

УДК 661:606

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/36>**Мітіна Н.Б.**<https://orcid.org/0000-0002-5384-7040>

Український державний університет науки і технологій

**Мініна Ю.О.**<https://orcid.org/0009-0009-5945-9258>

Український державний університет науки і технологій

## ОЦІНКА ДЕСТРУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ МЕДИЧНИХ ВІДХОДАХ ЗА УМОВ БІОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ

Сучасне зростання обсягів полімерних відходів, зокрема одноразових медичних виробів, зумовлює необхідність пошуку екологічно безпечних і ефективних методів їх утилізації. Неткані поліпропіленові матеріали, зокрема спанбонд, широко застосовуються у медичній практиці, проте характеризуються низькою здатністю до природного розкладання, що призводить до їх накопичення у навколишньому середовищі. Одним із перспективних біотехнологічних підходів до вирішення цієї проблеми є поєднання вермікультивування з використанням мікроорганізмів, здатних до деструкції складних органічних сполук. Для покращення процесів біодеструкції полімерних відходів медичного призначення у статті досліджено руйнування нетканого поліпропіленового матеріалу спанбонд за участі вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109. Оцінено зміну маси зразків нетканого поліпропіленового матеріалу та механічних властивостей, динаміку фізико-хімічних показників субстрату, зокрема рН та електропровідності. Встановлено, що у контрольному варіанті без біологічних агентів деградація нетканого поліпропіленового матеріалу відбувалась повільно. За наявності вермікультури спостерігається зниження рН субстрату та стабілізація електропровідності, що свідчить про активізацію біохімічних процесів. Підтримання підвищених значень електропровідності та більш інтенсивне зниження рН зафіксовано в системі з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що підтверджено максимальною втратою маси зразків нетканого матеріалу та істотним зниженням їхньої міцності на розрив. Показано, що застосування вермікультури у поєднанні з бактеріями штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* забезпечує суттєво вищу інтенсивність біодеструкції нетканого поліпропіленового матеріалу порівняно з контрольним варіантом та системою з використанням лише вермікультури, що свідчить про синергічну дію біологічних агентів. Отримані результати можуть бути використані при розробленні екологічно безпечних технологій утилізації медичних полімерних відходів.

**Ключові слова:** біодеструкція, біогумус, біологічний об'єкт, *Eisenia fetida*, бактерії, *Pseudomonas*, вермікультивування, вермікультура, вихід біомаси, мікроорганізми, полімери, полімерні відходи, композит, полімерний композит, переробка, технологія, субстрат, стан навколишнього середовища, забруднення, побутові відходи, звалище, ґрунт, забруднення ґрунту, ґрунтові умови, техногенний вплив, відходи, відходи виробництва, регенеровані відходи, екологічна безпека, екологія, екологічний стан.

**Постановка проблеми.** Неткані поліпропіленові матеріали спанбонд (НПМС), отримані розплавленням полімеру фільтрним способом є основною сировиною для виготовлення медичних виробів одноразового призначення. Широке застосування НПМС зумовлене поєднанням низької собівартості та достатніх механічних властивостей. Водночас висока хімічна й біологічна стійкість НПМС забезпечує стабільність матеріалу в процесі експлуатації, але ускладнює його деградацію та утилізацію після використання [1].

Накопичення відходів НПМС у навколишньому середовищі є актуальною екологічною проблемою, оскільки природні процеси розкладання таких матеріалів відбуваються надзвичайно повільно [2]. За даними літератури, більшість синтетичних поліолефінів практично не піддаються мікробному розщепленню в ґрунтових умовах без попередньої фізичної або хімічної модифікації поверхні [3]. У результаті полімерні волокна зберігаються в екосистемах у вигляді макро- та мікропластикових фрагментів.

© Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Сучасні наукові дослідження зосереджені на пошуку мікроорганізмів, здатних ініціювати біодеструкцію полімерів, а також на вивченні змін фізико-хімічних властивостей матеріалів під дією бактеріальних культур. НППМС зі складною волокнистою структурою наразі залишаються недостатньо дослідженими [4]. Це ускладнює оцінку реальних механізмів і швидкості їх біодеструкції в природних умовах.

Окремий інтерес становить використання вермікультури, зокрема, черв'яків *Eisenia fetida*, які здатні змінювати фізичні властивості субстрату, підвищувати його аерацію та стимулювати розвиток мікробіоти. У ряді робіт показано, що діяльність черв'яків може сприяти фрагментації полімерних матеріалів і опосередковано впливати на мікробіологічні процеси в ґрунті [5-7]. Проте дані щодо ефективності такого підходу саме для нетканних поліпропіленових матеріалів є обмеженими та суперечливими.

Проаналізовані літературні дані не дозволяють однозначно оцінити роль бактерій та вермікультури у процесах деструкції нетканних матеріалів у ґрунтового середовищі. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей біологічного впливу на структурні характеристики нетканних полімерів з метою обґрунтування можливостей їх екологічної утилізації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [8] показано, що мікробні консорціуми, ізольовані зі сміттєзвалища, здатні до біодеструкції поліпропіленових (PP) мікропластиків. Найбільш активний консорціум, який включав бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Rhodococcus* та *Stenotrophomonas*, забезпечив втрату маси поліпропілену до 17,8 % за 30 дб.

Дослідження [9] продемонстрували, що окремі штами бактерій, зокрема *Bacillus sp.* і *Rhodococcus sp.*, здатні колонізувати поверхню поліпропіленових (PP) мікропластиків і викликати їх часткову деструкцію. Після 40 дб *Rhodococcus sp.* і *Bacillus sp.* спричинили втрату маси PP приблизно на 6,4 % та 4,0 % відповідно. Це дослідження є одним із перших, яке показує спроможність окремих бактеріальних родів прямо руйнувати поліпропілен без попередньої обробки матеріалу, підкреслюючи потенціал таких штамів для біодеструкції полімерних відходів.

Авторами [10] показано, що бактерії штаму *Bacillus cereus PP-5* здатні колонізувати поверхню поліпропіленового порошку та спричинити його мікробну деструкцію. Протягом 30 днів інкуба-

ції на поверхні зразків спостерігалися видимі тріщини, ерозії та утворення біоплівки, що свідчить про біохімічну і фізико-хімічну модифікацію полімеру під дією бактерії, включно з окиснювальними процесами та початковим розривом полімерних ланцюгів.

Дослідниками [11] встановлено, що бактерії штаму *Fictibacillus phosphorivorans*, ізольовані з прісноводних осадов, здатні колонізувати поверхню поліпропілену та спричинити його біодеструкцію. За 30 днів експерименту спостерігалось до 10 % втрати маси матеріалу. Біодеструкція відбувалася переважно під впливом бактерії як єдиного біологічного агента, без додаткових хімічних чи фізичних обробок, що підкреслює потенціал цього штаму для утилізації полімерних відходів.

Антарктичні штами бактерій *Pseudomonas sp. ADL15* та *Rhodococcus sp. ADL36* досліджували на здатність розкладати мікрополіпропілен (PP) у мінеральному середовищі (Bushnell – Haas) без органічних джерел вуглецю, де поліпропілен слугував єдиним субстратом для росту мікроорганізмів, протягом 40 днів. *Pseudomonas* спричинив до 17 % втрату маси PP, а *Rhodococcus* до 7 %. Структурні зміни і пошкодження поверхні полімеру свідчили про ефективну бактеріальну біодеструкцію [12].

**Виклад основного матеріалу.** За результатами попередніх досліджень встановлено, що застосування вермікультури із залученням *Eisenia fetida* забезпечує часткову біодеструкцію НППМС, у ферментованому субстраті на основі соняшникового лушпиння, що підтверджується зменшенням маси зразків та змінами їхньої мікроструктури. Отримані результати свідчили про позитивну динаміку процесу та доцільність подальшої інтенсифікації біорозкладання шляхом залучення додаткових біологічних агентів [5].

Метою даного дослідження стало вивчення впливу комбінованого біологічного комплексу вермікультури *Eisenia fetida* та бактеріального штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* УКМ В-109 на процес біодеструкції одноразових медичних виробів із нетканого поліпропіленового матеріалу.

Для проведення експерименту використовували ферментований субстрат на основі модифікованого соняшникового лушпиння (СЛ). Зразки НППМС розміром 15×2 см розміщували у контейнерах об'ємом 1 л за контрольованих умов: температура 15–25 °С, вологість субстрату 60 – 80. Експериментальну схему сформовано з трьох дослідних груп (табл. 1).

## Умови проведення експерименту

№ групи	Назва групи	Умови експерименту зразків НПС у субстраті на основі модифікованого СЛ
1	Контрольна	без додавання біологічних агентів
2	Дослідна	з вермікультурою <i>Eisenia fetida</i>
3	Комбінована	з біокомплексом <i>Eisenia fetida</i> та <i>P. chlororaphis subsp. aureofaciens</i> УКМ В-109

Масу зразків НПС визначали торсіонними вагами WT-500. Структурні зміни матеріалу аналізували методом оптичного мікроскопіювання з використанням цифрового мікроскопа Digital Microscope MM-2288-5X-BN при збільшенні у 200 разів. Температуру, електропровідність та рівень рН субстрату контролювали за допомогою приладу Hanna HI 991300. Механічні властивості НПС після експозиції оцінювали шляхом випробувань на розрив із використанням розривної машини РМІ-5 відповідно до вимог стандарту ISO 9073-3 [13]. Отримані дані дозволяли оцінити зміни міцнісних характеристик матеріалу під впливом різних біологічних факторів. Тривалість експерименту становила 60 діб. Через кожні 10 днів проводили зважування зразків, мікроскопічний аналіз їхнього стану та фіксацію змін у структурі й цілісності матеріалу.

Результати оптичних досліджень поверхні зразків НПС після біодеструкції наведені на рисунку 1.

Аналіз поверхні зразків НПС на 20-ту добу експерименту у системі з поєднанням вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій роду *Pseudomonas* показав, що структура поліпропіленових волокон майже не змінилась. На 60-ту добу експерименту спостерігалися нерівномірності поверхні та порушенні суцільності шару спанбонду. Такі морфологічні перетворення свідчать про деструкцію матеріалу під впливом комбінованої біологічної

дії, порівняно з варіантами без бактеріального компонента.

На рисунку 2 представлено порівняльну характеристику ефективності біологічного розкладу НПС у різних експериментальних умовах, що підтверджує перевагу використання комбінованої системи вермікультури з бактеріями.

Зменшення маси зразків НПС у всіх дослідних варіантах свідчить про перебіг процесів біодеструкції матеріалу, однак найбільш виражена динаміка втрати маси спостерігалася у системі з комбінованим застосуванням вермікультури *Eisenia fetida* та бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109. Порівняно з вермікультуванням без додавання бактерій та контрольним варіантом, застосування біокомплексу суттєво посилювало деструкцію НПС.

Активність *Eisenia fetida* сприяє формуванню умов, сприятливих для розвитку мікробіоти. Водночас введення бактеріального штаму *P. chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 підсилює мікробіологічну складову процесу за рахунок синтезу ферментів і біологічно активних метаболітів, що полегшують подальше перетворення матеріалу у форми, доступні для дії інших мікроорганізмів.

У ході дослідження оцінювали вплив поєднання вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas* на електропровідність субстрату і перебіг процесів

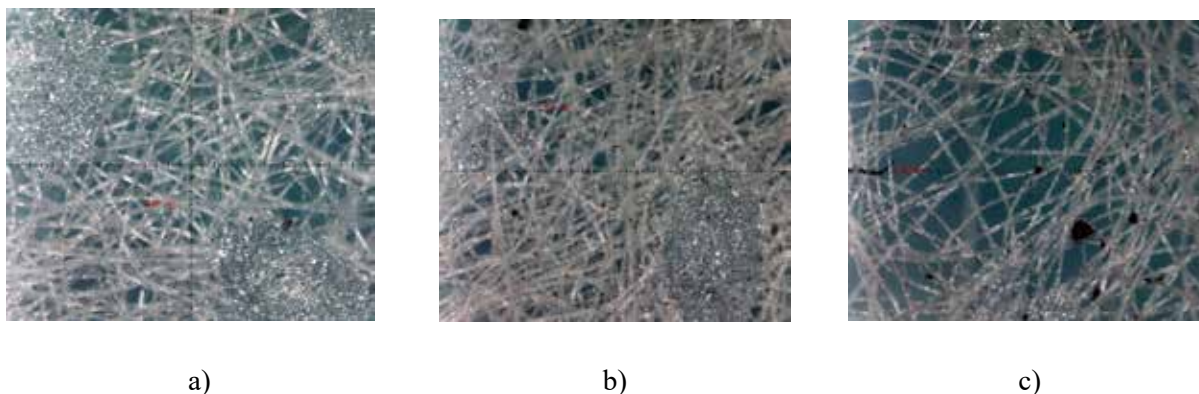


Рис. 1. Результати оптичних досліджень поверхні зразків НПС після біодеструкції у субстратах а) первинний зразок, б) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida*, в) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida* та бактеріями *Pseudomonas*

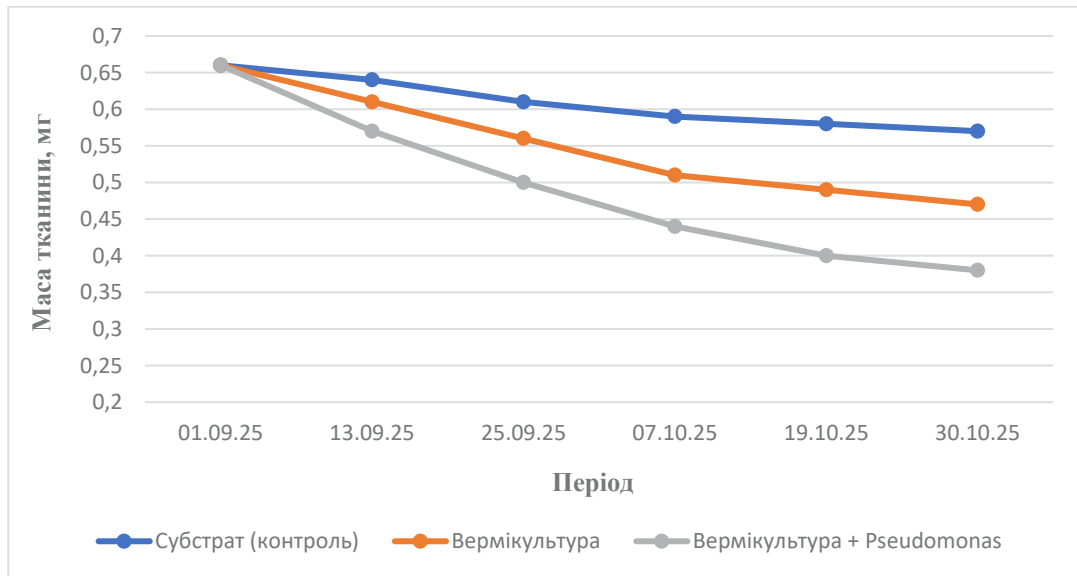


Рис. 2. Порівняння ефективності біологічного розкладу НПСМ у субстраті

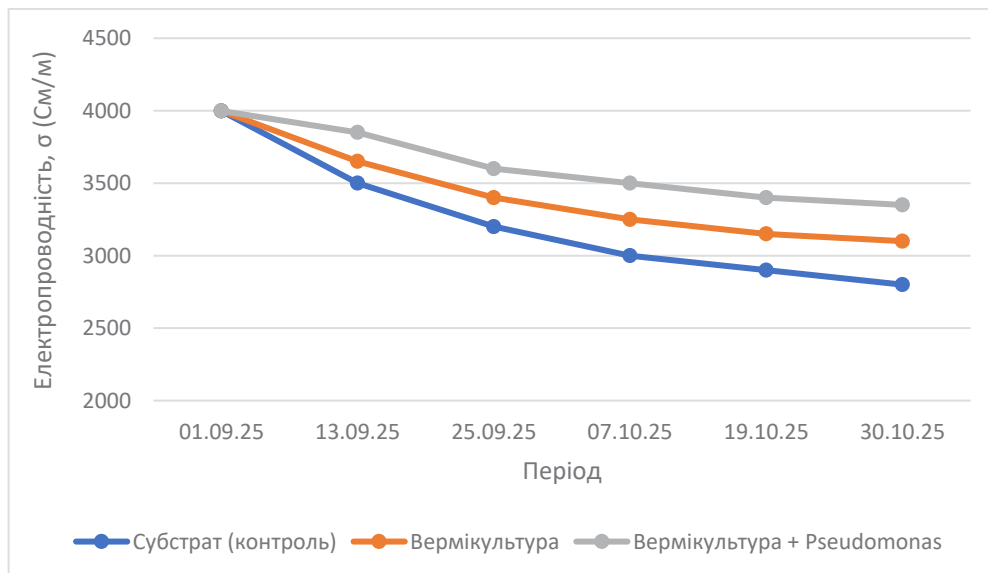


Рис. 3. Зміна електропровідності в експериментальних групах

біодеструкції НПСМ. Електропровідність субстрату розглядали як показник змін середовища, зумовлених активністю черв'яків і мікроорганізмів у процесі біодеструкції НПСМ (рис. 3)

Упродовж експерименту в усіх варіантах спостерігалось зниження електропровідності субстрату. Найбільш інтенсивне зменшення показника відмічене в контрольному варіанті, тоді як за наявності вермікультури цей процес був менш вираженим. Найвищі значення електропровідності протягом усього періоду дослідження зафіксовано у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що свідчить про

активні мікробіологічні процеси та накопичення продуктів метаболізму в субстраті.

Початковий середній діаметр волокон НПСМ становив 0,021 мкм. Після завершення експерименту зафіксовано істотні зміни морфології волокон залежно від умов експозиції. У варіанті з використанням *Eisenia fetida* середній діаметр волокон спанбонду зменшився з 0,021 мкм до 0,008 мкм, тобто на 0,013 мкм, що відповідає зниженню на 61,9% від початкового значення. У контрольному субстраті без біологічних агентів діаметр волокон зменшився з 0,021 мкм до 0,013 мкм, що становить 38,1%. У зразках з поєднанням *Eisenia fetida* та

бактерій штаму *P. chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 зменшення діаметра волокон складо 0,015 мкм, що відповідає 71,4%, і є максимальним серед досліджуваних умов.

На рисунку 4 наведено порівняльну динаміку біорозкладання НПМС у субстратах з *Eisenia fetida*, з поєднанням вермікультури та бактерій, а також без біологічних агентів, що наочно демонструє їх вплив на структуру та цілісність волокон.

Отримані результати свідчать, що вермікультування сприяє прискоренню процесів деструкції полімерного матеріалу за рахунок активності мікроорганізмів та дії ферментів, які виділяються в процесі життєдіяльності вермікультури, а також завдяки їхній взаємодії з бактеріями *Pseudomonas*.

Продовж експерименту показники рН субстрату регулярно контролювали (рис. 5). В усіх варіантах спостерігалася поступова зміна кислотності властивостей субстрату. Найбільш виражене зниження рН зафіксовано у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій *Pseudomonas*. Значення рН у цьому субстраті зменшилося з 7,9 на початку дослідження до 7,55 на 50-ту добу експерименту. У варіанті з використанням лише *Eisenia fetida* зафіксовано менш інтенсивне зниження рН: показник змінився з 7,9 до 7,72. Натомість у контрольному субстраті без біологічних агентів значення рН залишалось відносно стабільним і навіть демонструвало незначне підвищення з 7,9 до 7,98.

Отримані результати свідчать, що присутність вермікультури, а особливо її поєднання з бакте-

ріями, активізує біохімічні процеси в субстраті. Зниження рН може бути пов'язане з утворенням органічних кислот, продуктів метаболізму черв'яків і мікроорганізмів, а також із посиленням перебігом процесів біорозкладання полімерного матеріалу.

З графіка на рисунку 6 видно, що зниження механічних властивостей, зокрема міцності на розрив, відображає структурні зміни матеріалу, викликані біодеструкцією. Це дозволяє оцінити швидкість деградації матеріалу та його придатність для застосування в біологічно активних середовищах.

Найбільше зниження міцності на розрив спостерігалось у варіанті з поєднанням вермікультури та бактерій роду *Pseudomonas*, що свідчить про порушення структури волокон НПМС внаслідок біодеструкції. Це явище пояснюється синергічною дією двох біологічних агентів: механічним подрібненням і перемішуванням субстрату культурою *Eisenia fetida* та ферментативною активністю бактерій, які здатні розщеплювати складні органічні компоненти полімеру.

**Висновки.** Проведені дослідження підтверджують, що біодеструкція НПМС, застосовуваного у медичних одноразових виробках, відбувається значно швидше за наявності вермікультури та мікроорганізмів. У контрольних зразках, які перебували у субстраті без додавання вермікультури та мікроорганізмів, процеси деградації мали уповільнений характер і проявлялися менш виражено.

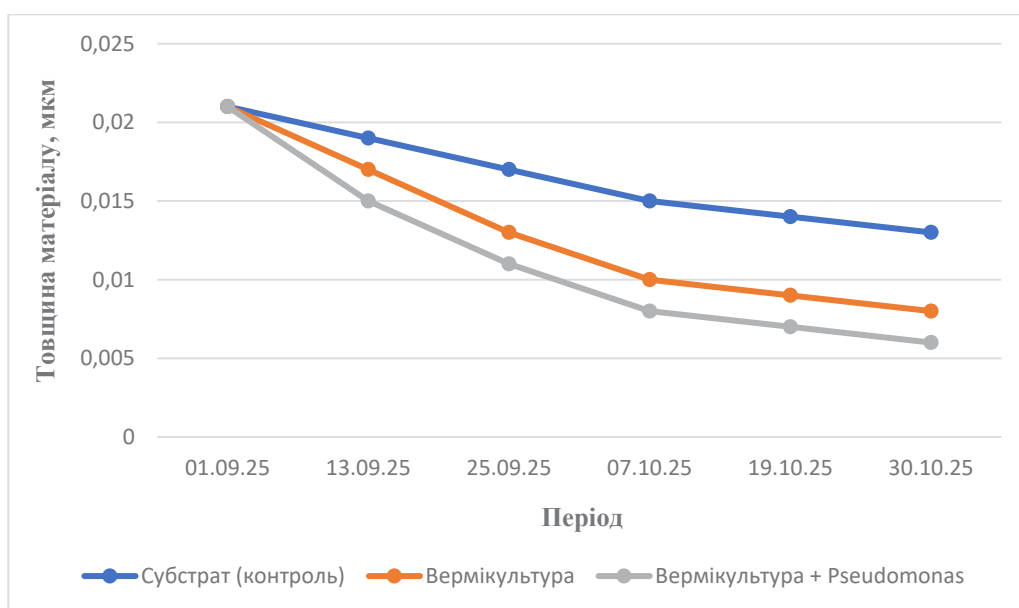


Рис. 4. Порівняльна динаміка біодеструкції НПМС в субстратах

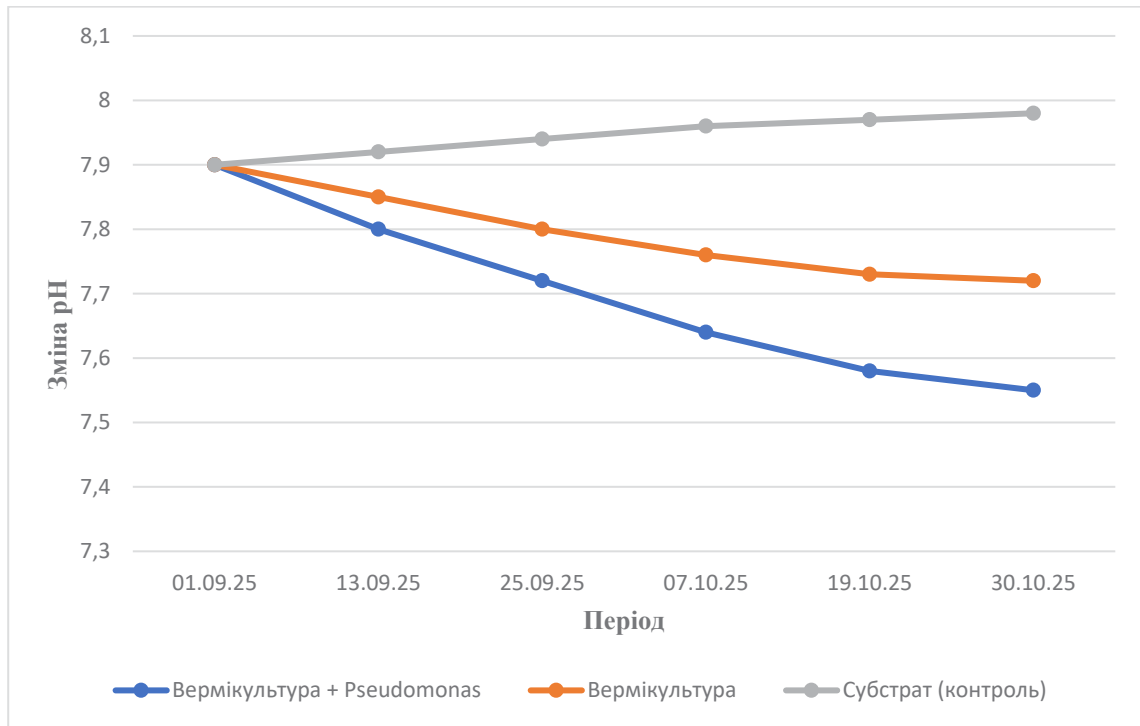


Рис. 5. Графік зміни рН під впливом мікробіологічної активності

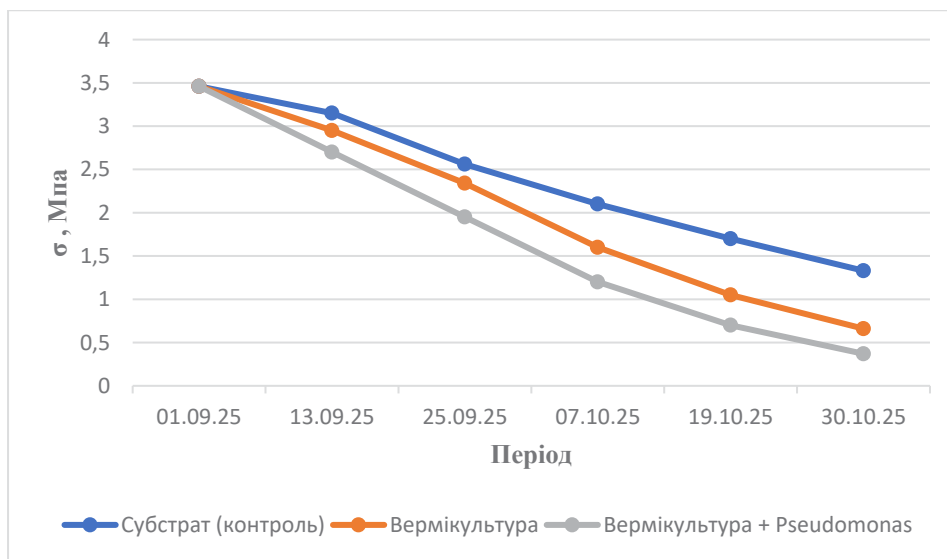


Рис. 6. Залежність міцності на розрив від субстрату

Застосування вермікультури *Eisenia fetida* сприяло активізації біохімічних процесів у субстраті, що відобразалося у зміні його фізико-хімічних показників та поступовому порушенні структури волокон НПМС. Найбільш інтенсивні процеси біодеструкції зафіксовано у комбінованій системі з використанням вермікультури і бактерій штаму *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* УКМ В-109, де спостерігалось максимальне зменшення маси зразків, істотне зниження механічних властивостей, зокрема міцності на розрив.

Динаміка електропровідності та рН субстрату свідчить про активний перебіг мікробіологічних процесів у варіантах із біологічними агентами. Підвищені значення електропровідності в комбінованій системі вказують на накопичення продуктів метаболізму, тоді як зниження рН може бути пов'язане з утворенням органічних кислот і посиленням процесів біорозкладання полімерного матеріалу. Сукупність зазначених змін підтверджує синергічну дію біологічних агентів (вермікультури та бактерій *Pseudomonas*) у процесі деструкції НПМС.

## Список літератури:

1. Andrady A. L. *Plastics and environmental sustainability*. Chichester : Wiley, 2015. 248 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119009405>
2. Мітіна Н. Б., Мініна Ю. О., Герасименко В. О. Оцінка здатності до розкладання матеріалу Meltblown під час вермікультування. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування: матеріали Міжнар. наук. конф. (Харків, 27–28 квітня 2023 р.)*. Харків : ДБТУ, 2023. С. 131–132.
3. Shah A. A., Hasan F., Nameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 2008. Vol. 26, Iss. 3, P. 246–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
4. Ahmed T., Shahid M., Azeem F. et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25, Iss. 8. P. 7287–7298. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
5. Мітіна Н. Б., Мініна Ю.О. Переробка полімерних відходів вермікультуванням. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України. 2025. Том 36 (75) № 1. 205–210 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/29>
6. Khaldoon S., Lalung J., Maheer U. et al. A Review on the Role of Earthworms in Plastics Degradation: Issues and Challenges. *Polymers*. 2022. Vol. 14, Iss. 21. Art. 4770. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214770>
7. Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третьяков А.О. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультування Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України. 2024. Том 35 (74) № 1. 113–117. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/19>
8. Choonut A., Wongfaed N., Wongthong L. et al. Microbial degradation of polypropylene microplastics and concomitant polyhydroxybutyrate production: An integrated bioremediation approach with metagenomic insights. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 490. Art. 137806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025>
9. 9. Auta H. S., Emenike C. U., Jayanthi B., Fauziah S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 127. P. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
10. Xue H., Chen X., Jiang Z. et al. Biodegradation of polypropylene by *Bacillus cereus* PP-5 isolated from waste landfill. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025. Vol. 296. Art. 118205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118205>
11. Eiamsa-ard P. Polypropylene Biodegradation by *Fictibacillus phosphorivorans* Isolated from Freshwater Sediment. *The Journal of Industrial Technology*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 131–146. DOI: <https://doi.org/10.14416/j.ind.tech.2024.04.009>
12. Habib S., Iruthayam A., Abd Shukor M. Y. et al. Biodeterioration of Untreated Polypropylene Microplastic Particles by Antarctic Bacteria. *Polymers*. 2020. Vol. 12, Iss. 11. Art. 2616. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12112616>
13. Матеріали текстильні. Методи випробування нетканих матеріалів. Частина 3. Визначення розривального навантаження та видовження під час розриву (ISO 9073-3:1989, IDT) : ДСТУ ISO 9073-3:2003. [Чинний від 2004-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 6 с. (Національний стандарт України).

### Mitina N.B., Mitina Yu.O. ASSESSMENT OF DESTRUCTIVE PROCESSES IN POLYPROPYLENE MEDICAL WASTE UNDER BIOLOGICAL INFLUENCE

*The current increase in the volume of polymer waste, in particular disposable medical products, necessitates the search for environmentally safe and effective methods of disposal. Non-woven polypropylene materials, in particular spunbond, are widely used in medical practice, but are characterised by low natural decomposition capacity, which leads to their accumulation in the environment. One promising biotechnological approach to solving this problem is to combine vermiculture with the use of microorganisms capable of destroying complex organic compounds. To improve the processes of biodegradation of polymeric medical waste, the article investigates the destruction of non-woven polypropylene spunbond material with the participation of *Eisenia fetida* vermiculture and *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* UKM B-109 bacteria. The change in the mass of non-woven polypropylene material samples and mechanical properties, as well as the dynamics of the physicochemical indicators of the substrate, in particular pH and electrical conductivity, were evaluated. It was found that in the control variant without biological agents, the degradation of non-woven polypropylene material occurred slowly. In the presence of vermiculture, a decrease in the pH of the substrate and stabilisation of electrical conductivity were observed, indicating the activation of biochemical processes. Maintaining elevated electrical conductivity values and a more intense decrease in pH was observed in the system combining vermiculture and *Pseudomonas* bacteria, as confirmed by the maximum loss of mass of*

*nonwoven material samples and a significant decrease in their tensile strength. It has been shown that the use of vermiculture in combination with Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens bacteria provides a significantly higher intensity of biodegradation of non-woven polypropylene material compared to the control variant and the system using only vermiculture, which indicates the synergistic action of biological agents. The results obtained can be used in the development of environmentally safe technologies for the disposal of medical polymer waste.*

**Keywords:** *biodegradation, biohumus, biological organism, Eisenia fetida, bacteria, Pseudomonas, vermicomposting, vermiculture, biomass yield, microorganisms, polymers, polymer waste, composite, polymer composite, processing, technology, substrate, environmental condition, pollution, municipal waste, landfill, soil, soil pollution, soil conditions, anthropogenic impact, waste, industrial waste, recycled waste, environmental safety, ecology, ecological condition.*

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026