

УДК 661:606

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/29>**Міміна Н.Б.**Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій**Міміна Ю.О.**Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ПЕРЕРОБКА ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯМ

Сучасний світ стикається з глобальною проблемою накопичення полімерних відходів, що мають тривалий період розкладу та негативно впливають на екосистеми. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку інноваційних методів утилізації відходів полімерних матеріалів. Проаналізовано переваги вермикультивування порівняно з традиційними методами утилізації, такими як спалювання або захоронення, які супроводжуються значними екологічними ризиками. Вермикультивування є одним із перспективних способів переробки відходів, що поєднує екологічну безпеку та економічну ефективність. У статті досліджено можливість переробки полімерного нетканого матеріалу (спанбонд) методом вермикультивування, розглянуто вплив цього матеріалу на життєдіяльність червоних каліфорнійських черв'яків виду *Eisenia foetida*. Проведено аналіз динаміки біорозкладання спанбонду та визначено оптимальні умови для цього процесу, такі як склад субстрату, рівень вологості та температури. Встановлено, що процес біодеструкції спанбонду відбувається швидше під впливом біологічних об'єктів виду *Eisenia foetida*. Черв'яки можуть впливати на мікробіологічну активність у субстраті, що прискорює біодеструкцію спанбонду. В зразках без додавання у компост черв'яків розкладання було менш вираженим. Спанбонд характеризується високою стійкістю до розкладання, але за наявності органічного субстрату, збагаченого мікроорганізмами та під впливом ферментів, які виділяють черв'яки відбувається поступова зміна фізико-хімічних властивостей матеріалу, зокрема зміна структури волокон і зниження міцності матеріалу, що вказує на процес біодеструкції. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення нових екологічно безпечних технологій утилізації медичних полімерних відходів шляхом поєднання вермикультивування з іншими біотехнологічними підходами.

Ключові слова: біорозкладання, спанбонд, полімерні відходи, переробка, вермикультивування, біогумус, біологічний об'єкт *Eisenia foetida*, екологічна безпека.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості та зростання споживання матеріалів на основі полімерів, зокрема нетканих матеріалів із спанбонду, створюють серйозну екологічну проблему. Спанбонд використовується у багатьох сферах, таких як медицина (одноразовий одяг і маски), сільське господарство (мульчувальні матеріали), пакування тощо. Завдяки своїй довговічності та стійкості до розкладання цей матеріал накопичується в навколишньому середовищі, спричиняючи забруднення ґрунтів, водних ресурсів і повітря [1].

Традиційні методи утилізації, такі як спалювання, захоронення супроводжуються викидами токсичних речовин (діоксини, фурани, оксиди азоту, сірчаний ангідрид, вуглекислий газ, чадний газ, важкі метали) та призводять до накопичення у навколишньому середовищі, що негативно сприяє на екосистеми та людину [2]. Таким чином, існує гостра потреба у розробці нових

екологічно безпечних і ефективних методів переробки та утилізації полімерних відходів. Одним із перспективних підходів є використання біологічних методів, зокрема вермикультивування [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нетканый синтетичний матеріал (спанбонд) широко використовується в медицині, сільському господарстві та будівництві. Через його стійкість до розкладання, накопичення спанбонду становить екологічну проблему. Використання вермикультивування для переробки органічних відходів є перспективним методом біорозкладання. Деякі науковці досліджують можливість розкладання синтетичних полімерів за участю дощових черв'яків. Авторами доведено, що вони можуть сприяти розкладанню поліпропілену, одного з компонентів спанбонду [4]. Однак ці результати не можна безпосередньо застосувати до спанбонду через його специфічний склад і структуру. Інші дослідники [5] розглядають можливість розкла-

дання поліпропілену за допомогою бактерій, які виділені із кишечника воскових черв'яків. Японські вчені методом хімічно-структурних досліджень вивчали механізми впливу кишкових мікроорганізмів дощових черв'яків на полімерні матеріали. Їхні дослідження свідчать, що мікрофлора кишкового тракту черв'яків має здатність частково руйнувати полімерні зв'язки, що сприяє їхньому біорозкладанню. Результати показали, що розкладання поліпропілену є повільним процесом і потребує додаткових досліджень [6]. Отже, вермикультивування має потенціал для біорозкладання синтетичних полімерів, але необхідні подальші дослідження для оцінки його ефективності.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження біорозкладання полімерного матеріалу медичного призначення (спанбонду) вермикультурою *Eisenia fetida* при оптимальних умовах.

Виклад основного матеріалу. У статті розглянуто біодеструкцію одноразових хірургічних шапочок методом вермикультивування, що дозволяє залучати біологічні об'єкти для переробки медичних полімерних відходів, які традиційно вважаються складними для біорозкладу.

Для проведення експерименту обрали вид червоних каліфорнійських черв'яків *Eisenia fetida*, оскільки вони активно переробляють органічні матеріали. Використовували ферментований субстрат на основі модифікованого соняшникового лушпиння. Зразки спанбонду на основі поліпропілену (PP) розміром 15x2 см помістили у прозорі контейнери об'ємом 1 літр при оптимальних умовах температури 15–25°C, вологості субстрату 60–80 %.

Для експерименту створено дві дослідні групи: перша зі зразків спанбонду в умовах вермикультивування з *Eisenia fetida*; друга без черв'яків. Зважування проводили на торсіонних вагах WT-500, мікроскопіювали зразки на оптичному приладі Digital Microscope MM-2288-5X-BN, вимірювали температуру, електропровідність, рівень pH на приладі Hanna HI 991300. Експеримент на міцність проводили за допомогою розривної машини PMI-5, яка дозволяє вимірювати силу, необхідну для розриву матеріалу під впливом навантаження. Для цього зразки спанбонду піддавалися поступовому натягу до моменту їх розриву. Поведінка матеріалу під час навантаження дозволяло оцінити механічні властивості спанбонду та його здатність витримувати різні рівні навантаження. Визначення розривної міцності здійснювалося згідно з ISO 9073-3 [7].

Тривалість експерименту складала 50 діб. Кожні 20 днів зважували зразки спанбонду та перевіряли стан матеріалу за допомогою цифрового мікроскопа при збільшенні у 200 разів. Фіксували зміни у структурі, розмірі та стані спанбонду (рис. 1). Спостерігали за поведінкою черв'яків, які взаємодіяли з матеріалом. Біорозкладання зразків відбувалось за рахунок біологічної активності мікроорганізмів і черв'яків.

Вивчення поверхні зразків на 20 добу в процесі вермикультивування показали, що пористі поліпропіленові волокна майже не змінили своєї структури, відповідно до вихідного матеріалу спанбонд, на 60 добу рельєф волокон почав змінюватись, про що свідчить зміна розмірів і форми

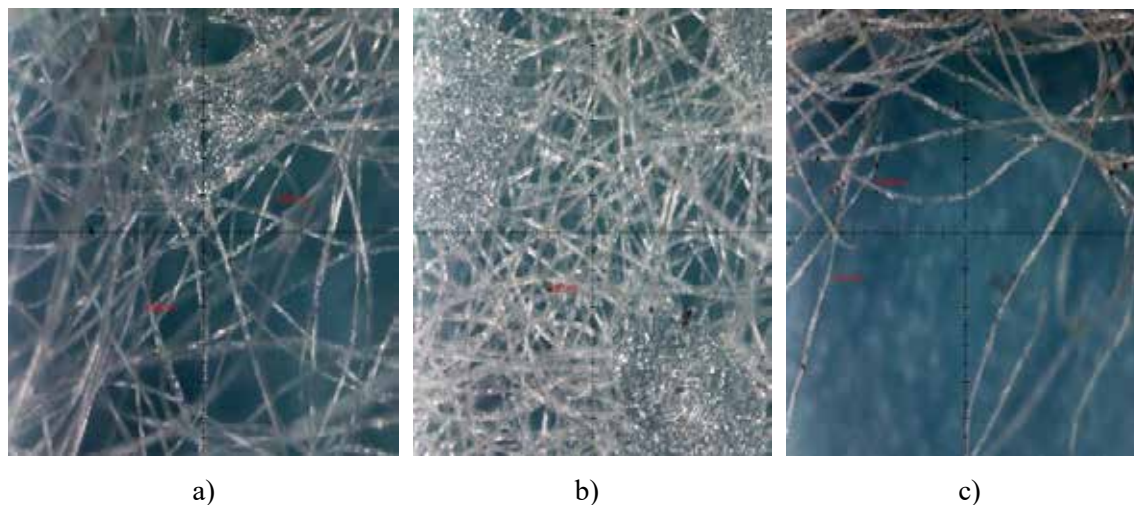


Рис. 1. Результати оптичних досліджень поверхні зразків PP матеріалу спанбонд після біодеструкції у вермикомпості а) первинний зразок, б) зразок у звичайному субстраті, с) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida*

волокон, порушення суцільності шару досліджуваних матеріалів.

На графіку зображено порівняння ефективності біологічного розкладу нетканого матеріалу спанбонд у субстраті (рис. 2).

Зменшення маси зразків спанбонду підтверджує, що черв'яки сприяють біорозкладу. Діяльність черв'яків сприяє прискоренню мінералізації органічних компонентів, а їх травна система сприяє кращому переведенню матеріалів у формі, доступній для подальшого розкладу мікроорганізмами. Це також свідчить про потенціал використання черв'яків для переробки певних типів відходів, таких як органічні матеріали або біорозкладні полімери, у компостуванні чи інших біологічних процесах.

В процесі дослідження визначали, як присутність культури *Eisenia foetida* впливає на електропровідність субстрату та на процеси біорозкладання матеріалу спанбонд, оскільки зменшення електропровідності свідчить про зміни в складі середовища (збільшення концентрації іонів, продуктів життєдіяльності черв'яків чи мікробіологічної активності).

Електропровідність в обох зразках стала меншою (рис. 3), це свідчить про кілька можливих процесів у середовищі, які впливають на біодеградацію або хімічні зміни в субстраті. У процесі біорозкладання розчинені іони (солі, органічні кислоти) можуть зменшуватися, що веде до зниження електропровідності. Це результат погли-

нання іонів органічних кислот мікроорганізмами, черв'яками або іншими організмами, які беруть участь у розкладі матеріалу.

Розмір волокон первинного зразка спанбонду складав 0,021 мкм, по завершенню експерименту розмір волокон зразка, який знаходився у субстраті зі *Eisenia fetida* зменшився до 0,008 мкм, а той що знаходився у субстраті до 0,014 мкм. Вермикомпостування сприяє сприйняттю розкладання матеріалів за рахунок активності мікроорганізмів і ферментів, що виділяються черв'яками.

На рисунку 4 зображено порівняльну динаміку біорозкладання матеріалу спанбонд в субстратах з *Eisenia fetida* та без них, показано їх вплив на структуру та цілість волокон.

Наведені дані вказують на більший вплив культури *Eisenia foetida* на деградацію волокон, разом зі звичайним субстратом. Змінення розмірів волокон зумовлене тим, що деякі мікроорганізми, що симбіотично живуть із вермикультурою, можуть виробляти ферменти або хімічні речовини, здатні атакувати полімерний матеріал. Це спричинило руйнування полімерних зв'язків і зміну морфології волокон.

В процесі вермикомпостування, субстрат проходячи через кишечник *Eisenia foetida*, має стабілізований рівень кислотності. При традиційному компостуванні або у природних умовах при розкладанні органічних відходів в ґрунт вивільняються органічні кислоти. У процесі проведення дослідів постійно контролювались показники рН (рис. 5).

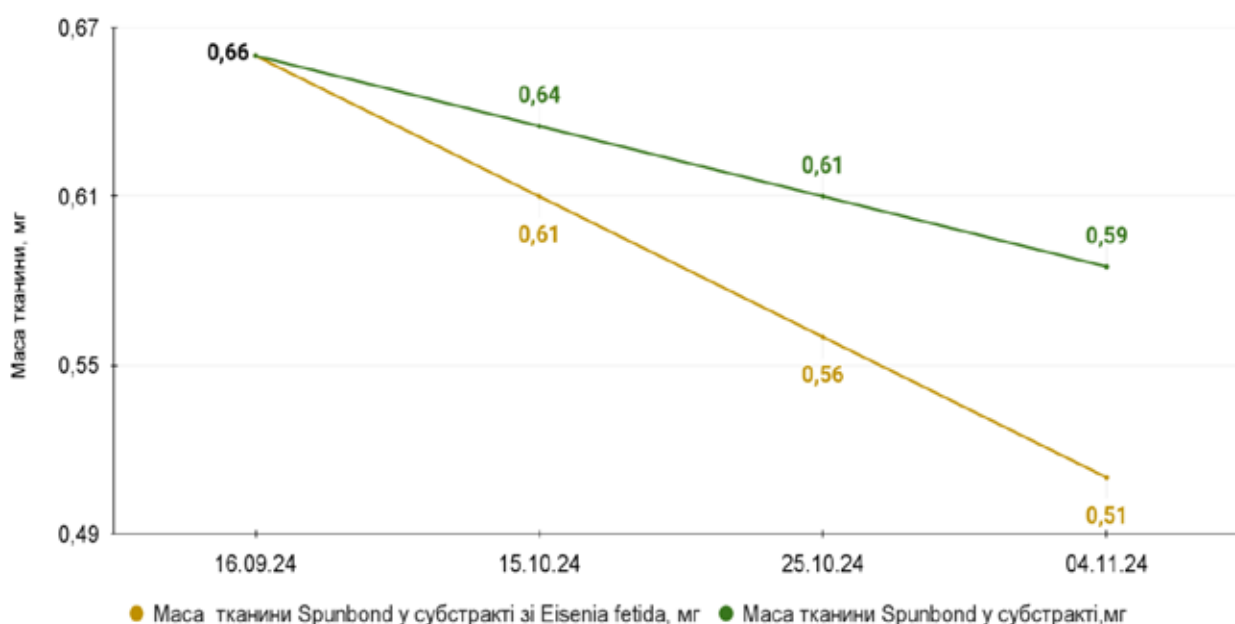


Рис. 2. Порівняння ефективності біологічного розкладу нетканого матеріалу спанбонд у субстраті

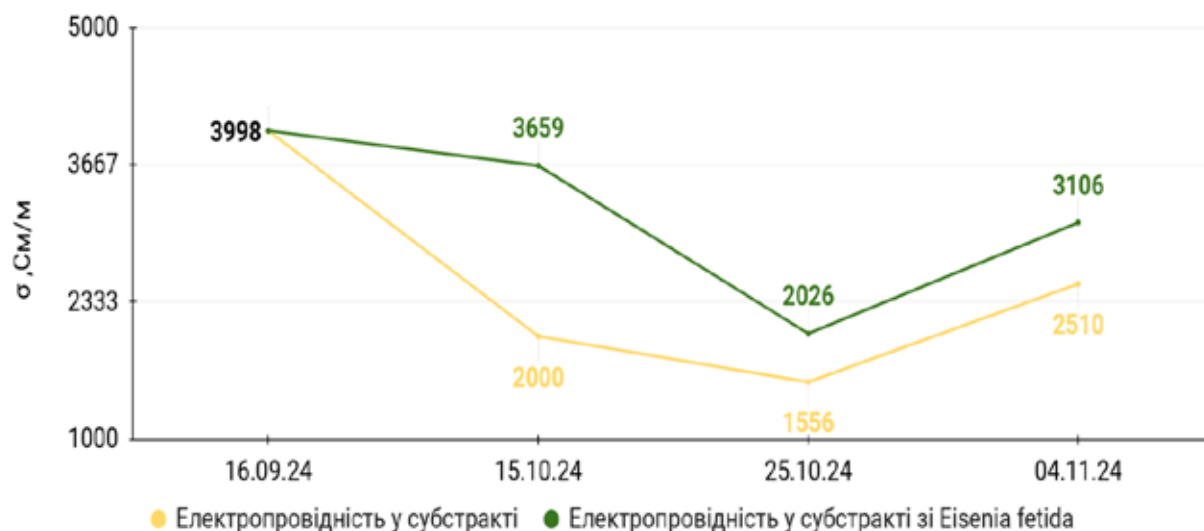


Рис. 3. Зміна електропровідності в експериментальних групах

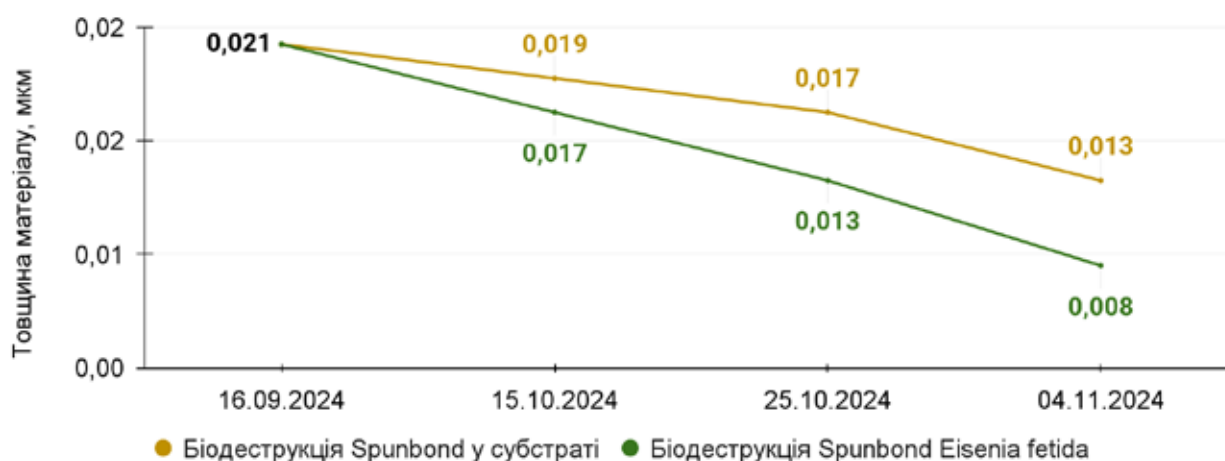


Рис. 4. Порівняльна динаміка біодеструкції матеріалу спанбонд в субстратах з *Eisenia fetida* та без них

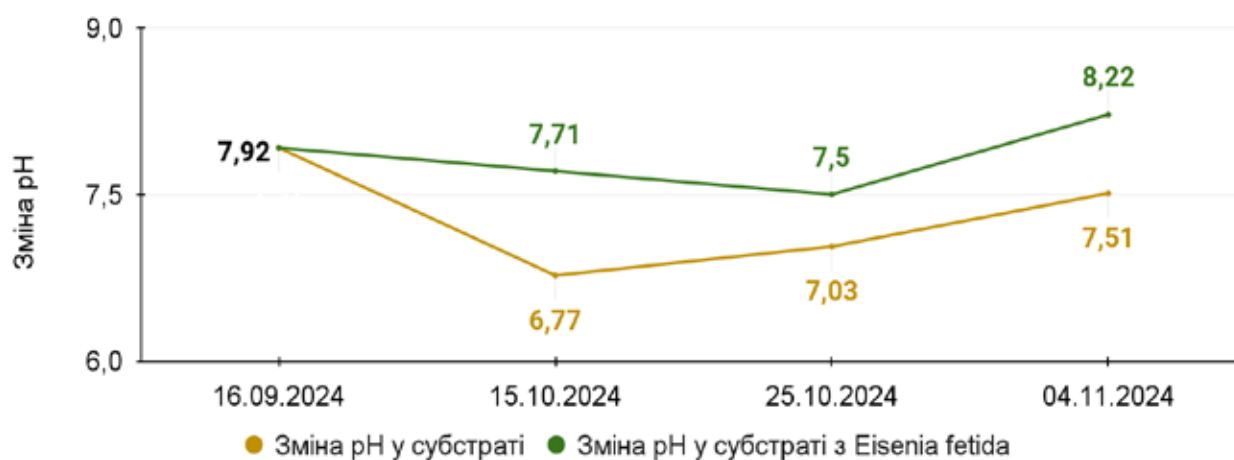


Рис. 5. Графік зміни pH під впливом мікробіологічної активності

Отже, кінцеві значення рН досліджуваних зразків спанбонд, які піддавались вермикомпостуванню з участю *Eisenia foetida* мають тенденцію до збільшення значення рН, через вивільнення органічних кислот в процесі розкладання субстрату. Збільшення рН у субстраті, що містить поліпропілен та черв'яків, може свідчити про кілька процесів:

- черв'яки самі по собі виділяють аміак у незначній кількості, їх діяльність (переробка органічних речовин) сприяє зростанню активності мікроорганізмів, які розкладають азотисті сполуки і можуть вивільняти аміак у компост;
- поліпропілен може бути частиною органічного матеріалу, який через мікробіологічні процеси вивільняє аміак або інші лужні з'єднання.

З графіка на рисунку 6 видно, що зниження механічних властивостей, таких як міцність на розрив, чітко виражено через структурні зміни матеріалу, спричинені біорозкладанням. Це дозволяє оцінити швидкість розкладання матеріалу, його вплив на навколишнє середовище та придатність до використання в біологічно активних середовищах.

У процесі вермикультивування спостерігається поступове зменшення міцності матеріалу спанбонду, що виявляється через появу мікротріщин, розшарування та зниження механічних властивостей. Це пояснюється активністю каліфорнійських черв'яків, які фізично руйнують структуру матеріалу, а також присутністю мікроорганізмів, що сприяють частковому розкладу полімеру.

Зменшення міцності матеріалу є свідченням того, що вермикультивування може бути корисним для часткового зниження стабільності спанбонду, але для досягнення значної біодеградації матеріал потребує додаткових модифікацій або поєднання з іншими методами утилізації.

Висновки. Дослідженнями встановлено, що процес біорозкладання нетканих матеріалів, які використовуються в медицині, а саме спанбонд, відбувається швидше під впливом біологічних об'єктів виду *Eisenia foetida*. В зразках без черв'яків розкладання було менш вираженим. Виявлено, що в процесі вермикультивування відбувається поступова зміна фізико-хімічних властивостей спанбонду, зокрема зміна структури волокон і зниження міцності матеріалу.

Біодеструкція спанбонду в субстраті з *Eisenia fetida* відбулася швидше, ніж у субстраті без них, враховуючи такі фактори:

- черв'яки активно перемішують субстрат, прокладаючи проходи і перемішуючи матеріал через свої системи травлення. Механічне пошкодження волокон спанбонду сприяє його швидшому розкладанню;
- черв'яки сприяють зростанню мікроорганізмів (бактерій, грибів), які розкладають органічні матеріали. Вони виділяють ферменти, які прискорюють біодеструкцію спанбонду;
- присутність черв'яків змінює умови в субстраті (підвищує вологість, змінює рН), що також сприяє біодеструкції матеріалу.

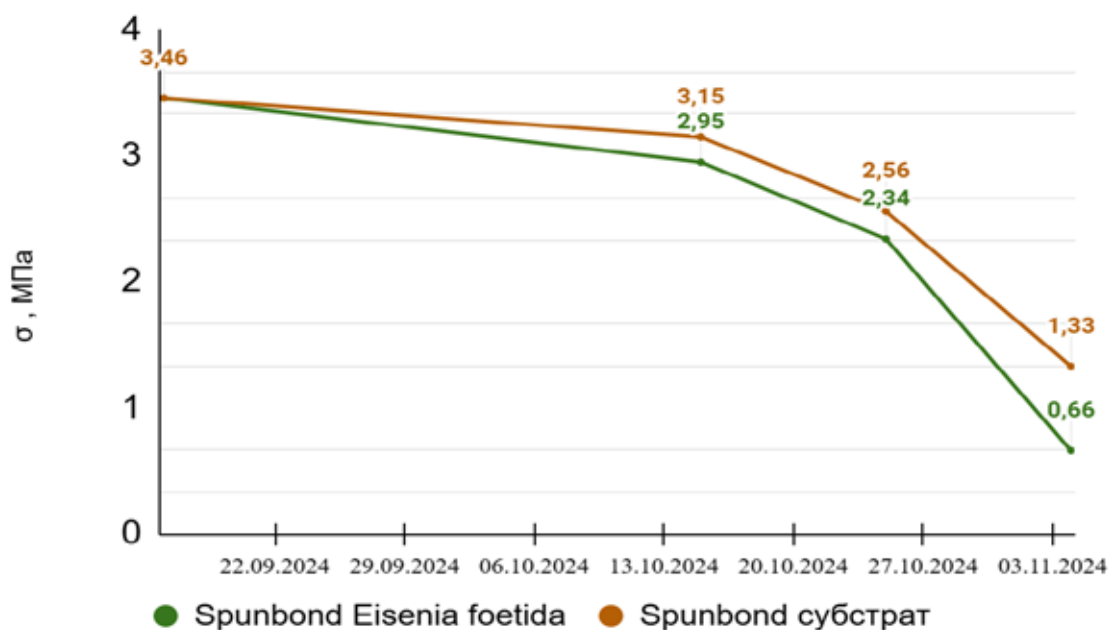


Рис. 6. Залежність міцності на розрив від субстрату

Результати дослідження показують, що процес вермікультивування сприяє розкладанню поліпропіленового спанбонду за рахунок поєднання механічного руйнування матеріалу черв'яками та дії мікроорганізмів, які активно розвиваються в їхньому середовищі. Дослідження демонструє

потенціал використання вермікультивування для зменшення негативного впливу спанбонду на довкілля. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення технологій біорозкладання шляхом поєднання вермікультурних методів із іншими біотехнологічними підходами.

Список літератури:

1. Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О., Герасименко В.О. Оцінка здатності до розкладання матеріалу Meltblown під час вермікультивування. Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування [Електронний ресурс]: матеріали Міжнар. наук. конф., Харків 27-28 квітня 2023. С. 131-132
2. Matsunaga, A. Biodegradation Behavior of a Sheath frasl; Core Type of Bi-component Spunbond Nonwovens Made from Poly (butylene succinate) frasl; Poly(lactic acid). 2012. Sen'i Gakkaishi, 68(8), 218–224. doi:10.2115/fiber.68.218
3. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультивування / Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третяков А.О. / Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідectvo про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія KB № 22895-12795P від 11.08.2017 року). Том 35 (74) № 1 2024. – с. 113-117
4. Ghatge, Sunil & Yang, Youri & Ahn, Jae-Hyung & Hur, Hor-Gil. (2020). Biodegradation of polyethylene: a brief review. Applied Biological Chemistry. 63. 10.1186/s13765-020-00511-3.
5. Ali, Sameh & Elsamahy, Tamer & Zhu, Daochen & Sun, Jianzhong. (2023). Biodegradability of polyethylene by efficient bacteria from the guts of plastic-eating waxworms and investigation of its degradation mechanism. Journal of Hazardous Materials. 443. 130287. 10.1016/j.jhazmat.2022.130287.
6. Xiang Yun Debbie Soo, Suxi Wang, Chee Chuan Jayven Yeo, Jiuwei Li, Xi Ping Ni, Lu Jiang, Kun Xue, Zibiao Li, Xunchang Fei, Qiang Zhu, Xian Jun Loh, Polylactic acid face masks: Are these the sustainable solutions in times of COVID-19 pandemic?, Science of The Total Environment, Volume 807, Part 3, 2022, 151084, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151084>.
7. ДСТУ ISO 9073-3:2003 Матеріали текстильні. Методи випробування нетканних матеріалів. Частина 3. Визначення розривального навантаження та видовження під час розриву (ISO 9073-3:1989, IDT)

Mitina N.B., Mitina Yu.O. PROCESSING OF POLYMERIC WASTE BY VERMICULTURE

The modern world is facing a global problem of accumulating polymeric waste that has a long decomposition period and negatively affects ecosystems. In this regard, there is a need to find innovative methods for the utilization of waste polymeric materials. The article analyzes the advantages of vermiculture compared to traditional methods of disposal, such as incineration or disposal, which are accompanied by significant environmental risks. Vermiculture is one of the most promising methods of waste recycling that combines environmental safety and economic efficiency. The article investigates the possibility of processing polymeric nonwoven material (spunbond) by vermiculture, and considers the impact of this material on the vital activity of red California worms of the species Eisenia foetida. The dynamics of spunbond biodegradation was analyzed and the optimal conditions for this process, such as substrate composition, humidity, and temperature, were determined. It was found that the process of spunbond biodegradation is faster under the influence of biological objects of the Eisenia foetida species. Worms can affect the microbiological activity in the substrate, which accelerates the biodegradation of spunbond. In samples without the addition of worms, decomposition was less pronounced. Spunbond is characterized by high resistance to decomposition, but in the presence of an organic substrate enriched with microorganisms and under the influence of enzymes secreted by worms, there is a gradual change in the physical and chemical properties of spunbond, in particular, a change in the fiber structure and a decrease in the strength of the material, which indicates the process of biodegradation. Further research can be aimed at improving new environmentally friendly technologies for the disposal of medical polymer waste by combining vermiculture with other biotechnological approaches.

Key words: biodegradation, spunbond, polymeric waste, recycling, vermiculture, vermicompost, biological object Eisenia foetida, environmental safety.