УДК 54-126:504 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.4

Н. М. БЕРЕЗНЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екологічного менеджменту та підприємництва
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-00003-4589-3829

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ, ЩО БІОЛОГІЧНО РОЗКЛАДАЮТЬСЯ З ДОДАВАННЯМ КРОХМАЛЮ

У даній роботі розглянуто задачі, пов'язані з утилізацією полімерних відходів, а також труднощі щодо їх рециклінгу, проведено аналіз існуючих підходів для оптимізації процесу створення полімерних композицій, що біологічно розкладаються з додаванням крохмалю, досліджено вплив кількості крохмалю на фізико-механічні та реологічні характеристики полімерної композиції на основі поліетилену. Проілюстровано тенденції, які обумовили необхідність розробки інноваційних матеріалів, здатних розкладатися на нешкідливі речовини (вода, біомаса та ін..) під дією навколишнього середовища (світло, волога, мікроорганізми та ін.), які стали екологоорієнтованим засобом для вирішення проблеми утворення та накопичення твердих полімерних відходів.

Проаналізовано сучасні тенденції досліджень та застосування полімерних композицій на основі крохмалю, що біологічно розкладаються, підкреслюючи їхній потенціал для сприяння сталому розвитку та екологічно чистим полімерним матеріалам у різних галузях промисловості. Також проаналізовано способи модифікації крохмалю перед введенням в полімерну композицію, визначено, що фізичні способи модифікації крохмалю є економічно більш доступними та дешевшими, ніж методи хімічної модифікації, і не утворюють стічних вод, що містять солі, реагенти або побічні продукти реагентів, що є доцільним з екологічної точки зору.

В представленій роботі застосовано методику одержання композицій з поліетилену, севілену, крохмалю, стеарату кобальту та лимонної кислоти. Визначено, що розпад полімерних композицій які біологічно розкладаються впливає на зміну фізико-механічних показників, які залежать від виду добавок та його характеристик, структури, що сформована під час переробки матеріалу та ін. Показано вплив ультрафіолетового випромінювання та дії мікроорганізмів на розклад поліетиленової композиції з вмістом крохмалю. Визначено, що після витримування композиції в компості, розклад поліетиленової композиції з вмістом крохмалю проходить більш інтенсивно у порівнянні з впливом ультрафіолетового опромінення.

Ключові слова: *полімерні відходи, крохмаль, полімери, що біологічно розкладаються, біополімери, управління відходами.*

N. M. BEREZNENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Environmental Management
and Entrepreneurship
Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-00003-4589-3829

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECT OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF POLYMER COMPOSITIONS THAT ARE BIODEGRADABLE WITH THE ADDITION OF STARCH

This paper considers the problems associated with the utilization of polymer waste, as well as the difficulties of recycling it, analyzes existing approaches to optimizing the process of creating biodegradable polymer compositions with the addition of starch, and investigates the effect of the amount of starch on the physical, mechanical, and rheological characteristics of a polyethylene-based polymer composition. It illustrates the trends that have led to the need to develop innovative materials capable of decomposing into harmless substances (water, biomass, etc.) under the influence of the environment (light, moisture, microorganisms, etc.), which have become an environmentally friendly means of solving the problem of the formation and accumulation of solid polymer waste.

The current trends in research and application of biodegradable starch-based polymer compositions are analyzed, highlighting their potential to contribute to sustainable development and environmentally friendly polymer materials in various industries. Methods of starch modification before introduction into the polymer composition are also analyzed, it is determined that physical methods of starch modification are economically more accessible and cheaper than chemical modification methods, and do not generate wastewater containing salts, reagents or reagent by-products, which is environmentally appropriate.

© Березненко Н. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

In the presented work, a method of obtaining compositions from polyethylene, sevilen, starch, cobalt stearate and citric acid was applied. It was determined that the decomposition of biodegradable polymer compositions affects the change in physical and mechanical parameters, which depend on the type of additives and their characteristics, the structure formed during material processing, etc. The effect of ultraviolet radiation and the action of microorganisms on the decomposition of a polyethylene composition containing starch is shown. It was determined that after the composition is kept in compost, the decomposition of the polyethylene composition containing starch is more intensive compared to the effect of ultraviolet radiation.

Key words: *polymer waste, starch, polymers, biodegradable, biopolymers, waste management.*

Постановка проблеми

Проблема захисту зовнішнього середовища набуває глобального характеру. А саме, серйозну занепокоєність викликає швидкий і практично не керований ріст споживання синтетичних пластмас в багатьох галузях застосування, що призводить до різкого збільшення відходів. Так у 2022 р. в Україні утворилось майже 39 млн. м^3 побутових відходів, або понад 7 млн. тон. Відходи розміщуються і зберігаються на 5700 сміттєзвалищах і полігонах загальною площею майже 8 тис. га. У 2022 р. перероблено та утилізовано лише 9,9 % побутових відходів, з них: 1,66 % спалено, 8,24 % – потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії. [1]. Найбільш прийнятним способом вирішення таких важливих питань є створення матеріалів, що розкладаються.

Керуючись підходами збереження навколишнього середовища, вже на початку 1970-х рр. науковці інтенсивно почали розвивати роботи зі створення біо-, фото- й водоруйнівних полімерів. Отримання полімерів, що біологічно розкладаються зайняло пріоритетне місце у наукових розробках. Проте роботи в цьому напрямі зіткнулися з певними складностями технологічного та економічного характерів, зокрема це неможливість поєднувати у виробах високі фізико-механічні характеристики, гарний зовнішній вигляд, здатність до швидкого руйнування й низьку вартість [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з варіантів досягнення компромісу між інтересами держави, екологів і підприємств може стати використання у виробництві пластикової упаковки спеціальної добавки d_2w, що забезпечує розкладання полімерів. Добавка d_2w виробляється англійською компанією Symphony (Великобританія) і застосовується у виробництві виробів з поліетилену і поліпропілену, основних матеріалів для виготовлення упаковки. Вона успішно використовується в 60 країнах світу, серед яких Канада, Великобританія, США, Франція, Італія, Бразилія, Індія і ін. Найбільшими споживачами добавки є підприємства-виробники плівок і пакетів, що поставляють свою продукцію роздрібним мережам, мережам готелів, ресторанам. Упаковкою, що містить добавку d_2w, користуються такі крупні компанії, як Walmart, Tesco, KFC, Pizza Hut, Marriott, Nescafe, ZARA і багато інших. Ефективність добавки d_2w, її безпека, допуск до контакту з харчовими продуктами, екологічність підтверджені сертифікатами провідних лабораторій і випробувальних центрів світу (наприклад, RAPRA) [3].

У багатьох країнах світу почали застосовувати в якості прискорювача біологічного розкладу полімерів добавку TDPA (TDPA – Totally Degradable Plastic Additives). Це змусить пластик легко розкладатися при похованні сміття на звалищах або при попаданні в ґрунт, крім того, його можна піддавати вторинній переробці без розкладання [4].

Не дивлячись на економічні витрати, пов`язані з переобладнанням технологгічних ліній, ціною на вихідну сировину, усвідомлюючи важливість світової екологічної проблеми та під тиском споживачів, деякі компанії взяли на себе зобов’язання зменшити вплив своєї упаковки на навколишнє середовище. Таким чином, продажі біорозкладної упаковки, зокрема в США значно збільшуються щороку [5].

Згідно з дослідженням Marketsand Markets Research, світовий ринок біорозкладного пакування до 2026 р. досягне $77,7 млрд, щорічно зростаючи на 14,5 % [6]. Це зумовлено жорсткішим екологічним регулюванням та зростанням вимог споживачів до «зеленого» пакування. Під полімерами, що біологічно розкладаються розуміється здатність матеріалу руйнуватися в природних умовах на складові, нешкідливі для навколишнього середовища під дію мікроорганізмів, УФ-випромінення, світла, сонячної радіації та інших природних факторів. Створення матеріалів, що біологічно розкладаються на основі крохмалю засноване на декількох принципах: отримання термопластичного крохмалю та виробів на його основі; отримання сумішей з синтетичними і природними полімерами; отримання похідних крохмалю екструзійним методом. На відміну від більшості пластмас, полімери, що біологічно розкладаються можуть розщеплюватися в умовах зовнішнього середовища за допомогою мікроорганізмів, бактерій та грибків. Науковцями проводяться роботи по створенню полімерних композицій, що біологічно розкладаються, зокрема серед них запропонована методика синтезу біодеградабельних плівокна основі агар-агару та молочайних рослин. Результати досліджень показали, що біодеградабельні плівки наоснові агар-агару та молочайних рослин мають гарні показники міцності, еластичності, стійкі до помірної вологості, що поряд із природнім складом і достатньо простим методом отримання робить їх перспективним матеріалом для використання в косметології, медицині, як пакувальний матеріал [7].

Крохмаль, будучи природним полісахаридом, має унікальні властивості і особливості, до числа яких відносяться: щорічне відновлення і невичерпність сировинних ресурсів для його отримання (картопля, кукурудза,

жито, пшениця, горох та ін.), що вигідно відрізняє його від целюлози, що одержується з деревини, мінімальний термін дозрівання якої навіть для швидкорослої деревини складає 18–20 років; легка змінюваність і надання нових практично цінних властивостей шляхом хімічного, фізичного, бактеріологічного або комбінованого впливу; можливість здійснення з крохмалем всіх перетворень, відомих з хімії низькомолекулярних сполук; можливість створення на основі крохмалю або в поєднанні з синтетичними полімерами нових матеріалів, що біологічно розкладаються; не токсичність і зручність роботи з крохмалем як з полімером. При створенні полімерних композицій з вмістом крохмалю, що біологічно розкладаються слід враховувати і досліджувати такі важливі показники, як вплив вмісту крохмалю, компатибілізаторів та пластифікаторів на механічні, теплові та бар'єрні характеристики сумішей. Крохмальні суміші демонструють різноманітні мікроструктури, які залежать від конкретного складу суміші та умов, за яких вона обробляється. В роботі [8] проаналізовано саме вплив мікроструктури на показники якості крохмальної суміші (міцність, в'язкість та бар'єрні властивості).

Існує досвід попередньої обробки крохмалю перед введенням в полімерну композицію. Так в роботі [9] проілюстровано, що фізична обробка впливає на розташування молекул крохмалю в гранулах. Термічна обробка, включаючи мікрохвильове випромінювання, попередню желатинізацію та термовологову обробку є найбільш широко застосовуваними фізичними процесами. Мікрохвильова обробка в основному застосовується під час виготовлення плівок з вмістом крохмалю. Мікрохвильова обробка підвищує розчинність у воді та зменшує кристалічність, в'язкість та прозорість крохмалю. Крім того, мікрохвильова обробка має ряд економічних переваг, таких як енергозбереження, висока конверсія та швидкість.

Процеси біорозкладу відходів полімерних матеріалів у природних умовах є мало вивченими із-за їхньої новизни, складності та відсутності швидкої економічної вигоди. Для їх більш глибокого дослідження необхідно проводити роботи щодо основ механізму регулювання процесом біорозкладання і мати засоби для кількісної оцінки процесів, що відбуваються.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є аналіз існуючих та розробка нових науково обґрунтованих підходів для оптимізації процесу створення полімерних композицій, що біологічно розкладаються з додаванням крохмалю, дослідження впливу кількості крохмалю на фізико-механічні та реологічні характеристики полімерної композиції на основі поліетилену.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення досліджень застосовано методику одержання композицій з поліетилену (ПЕВТ), севілену, крохмалю, стеарату кобальту та лимонної кислоти, рецептурний склад досліджуваних композицій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рецептурний склад ПЕ композицій з СЕВА, крохмалем, стеаратом кобальту та лимонною кислотою

№ з/п	Компонент № композиції	Вміст компоненту в композиції, % мас.			
		1	2	3	4
1	ПЕВТ15803-020	44	39	30	95
2	СЕВА з вмістом вінілацетату до 15 %	25	20	19	4
3	Крохмаль картопляний	30	40	50	0
4	Стеарат кобальту	0,5	0,5	0,5	0,5
5	Лимонна кислота	0,5	0,5	0,5	0,5

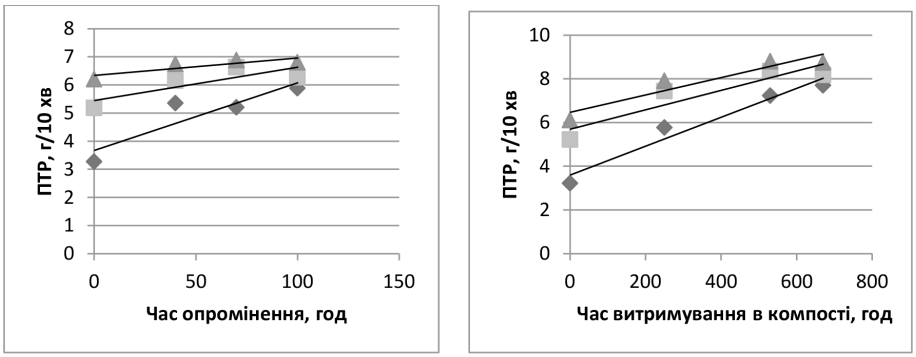
Визначення впливу ультрафіолетового (УФ) випромінювання на властивості композицій проводились опроміненням зразків нефільтрованим світлом ртутно-кварцевої лампи ДТР – 220 протягом різної кількості годин (40, 70 і 100 год.). Зразки у вигляді кругів діаметром 13 см. встановлювали в камеру для опромінювання, де підтримували температуру 20 ± 5 °С, довжина хвилі $\lambda > 300$ нм. Визначали енергетичну освітленість лампи. Лампа ДТР – 220 виробництва Полтавського заводу є газорозрядною лампою з мінімальним променевим потоком 18 Вт в діапазоні 240–320 нм. Температура на поверхні зразка підтримувалась в межах 23–25 °С тривалість випромінювання Сонцем УФ-хвиль за рік по території України дорівнює 4380 годин ($15{,}768 \cdot 10^6$ с).

Біорозклад досліджуваних полімерних композицій під дією біологічних факторів визначали при витримуванні зразків під дією біологічних факторів визначали при витримуванні зразків в компості, що був приготовлений за методикою, описаною в ДСТУ [10].

Досліджувані зразки у вигляді кругів діаметром 13 см. занурювали в компост на глибину 5–15 см від поверхні, витримували при температурі 20 ± 5 °С, кислотність ґрунту pH = 6–7,5, вологість 30 ± 5 %. При введенні в ПЕВТ різних за складом сумішей домішок, після дії УФ опромінення і витримки в компості спостерігається зміна властивостей полімеру, в тому числі реологічні характеристики – значення показника течії розплаву (ПТР), фізико-механічні характеристики - межа міцності, відносне видовження при розриві. Розклад досліджуваних ПЕ композицій

оцінювали за ПТР, порівнюючи значення до та після витримування цих композицій під УФ опроміненням та дією мікроорганізмів компосту.

На рис. 1 приведені залежності зміни ПТР ПЕ-композицій № 1 – № 3 від часу витримування під УФ опроміненням (а) і в компості (б).



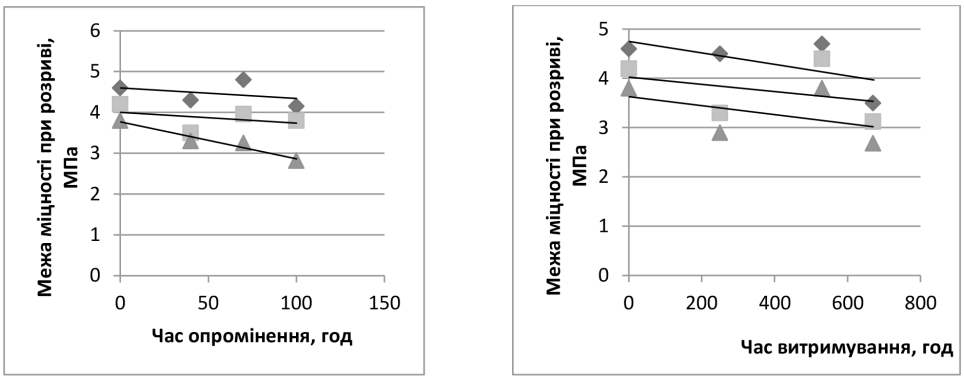
а) б)

Рис. 1. Залежності зміни ПТР ПЕ-композицій № 1 – № 3 від часу витримування під УФ опроміненням (а) і в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

На відрізку часу витримування зразків ПЕ композицій під УФ опроміненням і в компості, а саме: 100 і 670 годин відповідно, спостерігається збільшення ПТР, причому зі збільшенням часу різниця між ПТР композицій № 1 – № 3 зменшується. Звертаємо увагу, що значення ПТР для композиції № 1 (30 % крохмалю) нижчі ніж для композиції № 2 (40 % крохмалю) і ще нижчі ніж для композиції № 3 (50 % крохмалю). Збільшення значень ПТР для всіх композицій говорить про те, що в полімерному композиційному матеріалі проходить зменшення молекулярної маси та збільшення текучості полімеру, що свідчить про розклад композицій під дією УФ опромінення та витримуванні у компості.

Розклад полімерів і композицій прискореного розкладу впливає на зміну фізико-механічних показників, які залежать від виду добавок та його характеристик, структури, що сформована під час переробки матеріалу та ін. Композиції з такими добавками як крохмаль, стеарат кобальту та лимонна кислота, характеризуються зниженням величини міцності при розриві та коефіцієнтом відносного видовження.

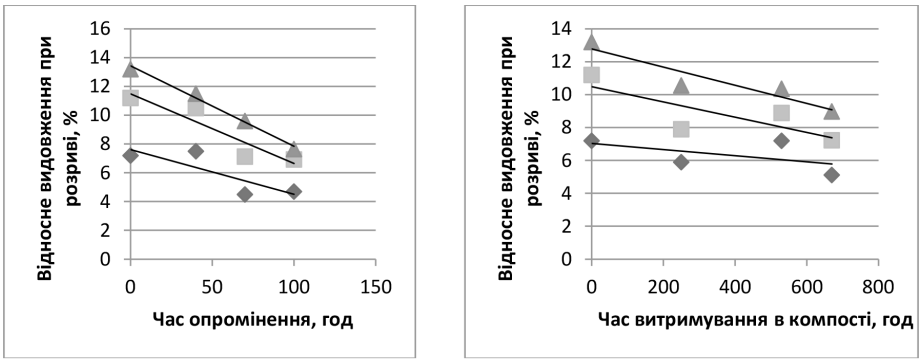
Підвищення ПТР в залежності від часу витримування в компості знаходяться в прямому зв'язку із зменшенням фізико-механічних показників композицій прискореного розкладу, які оцінювалися за межею міцності (рис. 2) та коефіцієнтом відносного видовження (рис. 3) при розриві.



а) б)

Рис. 2. Залежність межі міцності при розриві ПЕ композицій від часу опромінення (а) і витримування в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

Зниження фізико-механічних показників пояснюється тим, що зразки в процесі розкладу втрачають деякі компоненти своєї структури за рахунок фото деструкції при дії УФ опромінення і мікроорганізмів при витримуванні їх у компості.



а) б)

Рис. 3. Залежність коефіцієнту відносного видовження при розриві ПЕ композицій від часу УФ опромінення (а) і витримування в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

Висновки

Отже, показано вплив УФ випромінювання та дії мікроорганізмів на розклад ПЕ композиції. Визначено, що після витримування композиції в компості протягом 670 годин, розклад ПЕ композиції проходить більш інтенсивно у порівнянні з впливом УФ опромінення. Так, після компостування ПТР композиції збільшується до 8,81 г/10 хв, в той час, як після УФ опромінення ПТР складає 6,89 г/10 хв. З даних досліджень можна зробити висновок, що 100 год після УФ опромінення можна прирівняти до 200 год після витримування в компості з коефіцієнтом 1,2.

Не дивлячись на всі стримуючі економічні фактори, кількість досліджень по розробці пластичних мас, які біологічно розкладаються вказує на значні успіхи в цій області. З ростом споживання полімерів для тари і упаковки, а також інших побутових виробів одноразового використання, проблеми пластмасового сміття і його загроза навколишньому середовищу буде постійно зростати. У зв'язку з цим очікуване посилення законодавчих нормативів по обмеженню використання звичайних пластиків в якості тари і упаковки ще більше активізує розробки по створенню широкого ряду термопластів, які біологічно розкладаються з доступною ціною і необхідними властивостями.

Список використаної літератури

1. Довідка «Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік». Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: http://surl.li/rwagbn
2. Морозов, А. С. (2017). Деякі структурні, економічні та екологічні аспекти переробки біорозкладальних полімерів. *Технологія і техніка друкарства*, (3(57), 53–62. https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.102204
3. Biodegradable Plastic Technology. URL: https://www.symphonyenvironmental.com/technologies/biodegradable-plastic/
4. Біопластик ЛТД. URL: http://bioplastic.com.ua/dobavki/
5. Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022–2032). URL: https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradablepackaging-market
6. Šuput D., Popović S., Hromiš N., Ugarković J. (2021). Degradable packaging materials – sources, application and decomposition routes. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 25.2: 37–42.
7. Селіванова, Т., Столяренко, В., Ючинська, А., & Білецька, О. (2024). Синтез і характеристики біодеградабельних плівок на основі агар-агару. *Екологічний вісник Криворіжжя*, 8(8), 50–58. https://doi.org/10.55056/nocote.v12i0.728t
8. Poornima Singh, Vinay Kumar Pandey, Rahul Singh, Kunal Singh, Kshirod Kumar Dash, Sumira Malik, (2024). Unveiling the potential of starch-blended biodegradable polymers for substantializing the eco-friendly innovations, *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 15, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101065
9. Amaraweera SM, Gunathilake C, Gunawardene OHP, Fernando NML, Wanninayaka DB, Dassanayake RS, Rajapaksha SM, Manamperi A, Fernando CAN, Kulatunga AK, Manipura A. (2021). Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review. *Molecules*. Nov 15;26(22):6880. doi: 10.3390/molecules26226880. PMID: 34833972; PMCID: PMC862570
10. ДСТУ EN 13255:2008 «Геотекстиль та віднесені до геотекстилю вироби».

References

1. Dovidka "Stan sfery povodzhennia z pobutovymy vidkhodamy v Ukraini za 2022 rik". Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. [Reference "State of the sphere of household waste management in Ukraine for 2022". Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine.]. URL: http://surl.li/rwagbn [in Ukrainian].

2. Morozov, A. S. (2017). Deiaki strukturni, ekonomichni ta ekolohichni aspekty pererobky biorozkladalnykh polimeriv. [Some structural, economic and environmental aspects of the processing of biodegradable polymers] *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (3(57), 53–62. https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.102204. [in Ukrainian].

3. Biodegradable Plastic Technology. URL: https://www.symphonyenvironmental.com/technologies/biodegradable-plastic/

4. Bioplastyk LTD. [Bioplastic LTD] URL: http://bioplastic.com.ua/dobavki/. [in Ukrainian].

5. Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022–2032). URL: https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradablepackaging-market

6. Šuput D., Popović S., Hromiš N., Ugarković J. (2021). Degradable packaging materials – sources, application and decomposition routes. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 25.2: 37–42.

7. Selivanova, T., Stoliarenko, V., Yuchynska, A., & Biletska, O. (2024). Syntez i kharakterystyky biodehradabelnykh plivok na osnovi ahar-aharu. [Synthesis and characterization of biodegradable films based on agar-agar.] *Ekolohichnyi visnyk Kryvorizhzhia*, 8(8), 50–58. https://doi.org/10.55056/nocote.v12i0.728t. [in Ukrainian].

8. Poornima Singh, Vinay Kumar Pandey, Rahul Singh, Kunal Singh, Kshirod Kumar Dash, Sumira Malik, (2024). Unveiling the potential of starch-blended biodegradable polymers for substantializing the eco-friendly innovations, *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 15, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101065

9. Amaraweera SM, Gunathilake C, Gunawardene OHP, Fernando NML, Wanninayaka DB, Dassanayake RS, Rajapaksha SM, Manamperi A, Fernando CAN, Kulatunga AK, Manipura A. Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review. Molecules. 2021 Nov 15;26(22):6880. doi: 10.3390/molecules26226880. PMID: 34833972; PMCID: PMC862570.

10. DSTU EN 13255:2008 "Heotekstyl ta vidneseni do heotekstyliu vyroby". [Geotextiles and geotextile-related products]. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025