

АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОДНОРАЗОВОГО ПАКОВАННЯ

Самойленко Н.М., Гадаєва Ю.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

nataliia.samoilenko@khpi.edu.ua, yuliia.hadaieva@mit.khpi.edu.ua

У статті представлено огляд сучасного стану та тенденції виробництва і використання біополімерів для одноразового пакування. Проведено порівняння з традиційними пластиками та зроблено акцент на екологічних перевагах і механізмах біодеградації пластиків, здатних до біологічного розкладання. Визначено недоліки біополімерів, які перешкоджають їх поширенню використанню та заміні пластмас на основі викопної сировини, серед яких відзначаються нижчі експлуатаційні властивості, вища вартість, нерозвиненість інфраструктури збору, сортування та компостування. Проаналізовано основні типи біополімерів для одноразового пакування. Визначено, що у теперішній час серед біополімерів, які розкладаються, найбільші обсяги виробництва припадають на полілактид (37,1%), що майже у 7–8 разів перевищує цей показник для інших досить популярних біорозкладних матеріалів і робить його найперспективнішим матеріалом у пакуванні.

Особливу увагу приділено композитним сумішам на основі полілактиду, крохмалю та целюлози, які володіють синергетичним ефектом компонентів, високою біорозкладністю та механічною міцністю. Розглянуто перспективні напрямки досліджень щодо створення нових складів біополімерів з використанням сільськогосподарських відходів, зокрема, коноплі, бавовни, льону, очерету, соломи зернових, які поліпшують властивості матеріалів та мають сприяти зменшенню їх вартості.

Проаналізовано актуальні дослідження у напрямку модифікації біопластиків із застосуванням нанотехнологій та введенням наночасток оксиду цинку, срібла, діоксиду титану, міді і інших сполук, що дозволяють покращити механічні характеристики, термічну стабільність, регульовану біорозкладність біополімерам та надати матеріалам антимікробних властивостей.

В статті наголошується на необхідності інформування споживачів стосовно правильного сортування біорозкладних пакувальних матеріалів одноразового використання та відзначається необхідність удосконалення управління відходами біорозкладного пакування щодо створення інфраструктури збору, сортування та компостування таких відходів. *Ключові слова:* біополімери, одноразове пакування, біодеградація, полілактид, композити, наноматеріали, сільськогосподарські відходи, управління відходами, екологічна безпека.

Current aspects of the development and use of biopolymer materials for disposable packaging. Samoilenko N., Hadaieva Yu.

The article provides an overview of the current state and trends in the production and use of biopolymers for disposable packaging. A comparison with traditional plastics is conducted, emphasizing the environmental benefits and biodegradation mechanisms of biodegradable plastics. The disadvantages of biopolymers that hinder their widespread use and replacement of fossil-based plastics are identified, including lower performance properties, higher cost, and underdeveloped collection, sorting, and composting infrastructure. The main types of biopolymers for disposable packaging are analyzed.

It has been determined that, at present, among biodegradable biopolymers, polylactic acid (PLA) accounts for the largest share of production (37.1%), which is 7–8 times higher than other widely used biodegradable materials, making it the most promising material for packaging.

Particular attention is given to composite blends based on polylactic acid, starch, and cellulose, which exhibit a synergistic effect of components, high biodegradability, and mechanical strength. Promising research directions for developing new biopolymer compositions using agricultural waste—such as hemp, cotton, flax, reed, and cereal straw—are examined, as these materials improve properties and may help reduce costs.

Recent studies on modifying bioplastics using nanotechnology are analyzed, including the incorporation of nanoparticles of zinc oxide, silver, titanium dioxide, copper, and other compounds. These modifications enhance the mechanical properties, thermal stability, and controlled biodegradability of biopolymers while also providing antimicrobial properties.

The article highlights the importance of informing consumers about the correct sorting of biodegradable disposable packaging materials and emphasizes the need to improve biodegradable packaging waste management by developing a collection, sorting, and composting infrastructure. *Key words:* biopolymers, disposable packaging, biodegradation, polylactic acid, composites, nanomaterials, agricultural waste, waste management, environmental safety.

Постановка проблеми. На виробництво та переробку пластику припадає близько 3% світових викидів парникових газів. Зменшення вуглецевого сліду та накопичення відходів шляхом переробки не є ефективним, бо менше ніж 10% від сотень млн т щорічно виготовленого пластику переробляється у новий продукт.

Згідно зі звітом Програми ООН з навколишнього середовища, забруднення пластиком може скоротитися на 80% до 2040 року, якщо країни і компанії здійнять глибокі політичні та ринкові зміни, використовуючи існуючі технології [1]. На цьому шляху нові наукові розробки можуть мати практичну цінність, спонукаючи до розробки

нових екологічних технологій виготовлення пластичних матеріалів.

У даному зв'язку біополімерні матеріали стають ефективною заміною традиційного пластику, значну частину якого складає одноразове упакування. Порівняно з викопними пластмасами, біопластик може мати менший вуглецевий слід і демонструє вигідні властивості матеріалів, передбачаючи абсолютно нові функції, такі як здатність до компостування та в деяких випадках оптимізовані бар'єрні властивості [2].

Зважаючи на зазначене, розробка та впровадження біополімерів для одноразового пакування є важливим науково-практичним завданням для зменшення екологічного навантаження на довкілля та розвитку циркулярної економіки.

Розробці і використанню біопластику у одноразовому пакуванні присвячено багато досліджень, які розглядають питання складу біополімерів [3] використання на ринку [4], деградабельності [5]. Водночас ці питання вимагають більшої уваги та оцінки з точки зору їх практичного застосування в Україні, стан пакувальної індустрії якої погіршився під час війни і вимагає аналітичного підходу до її розвитку. Тому розгляд останніх досліджень у галузі пакувальних матеріалів, здатних до біорозкладу, може стати корисним при формуванні тенденцій розвитку пакувальної сфери в країні та запровадження в ній екоінновацій.

Актуальність дослідження. Пакування використовується для різних потреб та має багато функцій. Незважаючи на сучасні тенденції і зусилля щодо зменшення застосування пластикового пакування (перехід на пакування іншими матеріалами, обмеження щодо ваги товару, який упаковується, та ін.), його обсяги та, відповідно, утворені відходи залишаються надзвичайно великими. Попит на пластмаси постійно зберігається, а пакувальний сектор за даними 2021 року займає найбільшу частину ринку (44%), за ним, для порівняння, зі значно меншими показниками відзначається будівництво (18%), автомобільна промисловість (8%) та інші сфери [6].

Особливу проблему створює одноразове пакування, що загалом складає найбільшу частку пакувальних матеріалів, а також відходів пластмас, що формують тверді побутові відходи. Як зазначається [3], кожного року світова промисловість виробляє більше 300 млн т пластмаси та біля 50% цього обсягу викидається після одного використання.

Динаміка та прогнози світового виробництва біорозкладного пакування визначають, що його виробництво досягне 22 млн т до 2030 року навіть на тлі посилення екологічного регулювання [4], а у 2029 році складе приблизно 5,73 млн т [7]. У цьому зв'язку на сьогодні відзначається збільшення кількості досліджень та розробок щодо біорозкладних полімерів, а їх виробництво характеризується перспективністю.

Зважаючи на це, та на поширення користування наявними даними і науковими результатами щодо даної сфери, доцільним є аналіз найбільш розповсюджених у виробництві і використанні біополімерів, а також виявлення напрямків перспективних наукових досліджень щодо розробки та управління відходами біополімерів одноразового пакування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними. Авторський доробок зосереджений на аналізі найбільш поширених на сьогодні у виробництві та на ринку одноразових біорозкладних пакувальних матеріалів, а також визначенні актуальних тенденцій у розробці та перспективному застосуванні біополімерів для одноразового пакування, здатних до розкладання. Особлива увага приділяється вирішенню нагальних екологічних проблем, пов'язаних із накопиченням та рециклінгом пластикових відходів пакувальної продукції. Дослідження має значну теоретичну та практичну цінність для України, оскільки сприяє обґрунтуванню можливостей розробки та впровадження інноваційних екотехнологій у сфері пакувальної індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підкреслюють потенціал біорозкладних матеріалів, таких як полілактид (PLA), крохмаль та целюлоза, для заміни традиційних пластиків, що зменшує вуглецевий слід і забруднення довкілля. Дослідження [2, 3] підтверджують, що ці матеріали є перспективними для сталого розвитку. Українські науковці [4] наголошують на розвитку вітчизняного ринку біопластиків, відповідного європейським екологічним стандартам.

Використання сільськогосподарських відходів для виробництва PLA [8, 9] та вдосконалення його властивостей за рахунок натуральних волокон робить ці матеріали перспективними для екологічного пакування. Композити на основі PLA, крохмалю та целюлози [5, 10] поєднують високу біорозкладність із механічною міцністю, що підкреслюється також у роботах [2, 3]. Зазначається, що нанотехнології [11] відкривають нові можливості для покращення бар'єрних, антимікробних та механічних властивостей біополімерів. Водночас у наукових публікаціях відсутній широкий аналіз поточного стану наукових досліджень щодо найбільш затребуваних біорозкладних матеріалів одноразового використання та обмежено розглядається перспективність їх наукових розробок на поточний період.

Таким чином, розробка біополімерів для пакування є ключовим напрямком, який поєднує інноваційні технології та екологічний підхід для зменшення впливу на навколишнє середовище.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У статті проаналізовано актуальні проблеми використання біополімерів одноразового пакування, зокрема, щодо недостатньої експлуатаційної ефек-

тивності існуючих біополімерів і її підвищення, а також забруднення довкілля відходами та обмеженого розуміння механізмів їх біодеградації. Зроблено певний внесок у вирішення проблеми стосовно відсутності стратегій масштабного впровадження біопластиків у паковальну індустрію, а також недостатньої уваги до використання відновлюваної сировини, такої як сільськогосподарські відходи. Ці аспекти можуть стати одними з ключових для подальшого розвитку екологічно безпечних пластикових паковальних матеріалів.

Новизна. Дослідження полягає у вивченні сучасних біополімерів для одноразового пакування, зокрема, найбільш використовуваних композитів на основі PLA, крохмалю та целюлози, з акцентом на їх екологічні переваги, механізми біодеградації та вплив на довкілля. Вперше систематизовано та розширено проаналізовано дані щодо тенденцій у виробництві та споживанні біорозкладних пакувальних матеріалів одноразового використання та наукові дослідження стосовно покращання властивостей даних матеріалів, у тому числі з застосуванням нанотехнологій, а також перспектив використання сільськогосподарських відходів для виробництва біополімерів у контексті українських реалій.

Методологічне загальнонаукове значення дослідження полягає у застосування наукового підходу до оцінки біополімерів для одноразового пакування з точки зору їх актуального практичного використання у поєднанні з результатами наукових досліджень щодо підвищення їх властивостей, а також перспективних напрямків наукових досліджень з метою їх широкого впровадження.

Результати дослідження створюють основу для розробки ефективних рішень у сфері екологічно безпечного пакування, що сприяє зменшенню впливу на довкілля та підтримці переходу до сталого виробництва. Це відкриває нові можливості для впровадження інноваційних біорозкладних матеріалів для одноразового пакування, які відповідають сучасним екологічним вимогам та сприяють розвитку циркулярної економіки.

Викладення основного матеріалу. Біопластики – це полімери, отримані з природних або поновлюваних джерел, які поділяють на матеріали на біоснові, біорозкладні або ж розглядають їх як ті та інші. Перші повністю або частково отримані з відновлювальної сировини; «біорозкладні» ж природним способом розкладаються на CO_2 та H_2O у ґрунті чи воді під дією мікроорганізмів [3].

Полімери, здатні до біорозкладання, поділяються на біодеградовані, що розкладаються природним шляхом, та ті, що компостуються в особливих умовах.

Виділяються такі основні групи матеріалів:

- пластмаси на біологічній основі або частково на біологічній основі, які не піддаються біологічному розкладанню, такі як PE, PP або PET і технічні полімери на біологічній основі, такі як PTT або TPC-ET;

- пластмаси на біологічній основі та здатні до біологічного розкладання, такі як PLA, PHA або PBS;

- пластмаси, виготовлені на основі викопних ресурсів і піддаються біологічному розкладанню, наприклад PBAT [7].

Біопластик, представлений на ринку, поділяється на три основні групи [3]:

- 1) біопластик, що має біологічне походження та потенціал до біологічного розкладання (наприклад, крохмаль, целюлоза, білок, лігнін та хітозан);

- 2) біопластик, що виготовляється з біологічних та відновлюваних ресурсів, але не піддається біологічному розкладанню (наприклад, біо-ПВХ, біо-ПЕ, біо-ПП та біо-ПС);

- 3) біопластик, який розкладається на біологічно розкладні викопні (небіологічні) ресурси, такі як полібутиленсукцинат (PBS), полікапролактон (PCL) та полі (бутилен-адипат-ко-терефталат) (PBAT).

Серед біопластику, що розкладається, найбільший відсоток припадає на виробництво PLA (37,1%), значно менше – на SCPC (5,7%), PBAT (4,6%), PHA (4,1%) та PBS (1,3%) [7]. Найпоширенішими комерційними біопластиками на ринку є пластик на основі PLA та крохмалю.

Незважаючи на те, що властивості біополімерів в останній час значно покращилися, їх застосування як досконалого варіанту заміни традиційним полімерам є неоднозначним. Відзначаючи значні переваги даних біополімерів, слід визнати, що у порівнянні з пластиками на основі викопної сировини, такі матеріали у короткостроковий період ще не можуть стати альтернативою останнім. Основні переваги та недоліки біопластикового пакування представлені у таблиці 1.

Характеристика найбільш розповсюджених біопластиків одноразового застосування. PLA – один із найпоширеніших біополімерів у пакуванні, у тому числі харчовому, так як є безпечним при контакт з їжею. Він широко використовується для виробництва різної пакувальної продукції, має добрі експлуатаційні властивості, однак зважаючи на порівняно знижену термостійкість та газопроникність, обмежено застосовується для гарячих продуктів і газованих напоїв. Незважаючи на це, екологічність і здатність до біорозкладання робить PLA перспективним матеріалом для пакування [9]. Крім того, слід зазначити, що PLA краще піддається термічній обробці, ніж інші біопласти, і цей матеріал можна переробляти литтям під тиском, термоформуванням, екструзією плівки та видувним формуванням [3].

Сучасні тенденції у дослідженнях та виробництві біопластиків стосуються змішаних пластиків, здатних до розкладання з метою отримання матеріалів, що за своїми експлуатаційними характеристиками відповідають традиційним або ж перевищують їх та мають невисоку вартість. У цьому сенсі пер-

Таблиця 1

Переваги та недоліки біопластикового пакування

<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Менший вуглецевий слід у порівнянні з традиційними пластиками	Нижчі експлуатаційні властивості, менший термін використання у порівнянні з пластиками на основі сировини викопного походження
Економія мінеральних ресурсів, залучення відходів у циркулярну економіку	Вища вартість у порівнянні з традиційними пластмасами
Зменшення відходів, розміщених на полігонах	Проблеми збирання, сортування відходів, не розвиненість чи практична відсутність об'єктів інфраструктури компостування
	При масштабному виробництві біополімерів можливе виникнення сільськогосподарських та інших проблем щодо забезпечення первинної сировини
	Можливий негативний потенційний вплив PLA та інших біорозкладних пластиків і потенційних побічних продуктів деградації на едафічні організми [12]

спективним матеріалом для одноразового пакування є композиційна суміш на основі полілактиду (PLA), крохмалю та целюлози, яка проявляє синергетичний ефект компонентів та має високу біорозкладність, механічну міцність та придатність для виробництва плівкових матеріалів. Крохмаль підвищує швидкість біодеградації [10], целюлозні волокна – механічні властивості [8], а PLA забезпечує необхідну пластичність та водостійкість [9, 13]. Властивості цих композитів суттєво залежать від співвідношення компонентів, методів обробки та додаткових модифікаторів, що використовуються різними виробниками. Експериментальні дослідження показують, що загальний вуглецевий слід біополімерів на основі PLA, крохмалю та целюлози є значно нижчим за аналогічні показники поліетилену (PE) та поліетилентерефталату (PET) [14, 15].

Для покращення гнучкості та ударної міцності PLA додаються синтетичні біополімери, такі як полі(бутилен-адипат-ко-терефталат) (PBAT) та полікапролактон (PCL). Наприклад, суміші PLA/PBAT демонструють покращену біорозкладність і механічні властивості, що робить їх придатними для виробництва плівок та пакетів [7].

Поліпшення фізичних характеристик та показників біорозкладання в композитах з полімолочної кислоти може бути здійснено шляхом введення лісових відходів, які виконують роль наповнювачів [16]. За результатами досліджень гідрофобність композитів PLA/біомаса суттєво підвищилася, а також зросли міцність на розрив композиту і його біорозкладність.

Іншими дослідженнями доведено, що використання відпрацьованої кавової гущі у поєднанні з гуміновими речовинами значно збільшує характеристики міцності композитів на основі полілактиду [17].

У пакувальній індустрії широко використовуються плівки на основі крохмалю. Крохмальні плівки відрізняються високою біорозкладністю, доступністю сировини, низькою вартістю, але часто

потребують модифікації для покращення механічних властивостей [5]. Додаючи у суміш пластифікатори (гліцерин, гліколь, сорбіт) отримують термопластичний крохмаль, який є найбільш розповсюдженим біопластиком. Але такий біопластик має високу чутливість до вологи і погані механічні та термічні властивості. Тому виробники біопластиків часто змішують термопластичний крохмаль з іншими біорозкладними поліестерами, такими як PBAT, полівініловий спирт (PVOH), PLA і PCL, щоб покращити його незадовільне водопоглинання і слабкі механічні характеристики [3].

Крім зазначених матеріалів у пакувальній сфері використовуються целюлозні плівки та целюфан (регенерована целюлоза). Целюлозні плівки, зокрема, целюфан, мають високу прозорість, гнучкість і бар'єрні властивості щодо газів, що робить їх ідеальними для пакування харчових продуктів [18].

Біодеградація біорозкладних матеріалів. Найважливішою характеристикою біопластику є процес біодеградації, ефективність якої залежить від типу біополімеру, його структури та умов довкілля, таких як вологість, температура, pH та наявність мікроорганізмів. Біотичні процеси (мікроорганізми) та абіотичні процеси (фотодеградація, хімічний гідроліз) сприяють розкладанню матеріалів [19]. Слід зазначити, що деградація PLA відбувається лише в умовах промислового компостування, де температури є набагато вищими, ніж для ті, що зазвичай розкладаються в морському середовищі та прісноводних системах (біля 20 °C).

Біополімерні композити на основі сумішей PLA, крохмалю та целюлози поєднують функціональні властивості синтетичних пластиків із здатністю до повної біодеградації в природних умовах. Під дією ґрунтових мікроорганізмів такі матеріали розкладаються до діоксиду вуглецю, води, метану та інших низькомолекулярних сполук [5].

Дослідження біодеградації полілактиду та його сумішей з крохмалем становить інтерес з точки зору

їх широкого запровадження у сферу виробництва та споживання. Суміші крохмалю/PLA демонструють високу здатність до біорозкладання, з мінералізацією понад 60%, що підтверджує їхню екологічну безпеку [20]. Компостування сумішей крохмалю/PLA протягом 30 днів призводить до повного розкладання без залишкових слідів [18].

Целюлозні плівки показують високу здатність до біодеградації [21, 22]. Целюлозна плівка повністю розкладається в ґрунті за 4 тижні, на відміну від поліетилену, який не розкладається [22]. З урахуванням цього додавання целюлози у суміш PLA/крохмаль та утворення потрібної суміші підвищує ефективність біорозкладання. Крохмаль легко розкладається мікроорганізмами, що робить його корисним наповнювачем особливо в ґрунтових умовах; целюлоза також сприяє розкладанню завдяки ферментам, які виробляють мікроорганізми. Даний ефект спостерігається і в умовах компостування.

У загальному випадку деградація PLA проходить через гідроліз складних ефірних зв'язків під дією ферментів (ліпаза, естераза, протеаза) та мікроорганізмів. У ґрунті PLA гідролізується до CO_2 та води. Експериментальні дослідження виявили, що PLA може повністю розкладатися за 3 тижні в компості [23]. Додавання хітозану прискорює біодеградацію, що підтверджується утворенням тріщин на поверхні полімеру [24, 25]. Тести на екоотоксичність показують, що компост безпечний для рослин [26].

Перспективні напрямки у наукових дослідженнях біополімерів. Аналіз даних щодо виробництва біополімерів показує, що виробники віддають перевагу виготовленню біорозкладного пакування з використанням біопластику PLA та його композицій з крохмалем і целюлозою. Водночас проведені дослідження щодо застосування інших речовин показують доцільність стратегії розробки біопластиків, отриманих із біорозкладаних матеріалів та доповнених рослинною біомасою від сільськогосподарської діяльності. Використання сільськогосподарських відходів для виробництва молочної кислоти забезпечує стійку та економічно ефективну сировину, а також допомагає зменшити викиди парникових газів, зменшуючи відходи на звалищах та залежність від викопного палива [12]. Щоб задовольнити вимогам масового виробництва, відпрацьована фітотомаса повинна бути достатньою, легкодоступною та недорогою.

Натуральне волокно, одне з основних відходів, що викидаються з рослин після культивування, є перспективним джерелом армування композитів на основі PLA. Сільськогосподарські відходи таких рослин як кокос, банан, коноплі, бавовна, льон, олійна пальма, очерет, солома зернових та ін. використовувалися як біоволокна з різними полімерними матричними композитами. Ці натуральні волокна демонструють низьку щільність і кращі механічні властивості, що робить їх ефективними

для армування PLA та збільшення застосування полімерних композитів [8]. В інших дослідженнях пропонується використовувати дрібно подрібнену шкаралупу горіхів як недорогий наповнювач з антиоксидантною активністю для мульчі на основі PLA [12], а також лігноцелюлозні нановолокна, отримані з пшеничної соломи, для композиту PLA та PBAT [27].

Останні досягнення у одноразовому біопластичному пакуванні, що знаходять практичне використання, передбачають введення спеціальних добавок (антибактеріальних, протигрибкових та антиоксидантних агентів), які надають матеріалу додаткові переваги та унікальні властивості. Так, інтеграція антибактеріальних добавок у біопластик дає змогу створювати активне харчове пакування, яке продовжує термін зберігання продуктів харчування, пригнічуючи бактерії та мікроорганізми, що спричиняють псування [9].

Перспективним напрямком є створення біорозкладних пакувальних матеріалів з використанням нанотехнологій. Нанокompозити на основі полі молочної кислоти та наноцелюлози мають покращені бар'єрні властивості порівняно з традиційними біополімерами [4]. Як зазначається у дослідженнях [11], біопластик, підсилений наноматеріалами, є перспективним у різних сферах, включаючи пакування харчових продуктів та біомедичне застосування.

Інноваційні дослідження останнього часу показують, що введення наночастинок, таких як оксид цинку (ZnO), наночастинок срібла (AgNPs), діоксид титану (TiO_2), наночастинок міді (CuNPs), відновлений оксид графену (RGO) та наноглини в біопластик, дозволило отримати матеріали з покращеними показниками міцності на розрив, модулем Юнга, термічною стабільністю та зниженою проникністю для водяної пари. Інтеграція наноматеріалів у біопластик покращила фізико-механічні властивості та надала їм підвищену антимікробну ефективність, фотозахист від ультрафіолетового випромінювання та регульовану біорозкладність. У даних біополімерах наночастинок ZnO і TiO_2 значно збільшили механічну міцність і бар'єрні властивості, а RGO і CuNPs продемонстрували потужну антимікробну активність [11].

Крім експериментальних розробок, у останніх публікаціях приділяється увага питанням непоінформованості споживача щодо напрямку використання відходів одноразового біорозкладного пакування. Таке пакування не підлягає рециклінгу разом із загальним потоком відходів пластмас, а також не може бути компостованим з органічними відходами, про що слід повідомляти користувача.

Головні висновки. На сьогодні зменшити негативні впливи, що здійснюються пластмасами на довкілля, неможливо тільки за рахунок збільшення виробництва та використання біопластику.

По-перше, обсяги традиційного пластику, необхідного для різного роду потреб надзвичайно великі. За даними [28], наразі понад 99% пластикового пакування виготовляються з використанням полімерів на нафтовій основі. Практично здійснити їх заміну біопластиком у короткостроковий період не представляється ймовірним, зважаючи на стан забезпеченості технологіями, відповідною сировиною, а також проблемами щодо збирання використаної упаковки, сортування та організованого компостування. По-друге, експлуатаційні характеристики біопластику не завжди є задовільними, що обмежує його широке використання. По-третє, екологічні властивості даних матеріалів у багатьох випадках не кращі ніж у пластика на основі викопних копалин. Є і інші недоліки щодо виробництва та поширеного використання біопластику, включаючи проблеми деструкції. Зважаючи на це, необхідно проводити дослідження щодо створення нових і більш досконалих матеріалів такого виду та розробляти ефективні стратегії збільшення сфери використання екобезпечного біорозкладного пакування одноразового застосування.

Нижчий за бажаний рівень використання компостування біодеградабельних полімерів потребує розширення досліджень щодо процесів біорозкладу, у тому числі з акцентом на безпечність впливу продуктів деструкції на едафічні організми. Ключовим завданням є розробка нових способів компостування, а також забезпечення сучасних потреб у об'єктах промислового компостування.

Доцільним може стати розширення первинної сировинної бази складових біополімерів з сільськогосподарських відходів та відходів харчування, що не потребує використання відповідної сільськогосподарської продукції та знизить вартість біополімерного пакування.

Стратегічно перспективними є дослідження зі створення біорозкладних паковальних матеріалів з використанням нанотехнологій та наноматеріалів. Водночас, слід зазначити, що у літературних джерелах відсутня інформація стосовно досліджень впливу наночастинок на елементи довкілля та біоти.

Невирішеними питаннями, які потребують розв'язання, є незадовільна поінформованість споживачів щодо поведінки з одноразовим біорозкладним пакуванням. Також нагальною постає проблема удосконалення управління даними відходами, що передбачає їх збір, сортування, компостування.

Перспективи використання результатів дослідження. Систематизовані дані та аналіз наукових розробок, представлених у статті, можуть бути використані при розгляді тенденцій розвитку паковального сектора в Україні та поточного виробництва одноразових паковальних біополімерів, здатних до розкладання. Також отримані результати оцінки наукових досліджень можуть бути корисними при обґрунтуванні та виборі подальшої дослідницької роботи у сфері біорозкладного пакування та впровадження наукових інновацій для вирішення проблеми зменшення негативного впливу на довкілля пластмасового пакування.

Література

1. UNEP. Solutions to Cut Global Plastic Pollution. *UNEP*, 2023. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-roadmap-outlines-solutions-cut-global-plastic-pollution> (дата звернення: 18.03.2025).
2. Rosenboom J.-G., Langer R., Traverso G. Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 2022, vol. 7, no. 2, p. 117–137. URL: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
3. Ghasemlou M., Daver F., Ivanova E. P., Adhikari B. Bio-inspired sustainable and antimicrobial bioplastics for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, vol. 34, art. 101279. DOI: 10.1016/j.fpsl.2024.101279.
4. Гавриленко О. В., Плішивий В. В. Біодеградація полімерних матеріалів: проблеми та перспективи. *Науковий вісник УжНУ. Серія: Біологія*, 2023, вип. 47, с. 125–136. DOI: 10.32782/2413-9971/2023-47-28.
5. Rudnik E. Biodegradable Polymers: Features and Fundamentals. *Encyclopedia*, 2023. DOI: 10.3390/encyclopedia3040117.
6. Abang Z., Shakeri A., Heidarian P., Saeb M. R. Biodegradable polymers for sustainable packaging applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2023, vol. 8(4), pp. 92–109. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.06.005.
7. European Bioplastics. Materials. URL: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/> (дата звернення: 18.03.2025).
8. Ramakrishnan K., Khandelwal M., Sharma R. K., Joshi G. Advances in bio-based plastics: Recent progress and future prospects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, vol. 251. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141353.
9. Auras R., Harte B., Selke S. An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *John Wiley & Sons*, 2011, 688 p. DOI: 10.1002/9780470649848.
10. Ishigaki T., Sugano W., Nakanishi A., Tateda M., Ike M., Fujita M. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere*, 2004, vol. 54(3), pp. 225–233. DOI: 10.1016/S0045-6535(03)00750-1.
11. Chandra R., Rustgi R. Biodegradable Polymers. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2025, vol. 55, art. 100140. DOI: 10.1016/j.clcb.2025.100140.
12. Chandra Sekhar Paul M., Gupta K. Biodegradable polymers and their applications in soil conservation. *Plant Soil Environ.*, 2024, vol. 70(3), pp. 115–126. DOI: 10.17221/416/2024-PSE.
13. Jiménez A., Fabra M.J., Talens P., Chiralt A. Edible and biodegradable starch films: Effect of glycerol and natural additives on their properties. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, vol. 5, pp. 2058–2071. DOI: 10.1007/s11947-012-0835-4.
14. Yates M. R., Barlow C. Y. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers – A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, vol. 78, pp. 54–66. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.06.010.

15. Hottle T. A., Bilec M. M., Landis A. E. Biopolymer production and end-of-life comparisons using life cycle assessment. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98(9), pp. 1898–1907. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.016.
16. Choi J.-H., Ahn M. R., Yoon C.-H., Lim Y.-S., Kim J. R., Seong H., Jung C.-D., You S.-M., Kim J., Kim Y., Cha H. G., Lee J.-W., Kim H. Enhancing compatibility and biodegradability of polylactic acid/biomass composites through torrefaction of forest residue. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2025, vol. 10(1), pp. 51–61. DOI: 10.1016/j.jobab.2024.10.003.
17. Лебедєв В.В., Мірошніченко Д.В., Тихомирова Т.С. та ін. Дослідження гібридних екологічно безпечних біодеградабельних композитів на основі полілактиду, кавової гущі та гумінових речовин. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 2022, № 4. С. 46-54. DOI: <https://doi.org/http://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.4.05>
18. Mohanty A. K., Misra M., Drzal L. T. Sustainable biocomposites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, 2002, vol. 10, pp. 19–26. DOI: 10.1023/A:1021013921916.
19. Polman E. M. N., Gruter G.-J. M., Parsons J. R., Tietema A. Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 753, art. 141953. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141953.
20. Rudeekit Y., et al. Biodegradation of starch/PLA composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012, vol. 20(1), pp. 123–129. URL: <http://eprints.utar.edu.my/574/1/CL-2012-0805039-1.pdf>.
21. Zhang L., Liu H., Zheng L., Zhang J., Du Y. Biodegradability of regenerated cellulose films in soil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, vol. 35(12), pp. 4687–4692. DOI: 10.1021/ie950624r.
22. Ai F., et al. Comparative study of biodegradation of polyethylene and cellulose films. *Waste Management*, 2019, vol. 85, pp. 1–9. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)08582-1](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)08582-1).
23. Zaaba N. F., Jaafar M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polymer Engineering & Science*, 2020, vol. 60(9), pp. 2061–2075. DOI: 10.1002/pen.25511.
24. Qi X., et al. Study on the biodegradability of modified starch/polylactic acid (PLA) composite materials. *RSC Advances*, 2020, vol. 10(9), pp. 5026–5036. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra00274g>.
25. Kalita N. K., Nagar M. K., Mudenur C., Kalamdhad A. Biodegradation of modified Poly(lactic acid)-based biocomposite films under thermophilic composting conditions. *Polymer Testing*, 2019, vol. 79, art. 106032. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.09.023.
26. Rodrigues C. A., Tofanello A., Nantes I. L., Rosa D. Biological oxidative mechanisms for degradation of poly(lactic acid) blended with thermoplastic starch. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, vol. 3(11), pp. 2756–2766. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00639.
27. Bascón-Villegas I., Pereira M., Espinosa E., Sánchez-Gutiérrez M., Rodríguez A., Pérez-Rodríguez F. A new eco-friendly packaging system incorporating lignocellulose nanofibres from agri-food residues applied to fresh-cut lettuce. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 372, art. 133597. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133597.
28. Kumar S., Dubey N., Choi I., Jeon J., Kim M. Combating micro/nanoplastic pollution with bioplastic: Sustainable food packaging, challenges, and future. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 363(Part 1), art. 125077. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125077.