

УДК 664:67: 678.027.5

DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/183-21>**Гавриленко О.М.**докторант,
Сумський державний університет**Плішивий Є.М.**аспірант,
Сумський національний аграрний університет**Gavrylenko Oleksiy**

Sumy State University

Plyshiviy Yegor

Sumy National Agrarian University

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПЕРЕХОДУ ДО ВИКОРИСТАННЯ БІОРОЗКЛАДНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено результати дослідження щодо сучасних аспектів переходу до використання біорозкладних пакувальних матеріалів. У роботі було проаналізовано актуальні тенденції та перспективи розвитку ринку біорозкладної упаковки. За даними наукових джерел встановлено стрімке зростання обсягів виробництва таких матеріалів у світі, що пов'язано із посиленням екологічних норм та попиту споживачів. В результаті дослідження систематизовано основні види біорозкладних пакувальних матеріалів на основі рослинної сировини та біопластику. Побудовано прогностичні моделі динаміки їх світового виробництва до 2028 року. Встановлено тенденцію до зростання частки біополімерів третього покоління, отриманих із відновлюваних джерел. Порівняно характерні особливості та властивості упаковки з рослинних матеріалів та біопластику. Обґрунтовано переваги й недоліки цих видів біорозкладної упаковки. Розкрито механізм біодеструкції таких матеріалів у процесі компостування з утворенням екологічно нейтрального компосту. Зроблено висновок, що широке впровадження біорозкладної упаковки є вкрай актуальним та пріоритетним напрямком "зеленої" економіки згідно концепції сталого розвитку. Подальші наукові розробки у цій сфері матимуть велике практичне значення.

Ключові слова: біорозкладні пластики, біорозкладне пакування, упаковка, полімери, біополімери, пластикові відходи, крохмаль, целюлоза, полімолочна кислота, сталій розвиток, зелена економіка, циркулярна економіка, екологія, захист довкілля.

MODERN ASPECTS OF THE TRANSITION TO THE USE OF BIODEGRADABLE PACKAGING MATERIALS

The article presents the results of research on the modern aspects of transitioning to the use of biodegradable packaging materials. The aim of the research is to determine the status and forecast of production of major types of biodegradable materials based on plant raw materials and bioplastics, to investigate their advantages and disadvantages when used as biodegradable packaging materials for various industrial sectors. The study analyzes current trends and prospects for the development of the biodegradable packaging market. Based on scientific sources, a rapid increase in the production volumes of such materials worldwide has been identified, driven by strengthened environmental standards and consumer demand. The main types of biodegradable packaging materials based on plant raw materials and bioplastics are systematized because of the research. Predictive models of their global production dynamics until 2028 have been constructed. A trend towards an increase in the share of third-generation biopolymers derived from renewable sources has been established. The characteristic features and properties of packaging made from plant materials and bioplastics are compared. The advantages and disadvantages of these types of biodegradable packaging are substantiated. The mechanism of biodegradation of such materials during composting with the formation of environmentally neutral compost is disclosed. It is concluded that widespread adoption of biodegradable packaging is an extremely relevant and priority direction of the "green" economy in accordance with the concept of sustainable development. Further scientific developments in this field will have significant practical importance.

Keywords: biodegradable plastics, biodegradable packaging, packaging, polymers, biopolymers, plastic waste, starch, cellulose, polylactic acid, sustainable development, green economy, circular economy, ecology, environmental protection.

JEL Classification: Q50, Q57

Постановка проблеми. У сучасному житті полімери складають невід'ємну частину повсякденного життя завдяки до їх великим бажаним властивостям і легкості виробництва. Світовий обсяг виробництва пластмас, термопластів, терморективів, еластомерів, клеїв, покриттів і герметиків, а також поліпропіленових волокон постійно зростає.

Приблизно 95–99% пластику виробляється з невідновлюваних джерел (синтетичні пластики) нафтохімічною промисловістю. Синтетичні пластикові вироби

широко використовуються в галузі медичної техніки, упаковки, будівельних матеріалів, старіння упаковки і т. д. Однак синтетичний пластик не може піддаватися фізичній, хімічній і біологічній деградації і, нарешті, призводить до збільшення відходів. Відходи створюють численні серйозні проблеми, пов'язані з навколишнім середовищем і здоров'ям населення у всьому світі. Перш за все, пластикова упаковка надзвичайно повільно розкладається у навколишньому середовищі через стійкість полімерних ланцюгів до біодеструкції.

Так, більшість видів пластику можуть зберігатися сотні років перш ніж розпадуться на фрагменти, що забруднюють ґрунти та водойми. Крім того, спалювання чи розкладання пластикових відходів призводить до утворення токсинів та парникових газів, передусім метану, що має потенціал глобального потепління у 25 разів вищий ніж вуглекислий газ. За даними аналітичного огляду в Science, щорічно у світі утворюється від 0,5 до 2,75 мільйонів тон парникових газів через неналежну утилізацію пластикових відходів [7, с. 505].

Такі аналітичні дані вказують на необхідність радикального скорочення обсягів синтетичного пластику, передусім одноразової небезпечної упаковки, на користь біорозкладних і безпечних для екосистем видів пакувальних матеріалів. Біорозкладні полімери з'явилися в якості альтернативного підходу для багатьох промислових виробництв для контролю ризику, викликаного не біорозкладним пластиком.

Сучасні дослідження перспектив розвитку біорозкладних і безпечних для екосистем видів пакувальних матеріалів має велике практичне значення для світової спільноти в контексті концепції сталого розвитку, в т.ч. і для України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх наукових публікацій свідчить про стрімке зростання інноваційних наукових розробок та збільшення об'ємів виробництва біорозкладних пластиків на основі целюлози, крохмалю та інших компонентів рослинної біомаси. Провідними країнами в цій галузі є Китай, США, країни ЄС [1; 2]. Так, у власних роботах групи науковців Feng Wu, Manjusri Misra, Amar K. Mohanty [6] комплексно проаналізовано виклики та нові можливості щодо бар'єрних характеристик біорозкладних полімерів для стійкого пакування. Досліджено прогрес в науці про полімери. Автори зазначають, що на тлі сучасних інноваційних технологій, сегмент біорозкладних полімерів для стійкого пакування постійно зростає.

Інші групи міжнародних науковців, такі як Duncan T.V. [3], Salman Shaikh, Mudasir Yaqoob, Poonam Aggarwal [7], Motelica L., Fikai D., Fikai A., Oprea O.C., Kaaya D.A., Andronesu E. [8] та Dainelli D. [11] досліджують можливості застосування біорозкладних пакувальних матеріалів для харчової промисловості.

Водночас, вітчизняні науковці, такі як Доманцевич Н.І., Яцишин Б.П., Кріль М.М. [4; 5], Малишевська О.С. [9] та Михайлова Є.О., Дейнека Д.М., Панчева Г.М. [10] вивчають іноземний та вітчизняний досвід і перспективи вирішення проблеми поводження з полімерною упаковкою у світі та Україні.

Існує значний науковий потенціал щодо вивчення потенціалу та можливостей нарощування світового виробництва основних видів біорозкладних матеріалів на основі рослинної сировини та на основі біопластику, а тому подальші наукові дослідження в цій сфері є вкрай важливими.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення поточного стану та прогнозу виробництва основних видів біорозкладних матеріалів на основі рослинної сировини та на основі біопластику, дослідити їх переваги та недоліки при використанні у якості біорозкладних пакувальних матеріалів для різних галузей промисловості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Біорозкладні пакувальні матеріали виробляються у своїй переважній кількості з біорозкладного пластику, який розкладається через дію природних мікроорганізмів, таких як бактерії, грибки і водорості. Такий біопластик виробляється з поновлюваних джерел і має властивості, подібні (міцність на розрив, термічні властивості, подовження при розриві, швидкість пропускання водяної пари і швидкість пропускання кисню) зі звичайними пластиками, такими як PET (поліетилен-терефталат), PP (поліпропілен), PE (поліетилен) і т.д. Вода, діоксид вуглецю, неорганічні сполуки або біомаса є основними продуктами, що утворюються при розкладанні біорозкладних пластиків. Накопичення відходів, шкідливих для навколишнього середовища, не відбувається [11, с. 296].

Основне застосування біорозкладних пластиків – в харчовій упаковці та сільськогосподарському секторі. У харчовій промисловості упаковка виконує різні функції. Вона є невід'ємною частиною виробництва, зберігання, розподілу, консервації та інших типових операцій.

Існують два види упаковок, які виробляються на основі екологічно чистої сировини – це вироби на основі рослинної сировини, та вироби на основі біорозкладного пластику [9].

До основних видів упаковок на основі рослинної сировини відносимо наступні:

- упаковка з кукурудзяного крохмалю – пакети, плівки та інші види упаковки, виготовлені з кукурудзяного крохмалю, повністю розкладаються під дією мікроорганізмів;

- упаковка з целюлози – виготовляється з целюлозних волокон рослин, таких як бавовна, льон, коноплі, є повністю біорозкладною;

- пакети з бамбукової целюлози – міцна і екологічна бамбукова целюлоза є гарною альтернативою пластиковим пакетам, також повністю розкладається;

- упаковка з листя окремих видів дерев (пальми тощо) – інноваційний матеріал з висушених листків придатних порід дерев, має природний коричневий колір, повністю розкладається;

- пакети з полілактиду – біополімер на основі кукурудзяного крохмалю або цукру, компостований, розкладається на вуглекислий газ і воду [4, с. 6; 9].

Така екологічна упаковка є безпечною для навколишнього середовища та здоров'я людини.

Прогнозні показники світового виробництва основних видів біорозкладних матеріалів на основі рослинної сировини представлено на рис. 1.

Згідно з прогнозними даними, очікується зменшення частки світового виробництва упаковки на основі рослинної сировини в 2028 році порівняно з 2023 роком на 9,9%.

Зокрема, за прогнозами фахівців, випуск упаковки з поліетилентерефталату (PET) зменшиться на 1,8%, з поліетилену (PE) – на 5,5%, а упаковки з поліпропілену (PP) зросте на 5,4%. На думку світового експертного середовища, така динаміка пов'язана з активним розвитком біорозкладних видів пакувальних матеріалів. Водночас, частка біорозкладного поліетиленфураноату (PEF) серед упаковки на основі рослин зростає з 0 до 0,3%, що є позитивною тенденцією. Проте цей показник залишається замалим для вирішення проблеми пластикових відходів, на думку екологів [6].

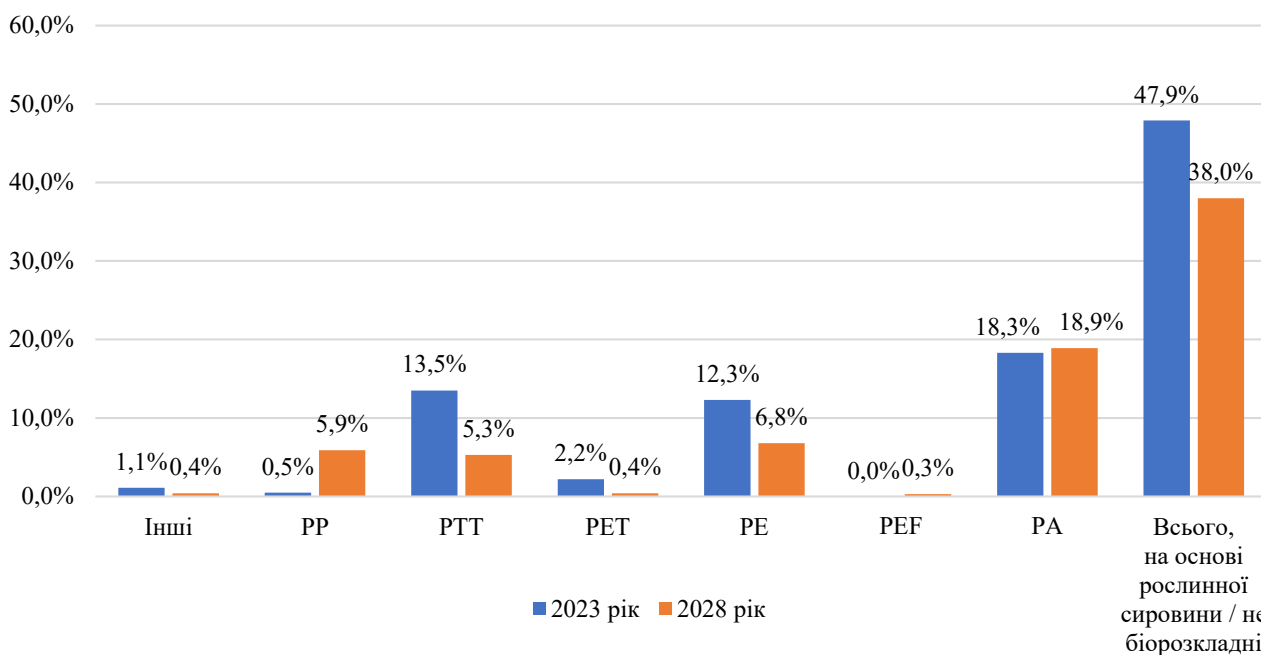


Рис. 1. Світові тенденції виробництва біорозкладних матеріалів на основі рослинної сировини у динаміці за 2023–2028 роки, %

Джерело: побудовано автором з використанням [1; 2]

В цілому, незважаючи на деяке скорочення частки пластикової упаковки, все ще потрібно більше зусиль для переходу на екологічні біорозкладні матеріали з відновлюваних джерел.

Слід зазначити, що біорозкладні види упаковки на основі рослинної сировини та біопластику часто поєднуються для створення оптимальних екологічних пакувальних рішень. Існує досить значна кількість шляхів їх комбінування, наприклад:

Багатошарова упаковка: використовують зовнішній шар з біопластику для надання міцності, а внутрішній – з целюлози чи інших волокон для контакту з продуктом.

Композитні матеріали: створюють композит на основі біопластику (наприклад, PLA чи PHA) з додаванням натуральних рослинних наповнювачів – деревного пилу, відходів бавовни тощо. Це покращує властивості та здешевлює матеріал.

Біорозкладна плівка з покриттям: на основу з целюлози чи листя наносять тонке покриття з біосумісного

полімеру (кукурудзяного крохмалю, PLA тощо) для поліпшення характеристик.

Ламінування: сполучають разом плівки з біоматеріалів, наприклад, пакувальний папір з прошарком PLA або крохмальної плівки [3; 5].

Отже, існує багато способів комбінування біорозкладних матеріалів з відновлюваних джерел для створення екологічної упаковки.

Слід також зазначити, що існує значна кількість біорозкладних матеріалів, які можна композитно використати при виготовленні упаковки, основний їх перелік представлено в табл. 1.

Іншим напрямком розвитку виробництва біорозкладних пакувальних матеріалів є виробництво на основі біопластику. Прогнозні показники світового виробництва основних видів біопластику представлено на рис. 2.

Згідно з приведеними даними, прогнозується зростання світового виробництва біорозкладних пластиків у 2028 році порівняно з 2023 роком, в цілому на 10%. Це пов'язано в першу чергу із впровадженням жор-

Таблиця 1

Основні види біорозкладних композитних пакувальних матеріалів на основі рослинної сировини

Абревіатура	Назва	Характеристика, придатність до біорозкладання
PP	(Polypropylene) – поліпропілен	Термопластик, який використовується для виготовлення упаковки. Може бути частково біорозкладним, якщо додати спеціальні добавки.
PET	(Polyethylene terephthalate) – поліетилентерефталат	Термопластик для виготовлення пляшок та іншої упаковки. Частково біорозкладний.
PE	(Polyethylene) – поліетилен	Найпоширеніший пластик для упаковки. Біорозкладні сорти PE роблять з відновлюваної рослинної сировини.
PEF	(Polyethylene furanoate) – поліетиленфураноат	Біополімер, альтернатива PET. Виготовляється з відновлюваних джерел, повністю біорозкладний.
PA	(Polyamide) – поліамід	Використовується для виготовлення міцної гнучкої упаковки. Частково біорозкладний.

Джерело: побудовано автором з використанням [3; 7]

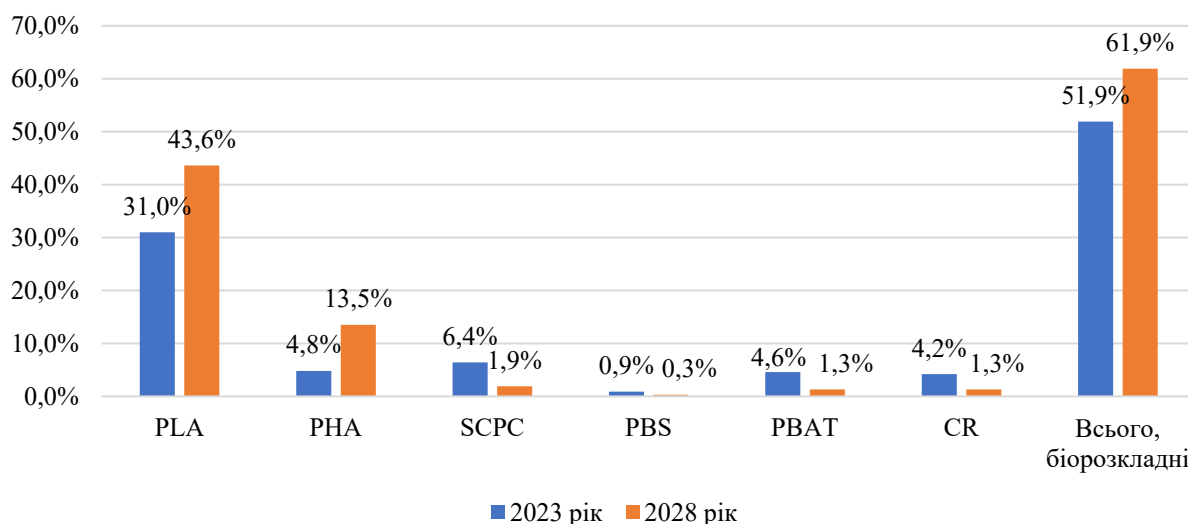


Рис. 2. Світові тенденції виробництва основних видів біопластику у динаміці за 2023–2028 роки, %

Джерело: побудовано автором з використанням [1; 2]

стких екологічних нормативів стосовно упаковки, відходів та викидів в розвинених країнах.

Зокрема, частка полімолочної кислоти (PLA), яка широко використовується для плівок та кухонного посуду, може зрости з 31% до 43,6%. Водночас, виробництво біопластику на основі одноклітинних білків (SCPC) скоротиться у три рази через дорожнечу вихідної сировини та складності технологічного процесу.

Тобто, вже найближчим часом очікується зростання обсягів виробництва біопластику, в основному з відновлюваних ресурсів, і, натомість, скорочення випуску полімерів з невідновлюваних джерел, що повністю відповідає світовим тенденціям сталого розвитку.

Зазначимо про значну кількість існуючих видів біопластику, які можна використати при виготовленні біорозкладної упаковки, перелік їх основних видів представлено в табл. 2.

При виробництві біорозкладного пластику використовуються біополімери третього покоління, які можна розділити на три основні категорії залежно від їх походження і способу виробництва [7, с. 507; 11, с. 318–320]:

1. Полімери, витягнуті/виділені безпосередньо з біомаси.

Ця категорія біополімерів є найбільш використовуваною сучасними виробниками. Полімери цієї категорії отримують з рослин, морських і домашніх тварин.

Прикладами є полісахариди, такі як целюлоза, хітин і крохмаль, сироватковий білок, казеїн, колаген, соєвий білок і т.д., які можна використовувати окремо або в суміші з синтетичними полієфірами, такими як полімолочна кислота (PLA). Найбільш поширеним видом таких композитних полімерів, яка використовується в упаковці харчових продуктів, є папір на основі целюлози. З'являється також регенерована целюлозна плівка (целофановий папір) і ацетат целюлози. Геміцелюлоза, другий за поширеністю рослинний полімер в світі, знаходиться в зародковому стані в якості біоматеріалу для дослідження упаковки харчових продуктів.

2. Полімери, отримані звичайним способом. Хімічний синтез полімерів.

Шляхом хімічного синтезу можна отримати біополієфіри великого діапазону застосування. Теоретично, всі пакувальні матеріали можуть бути замінені новими типами, отриманими з відновлюваних мономерів, але необхідно вирішити головне питання – їх економічну життєздатність.

Найбільш відомим біополімером з цих груп є полімолочна кислота (PLA-полілактид). Сировину для отримання молочної кислоти отримують ферментацією глюкози або крохмалю з іншого джерела. Як джерело вуглеводів можна використовувати кукурудзу, пшеницю, сироватку чи патоку.

Таблиця 2

Основні види біорозкладного пластику

Абревіатура	Назва	Характеристика, придатність до біорозкладання
PLA	(Polylactic acid) – полімолочна кислота	Біопластик з кукурудзяного крохмалю або цукровмісної сировини. Повністю біорозкладний
PHA	(Polyhydroxyalkanoates) – полігидроксиалканоати	Клас біопластиків, що продукуються мікроорганізмами. Біосумісний та біорозкладний
PBAT	(Polybutylene adipate terephthalate) – полібутиленадипінаттерефталат.	Біорозкладний біополімер для виготовлення плівок
PBS	(Polybutylene succinate) – полібутиленсукцинат	Біорозкладний термопластик з відновлюваної сировини
SCPC	(Single-cell protein-based bioplastics)	Біопластик на основі одноклітинного білка. Виготовляється з мікроводоростей
CR	(Celluloseregnerat)	Целюлозний регенерат для еко-пакувальних плівок. Отримують з целюлози рослин. Біорозкладний.

Джерело: побудовано автором з використанням [3; 7]

PLA в основному використовується для виробництва контейнерів для упаковки і подачі харчових продуктів, плівок, прозорих матеріалів, пляшок та іншої упаковки, також може поєднуватися з іншими матеріалами для власного поліпшення. PLA проникний для водяної пари, що важливо при упаковці свіжих харчових продуктів.

3. Полімери, одержувані безпосередньо з природних чи генетично модифікованих організмів.

Багато бактерій накопичують полімери як джерело енергії і як запас вуглецю. До цієї групи відносяться полігідроксиалканати (РНА) і бактеріальна целюлоза. РНА – складні полієфіри, що входять в структуру живого організму, гідрофобні і нерозчинні у воді. Залежно від бактерій і джерела вуглецю полігідроксиалканат може бути отриманий у вигляді жорсткого чи крихкого стану до пластичного і гумоподібного полімеру. Має властивості, такі як пропілен і поліетилен, еластичність і термопластичність, а також зберігає свої властивості при охолодженні. Може використовуватися для упаковки харчових продуктів, косметики та фармацевтичної продукції, а також у сільському господарстві. Аеробні умови повністю розкладаються на воду і вуглекислий газ. Біодеградація в сприятливих умовах займає 5–6 тижнів.

В цілому, при здійсненні виробництва упаковки, основна відмінність полягає в тому, з чого вона виготовлена. Так, біорозкладна упаковка з рослинної сировини:

– виготовляється безпосередньо з рослин (целюлоза, листя, бамбук тощо);

– повністю складається з природних матеріалів;

– розкладається під дією мікроорганізмів.

Упаковка на основі біопластику:

– виготовляється з біополімерів, більшість з яких отримують з рослин;

– містить хімічно синтезовані полімери (PLA, РНА та інші);

– розкладається в результаті хімічних реакцій.

Отже, біорозкладна упаковка з рослин є цілком природною, а біопластика містить синтетичні полімери, хоча виготовлені з відновлюваної сировини. Обидва види є екологічними та такими, що розкладаються.

Порівняння переваг і недоліків біорозкладної упаковки з рослин та біопластиків представлено в табл. 3.

Найголовнішою властивістю біорозкладних пакувальних матеріалів є їх біодеградація, тобто біохімічний процес їх перетворення на воду, біомасу, вуглекислий газ або метан при взаємодії з визначеними типами мікроорганізмів. Процес біодеградації відбу-

вається під час компостування біорозкладних відходів. Це біологічний процес, при якому, за умови контрольованих температур і активності певних мікроорганізмів, відбувається деградація полімерів та утворення органічних відходів, що призводить до утворення води, діоксиду вуглецю і компосту. Наприклад, PLA (полімолочна кислота) розкладається до CO₂, води і біомаси в контрольованих умовах компостування менш ніж за 90 днів. Деградація РНА зазвичай триває до 24 тижнів, але може бути досить швидкою в контрольованому середовищі (45 днів). Отриманий органічний компост є повністю екологічно нейтральним і в агрономічному відношенні повинен мати ті ж характеристики, що й інший компост. Процес компостування є ключовим сегментом роботи з біорозкладними матеріалами і їх впливом на навколишнє середовище [6].

Отже, перехід на біорозкладну упаковку є абсолютно необхідним і надзвичайно перспективним рішенням для досягнення цілей сталого розвитку та збереження довкілля. Її широке застосування – питання найближчого майбутнього.

Висновки з проведеного дослідження. За результатами аналізу наукових публікацій, статистичних даних та прогнозів, заміна пластикової упаковки на біорозкладну є необхідним та вкрай перспективним напрямком розвитку пакувальної індустрії та забезпечення екологічної безпеки.

Пакувальні матеріали на основі рослинної сировини та біополімерів є повністю біосумісними, безпечними для навколишнього середовища, а також технологічно та економічно конкурентоспроможними. Заміна традиційної пластикової упаковки на біорозкладну упаковку з рослинних матеріалів та біопластиків є вкрай перспективним і необхідним напрямком, який дозволить значно зменшити забруднення довкілля пластиковими відходами, та вирішити проблему вичерпності викопних вуглеводневих джерел для виробництва полімерів. Біопластики та натуральна упаковка є повністю автономним циклом. А тому перехід промисловості на такі екологічні матеріали є стратегічно важливим напрямком розвитку в контексті концепції сталого розвитку та збереження довкілля.

Отже, комплексний аналіз свідчить про необхідність якнайшвидшого глобального впровадження інноваційних біорозкладних видів пакувальних матеріалів як на основі рослинної сировини, так і біополімерів. А тому необхідне комплексна підтримка та впровадження біотехнологій, новітніх розробок у сфері біополімерів, а також розширення сировинної бази рослинних ресурсів для упаковки.

Таблиця 3

Порівняння основних видів біорозкладних пакувальних матеріалів

Переваги упаковки з рослинної сировини	Недоліки:
- Повністю природний матеріал - Відновлювана сировина - Безпечна для довкілля і здоров'я - Простіше утилізується (компостування)	- Менш міцна за біопластик - Може вбирати вологу та гази - Обмежений спектр властивостей
Переваги біопластикової упаковки:	Недоліки:
- Високі механічні характеристики - Термостійкість та інші властивості - Прозорість та інші естетичні якості - Масштабованість виробництва	- Містить синтетичні домішки - Потребує спецутилізації - Дорожче ніж природні матеріали

Джерело: побудовано автором з використанням [5; 6]

Список використаних джерел:

1. Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022–2032). URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradable-packaging-market>
2. Bioplastics market development update 2023. European Bioplastics Association. 2023. URL: <https://www.european-bioplastics.org/market/>
3. Duncan T.V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. No. 363 (1). Pp. 1–24.
4. Доманцевич Н.І., Яцишин Б.П., Кріль М.М. Полімерні пакувальні плівки спеціального призначення. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 20. С. 5–11.
5. Доманцевич Н.І., Яцишин Б.П., Василюшин Л. Вплив факторів старіння на властивості поліетиленових плівок пакувального призначення. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*. 2020. № 24. С. 5–13.
6. Feng Wu, Manjusri Misra, Amar K. Mohanty. Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*. 2021. Vol. 117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>
7. Salman Shaikh, Mudasir Yaqoob, Poonam Aggarwal. An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*. 2021. Vol. 4. P. 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>
8. Motelica L., Fikai D., Fikai A., Oprea O.C., Kaya D.A., Andronesu E. Biodegradable Antimicrobial Food Packaging: Trends and Perspectives. *Foods*. 2020. No. 9(10). P. 14–38. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9101438>
9. Малишевська О.С. Досвід і перспективи вирішення проблеми поводження з полімерною упаковкою у світі та Україні. *Біологія, біотехнологія, екологія*. 2018. № 5(75). URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/viewFile/dopovidi2018.05.002/10123>
10. Михайлова Є.О., Дейнека Д.М., Панчева Г.М. Аналіз методів перероблення пластикових відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2021. № 1 (7). С. 80–89.
11. Dainelli D. Recycling of food packaging materials: an overview. In: Chiellini E (ed) *Environmentally Compatible Food Packaging*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. P. 294–325.
12. Bliumska-Danko, K., Charreire-Petit, S., Qu, D., & Shevchenko, T. (2022). Mapping organic packaging research: Environmental concern and health safety. *Environmental Economics*, 13(1), 155–170.
13. Shevchenko, T., Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Danko, Y., & Bliumska-Danko, K. (2022). Promising developments in bio-based products as alternatives to conventional plastics to enable circular economy in Ukraine. *Recycling*, 7(2), 20.

References:

1. Future Market Insights. (2022). Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022-2032). Available at: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradable-packaging-market>
2. European Bioplastics Association. (2023). Bioplastics market development update 2023. Available at: <https://www.european-bioplastics.org/market/>
3. Duncan, T.V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 363(1), 1–24.
4. Domantsevych, N.I., Yatsyshyn, B.P., & Kril, M.M. (2018). Polymeric packaging films for special purposes. *Bulletin of Lviv Trade and Economic University, Technical Sciences*, 20, 5–11.
5. Domantsevych, N.I., Yatsyshyn, B.P., & Vasylyshyn, L. (2020). Influence of aging factors on the properties of polyethylene packaging films. *Bulletin of LNTU, Technical Sciences*, 24, 5–13.
6. Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A.K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>
7. Shaikh, S., Yaqoob, M., & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in the food industry. *Current Research in Food Science*, 4, 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>
8. Motelica, L., Fikai, D., Fikai, A., Oprea, O. C., Kaya, D. A., & Andronesu, E. (2020). Biodegradable antimicrobial food packaging: Trends and perspectives. *Foods*, 9(10), 14–38. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9101438>
9. Malyshevska, O.S. (2018). Experience and prospects for solving the problem of polymer packaging management in the world and Ukraine. *Biology, Biotechnology, Ecology*, 5(75). Available at: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/viewFile/dopovidi2018.05.002/10123>
10. Mykhailova, Y. O., Deineka, D. M., & Pancheva, H. M. (2021). Analysis of methods for processing plastic waste. *Bulletin of the National Technical University "KhPI", Series: New solutions in modern technologies*, 1(7), 80–89.
11. Dainelli, D. (2008). Recycling of food packaging materials: An overview. In E. Chiellini (Ed.), *Environmentally Compatible Food Packaging* (pp. 294-325). Boca Raton, FL: CRC Press.
12. Bliumska-Danko, K., Charreire-Petit, S., Qu, D., & Shevchenko, T. (2022). Mapping organic packaging research: Environmental concern and health safety. *Environmental Economics*, 13(1), 155–170.
13. Shevchenko, T., Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Danko, Y., & Bliumska-Danko, K. (2022). Promising developments in bio-based products as alternatives to conventional plastics to enable circular economy in Ukraine. *Recycling*, 7(2), 20.