що потенціал ферментів у реалізації одночасного розкладання змішаних пластикових відходів має очевидну перевагу перед звичайними підходами переробки, оскільки поточні технології переробки все ще вимагають попереднього сортування пластикових відходів.

У лабораторних умовах встановлено, що личинки жуків *Uloma* sp. здатні розвиватися на поліпропіленовому пластику (PS). Особини, які отримували PS, мали меншу тривалість життя порівняно з личинками, які отримували бджолиний віск. Зниження довголіття дорослої особини та невдалого другого покоління ми пов'язуємо із відсутністю належних поживних речовин у кормі для личинок, які споживали PS. Личинки та дорослі жуки показували канібалізм, але кількість мертвих личинок чи жуків в кормі для PS зменшувалася з часом.

В цілому, результати дослідження підтверджують можливість забезпечення сталого розвитку у системі поводження з пластиковими відходами шляхом використання жуків для біологічного розкладання поліпропіленового пластику.

Література

- 1 А. О. Тітова, О.В. Харламова, Л. А. Безденежних, С. А. Бігдан. Оптимізація системи управління твердими побутовими відходами у кременчуцькій територіальній громаді// Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського», №3/2021(128). С.51-56.
- 2 А. В. Генова, С. А. Бігдан, В. М. Шмандій, О. В. Харламова, Т. Є. Ригас. Реалізація інтегрованої системи моніторингу задля забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів. Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety». 13(1/2023).
- 3 Азаров С.І., Харламова О.В. Моделювання впливу антропогенних чинників на стан довкілля. Науково-практичний журнал «Екологічні науки», Київ. 2020. №1(28), С. 97–101.
- 4 A. Muthukumar, S. Veerappapillai, Biodegradation of plastics – a brief review, Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res., 31 (2015), pp. 204-209
- 5 Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A., 2021. Plastics degradation by microbes: a sustainable approach. J. King Saud Univ. Sci., 336.
- 6 S.Bahl, J.Dolma, “Biodegradation of plastics: a state of the art review” Mater. Today: Proc., 39(2021), pp.31-344.
- 7 S.S.Ali, T.Elsamahy, E.Koutra, “Degradation of conventional plastic wastes in the environment: a review on current status of knowledge and future perspectives of disposal” Sci. Total Environ., 771(2021), Article 144719.
- 8 E.Huerta Lwanga, B.Thapa, X.Yang, “Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration” Sci. Total Environ., 624(2022), pp.753-757.
- 9 A.Sanluis-Verdes, P.Colomer-Vidal, F.Rodriguez-Ventura, “Wax worm saliva and the enzymes therein are the key to polyethylene degradation by *Galleria mellonella*” Nat. Commun., 131(2022), p.5568.
- 10 R.Wei, W.Zimmermann, “Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we, Microb. Biotechnol., 106(2019), pp.1308-1322.
- 11 D.Jeyakumar, J.Chirsteen, “Synergistic blending on fungi mediated biodegradation of polypropylenes”, Bioresour. Technol., 148(2020), pp.78-85.
- 12 H.Lu, D.J.Diaz, N.J.Czarnecki, Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization, Nature, 6047907(2022), pp.662-667.
- 13 V.Tournier, C.M.Topham, A.Gilles, An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles Nature, 5807802(2020), pp.216-2.
- 14 M.O. Mahgoub, W. Lau, Observations on the biology and larval instars discrimination of wax moth *Achroia grisella* F. (Pyralidae: lepidoptera), J. Entomol., 12 (1) (2015), pp. 1-11.
- 15 N. Nukmal, Effect of styrofoam waste feeds on the growth, development and fecundity of mealworms (*Tenebrio molitor*), Online J. Biol. Sci., 18 (1) (2018), pp. 24-28.

**V. Sinyashchyk, O. Kharlamova,
V. Shmandiy, T. Rigas, L. Bezdeneznych**
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE PLASTIC WASTE MANAGEMENT SYSTEM

The properties of microorganisms from plastic-contaminated areas were analyzed. Research results have shown that the gut microbiome of larval species of the large wax moth uses plastic as a carbon source, and the gut microbiome of the worm is able to survive on polystyrene. Enzymes that break down polyethylene in the saliva of wax worms have also been identified, which is important for combating plastic pollution.

Enzymatic biodegradation of plastics is carried out using traditional whole-cell biocatalysis or a cell-free approach. It is shown that the use of wild-type strains in combination with bioinformatic analysis makes it possible to identify potential enzymes that effectively biodegrade plastics and contribute to environmental safety.

The paper discusses the importance of improving the efficiency of existing plastic biodegradation processes, particularly the application of pretreatment to increase the receptivity of polyolefins. It is shown that the development of enzymes can contribute to the general biodegradation of plastics, examples of successful construction of PET hydrolase using machine learning are given. The research

results demonstrate the effectiveness of these strategies for the biodegradation of plastics and may be useful for further development in this field.

The process of biodegradation of polystyrene (PS) was studied with the help of *Uloma* sp beetle larvae, which actively feed on PS and secrete enzymes that decompose it into biomass and other biochemical compounds. As a result of the experiment, the survival rate and percentage of weight loss of the PS were determined. It was established that the larvae of the beetle *Uloma* sp. can effectively degrade PS, which is an important aspect in reducing waste volume and ensuring an environmentally safe way of recycling plastic.

Key words: Environmental aspects, sustainable development, handling of plastic waste, ensuring ecological safety, plastic, microorganisms, biodegradation, enzymes.

References

- 1 .A.O. Titova, O.V. Kharlamova, L. A. Bezdenezhniy, S. A. Bigdan Optymizatsiia systemy upravlinnia tverdymy pobutovymy vidkhodamy u kremenchutskii terytorialnii hromadi// Naukovyi zhurnal «Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho», No. 3/2021(128). P.51-56.
- 2 A. V. Genova , S. A. Bihdan , V. M. Shmandiy , O. V. Kharlamova , T. E. Ryhas. Realizatsiia intehrovanoi systemy monitorynhu zadlia zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky vodnykh resursiv. Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety». 13(1/2023).
- 3 Azarov S.I., Kharlamova O.V. Modeliuvannia vplyvu antropohennykh chynnykiv na stan dovkillia. Naukovo-praktychnyi zhurnal «Ekolohichni nauky», Kyiv.. No. 1(28), pp. 97–101.
- 4 A. Muthukumar, S. Veerappapillai, Biodegradation of plastics – a brief review,Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res., 31 (2015), pp. 204-209
- 5 Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A., 2021. Plastics degradation by microbes: a sustainable approach. J. King Saud Univ. Sci., 336.
- 6 S.Bahl, J.Dolma, “Biodegradation of plastics: a state of the art review” Mater. Today: Proc.,39(2021), pp.31-344.
- 7 S.S.Ali, T.Elsamahy, E.Koutra, “Degradation of conventional plastic wastes in the environment: a review on current status of knowledge and future perspectives of disposal” Sci. Total Environ.,771(2021), Article144719.
- 8 E.Huerta Lwanga, B.Thapa, X.Yang, “Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration” Sci. Total Environ.,624(2022), pp.753-757.
- 9 A.Sanluis-Verdes, P.Colomer-Vidal, F.Rodriguez-Ventura, “Wax worm saliva and the enzymes therein are the key to polyethylene degradation byGalleria mellonella”Nat. Commun.,131(2022), p.5568.
- 10 R.Wei, W.Zimmermann, “Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we, Microb. Biotechnol.,106(2019), pp.1308-1322.
- 11 D.Jeyakumar, J.Chirsteen, “Synergistic d blending on fungi mediated biodegradation of polypropylenes”,Bioresour. Technol.,148(2020), pp.78-85.
- 12 H.Lu, D.J.Diaz, N.J.Czarnecki, Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization, Nature,6047907(2022), pp.662-667.
- 13 V.Tournier, C.M.Topham, A.Gilles, An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottlesNature,5807802(2020),pp.216-219.
- 14 M.O. Mahgoub, W. Lau, Observations on the biology and larval instars discrimination of wax moth *Achroia grisella* F. (Pyralidae: lepidoptera), J. Entomol., 12 (1) (2015), pp. 1-11.
- 15 N. Nukmal, Effect of styrofoam waste feeds on the growth, development and fecundity of mealworms (*Tenebrio molitor*), Online J. Biol. Sci., 18 (1) (2018), pp. 24-28.