



УДК 655.226.59, 655.3.062.2
DOI: 10.20535/2077-7264.4(90).2025.343587

© **Ж. В. Дейнеко***, канд. техн. наук, доц., **М. А. Ліценко**,
здобувач, магістр, Харківський національний університет
радіоелектроніки, Харків, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ЕКОМАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ХАРЧОВОГО ПАКОВАННЯ:
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ**

У статті здійснено системний аналіз фізико-механічних, термічних та бар'єрних властивостей сучасних біополімерів і екоматеріалів порівняно з традиційними полімерними матеріалами, що широко застосовуються у пакуванні харчових продуктів.

Експериментальним шляхом досліджено показники термічної стабільності, отримані на основі диференційної скануючої калориметрії (DSC) та термо-гравіметричного аналізу (TGA), а також визначено міцність на розрив, відносне подовження, показники проникності водяної пари (WVTR) та кисню (OTR).

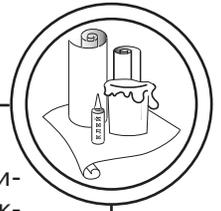
Ключові слова: екоматеріали; пакування; біополімери; біорозкладне пакування; полімери на основі полілактиду; крохмальні плівки; бар'єрні покриття; полімери.

Постановка проблеми

Сфера пакування в останні десятиліття переживає суттєві трансформації, зумовлені, як екологічними викликами, так і технологічним прогресом у галузі матеріалознавства. Традиційні полімерні матеріали, які тривалий час залишалися основою індустрії, демонструють високі бар'єрні та механічні властивості, однак створюють серйозне навантаження на довкілля через обмежені можливості утилізації. Це спричинило пошук та активне впровадження альтернативних рішень — біополімерів та інших сучасних екоматеріалів.

Разом із новими можливостями впровадження матеріалів супроводжується низкою технічних і технологічних викликів. Зокрема, потребує детального вивчення рівень відповідності їх фізико-механічних і бар'єрних характеристик вимогам, що висуваються до пакування харчових продуктів. Особливу увагу привертає дослідження впливу температурних і вологісних умов на стабільність та функціональність біополімерів, а також їх здатність забезпечувати належний захист продукції від псування та втрати споживчих властивостей.

© Автор(и) 2025. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



У цьому контексті актуальними є такі напрями дослідження:

— визначення фізико-механічних і бар'єрних властивостей сучасних біополімерів та альтернативних екоматеріалів;

— аналіз впливу цих характеристик на вибір конструкції та типу пакування (плівкові, ламіновані, комбіновані рішення тощо);

— встановлення оптимальних температурних і вологісних режимів експлуатації для різних типів продуктів і умов транспортування;

— систематизація практичних прикладів, що демонструють переваги та обмеження використання таких матеріалів у реальному виробництві.

Розв'язання даних питань має важливе значення для розробників пакування, виробників харчових продуктів та екологічно-орієнтованих підприємств, адже дозволяє знаходити баланс між функціональністю пакування та його безпечністю для довкілля.

Аналіз попередніх досліджень

Проблематика застосування біополімерів та екоматеріалів для пакування харчових продуктів є предметом активних наукових дискусій протягом останніх років [1–3]. Значна увага приділяється дослідженню фізико-механічних та бар'єрних властивостей біорозкладних полімерів, а також їхньої здатності замінювати традиційні нафтохімічні матеріали. У працях сучасних дослідників розглядаються різні групи матеріалів: крохмальні плівки, полімери на основі полілактиду (PLA) та полігідроксиалканоатів (PHA), біокомпозити на основі ПВАТ,

папір і крафт-картон з бар'єрними покриттями, а також волокнисті матеріали з відходів агропромисловості, зокрема багасових композитів [1, 2].

У дослідженнях відзначається, що крохмальні плівки та PLA мають високий рівень біорозкладності й низький вуглецевий слід, однак їхні бар'єрні властивості щодо вологи та газів істотно поступаються традиційним поліолефінам. Ці недоліки обмежують сферу використання, зокрема для жирної чи вологонестійкої продукції. Додавання пластифікаторів або створення багатошарових структур частково покращує показники, проте ускладнює процес вторинної переробки [3]. Аналогічні проблеми зафіксовані й у випадку біокомпозитів на основі ПВАТ, де досягнення необхідної механічної міцності можливе лише за умови поєднання з іншими полімерними домішками, що ставить під сумнів повну екологічність таких рішень [4].

Проблематика екологічного пакування досліджується у сучасних наукових і прикладних роботах, де основна увага приділяється його ролі у формуванні сталого іміджу бренду та підвищенні рівня екоосвідомості споживачів. У роботі [5] підкреслюється, що екопакування виступає не лише засобом захисту продукції, а й важливим комунікаційним інструментом, який відображає екологічні цінності компанії та сприяє формуванню довіри цільової аудиторії. Автори наголошують, що перехід на використання біорозкладних і перероблених матеріалів є не лише іміджевим, але й економічно виправданим рішенням, особливо для малого



бізнесу. Однак, застосування екологічних матеріалів у пакуванні допомагає оптимізувати логістичні витрати, розширити клієнтську базу завдяки залученню екосвідомих споживачів і водночас посилити соціальну відповідальність бренду.

Проте останніми роками саме полімерні матеріали набули найбільшого поширення завдяки своїй легкості, гнучкості, низькій вартості та здатності продовжувати термін зберігання продукції. Використання синтетичних матеріалів дозволяє зменшити втрати харчових продуктів і підвищити їх споживчі характеристики, однак водночас породжує низку санітарно-гігієнічних та екологічних ризиків [6].

Окрему увагу в спеціальній літературі приділено питанням збереження терміну придатності харчових продуктів (shelf-life) у нових типах промислового пакування [7, 8]. Експеримент на прикладі печива та кондитерських виробів виявив, що використання PLA чи крохмальних плівок може суттєво скоротити термін зберігання порівняно з поліетиленовими аналогами через вищу проникність до вологи та кисню [7]. Водночас експерименти з нанесенням бар'єрних покриттів на паперові основи продемонстрували кращу стабільність якості продуктів, хоча такі рішення поки що потребують оптимізації для масштабного виробництва [8].

Серед актуальних проблем активно обговорюється утилізація багатошарових ламінатів, які поєднують у собі шари з різних матеріалів для досягнення бажаних бар'єрних характе-

стик. Традиційні підходи практично унеможливають їхню повну переробку, адже розділення компонентів є технічно складним і енерговитратним. У цьому контексті перспективним напрямом є інноваційні технології, такі як STRAP (Solvent-Targeted Recovery and Precipitation), що дозволяють вибірково відновлювати компоненти ламінатів для повторного використання [9]. Проте ці методи поки що перебувають на стадії апробації й потребують додаткових досліджень економічної доцільності.

Таким чином, сучасні публікації демонструють, як значний потенціал біополімерів та екоматеріалів для заміщення традиційних полімерів, так і наявність серйозних обмежень. До переваг належать екологічність, біорозкладність і позитивний вплив на формування сталого іміджу брендів. Водночас, недоліками залишаються недостатня механічна міцність, низькі бар'єрні властивості, складність переробки багатошарових структур і обмеження у практичному застосуванні при транспортуванні чи зберіганні продуктів з високими вимогами до пакування. Дані аспекти визначають актуальність подальших досліджень і пошук збалансованих рішень, які б поєднували екологічність із функціональністю [8–10].

Мета роботи

Здійснити порівняльний аналіз бар'єрних і фізико-механічних характеристик сучасних біополімерів і екоматеріалів та оцінити їхні можливості застосування в пакуванні харчових продуктів.



Результати проведених досліджень

Дослідження спрямоване на порівняння ефективності різних груп біоматеріалів (крохмалеві плівки, PLA/PНА, PBAT-композити, паперові та багасові структури) у контексті їх здатності продовжувати термін придатності харчових продуктів і формувати екологічно дружній імідж бренду. Особлива увага приділена визначенню переваг і недоліків цих матеріалів, аналізу ключових чинників, що впливають на їхній вибір, а також розробленню практичних рекомендацій для малих і середніх виробників харчової продукції з метою оптимізації паковальних рішень.

Методологія дослідження передбачала комплексне зіставлення традиційних полімерних та альтернативних екоматеріалів, які широко використовуються у сучасній паковальній індустрії (рис. 1). Для аналізу відібрано зразки поліетилену (PE), полілактиду (PLA), суміші PLA/PBAT, крохмальних біокомпозитів, ламінованого паперу з бар'єрним покриттям, а також зразки з во-

локнистих відходів (bagasse, целюльні біоплівки). Такий набір матеріалів дозволив охопити повний спектр від традиційних до інноваційних рішень [1–4, 7–10]. Усі зразки надано поліграфічним підприємством м. Харкова, яке спеціалізується на виробництві екологічно безпечного та біорозкладного пакування.

Для порівняння властивостей застосовано комплексний підхід. По-перше, використано методи термічного аналізу, що містять диференціальну скануючу калориметрію (DSC) для визначення температури склування (Tg) та температури плавлення (Tm), а також термогравіметричний аналіз (TGA) для фіксації температури початку деструкції (Tonset). Ці дані — базові для оцінки термостійкості паковальних матеріалів, оскільки визначають їхню придатність для умов гарячого розливу (hot-fill) та контакту з гарячими харчовими продуктами [3, 4].

По-друге, проведено механічні випробування на розтягування для визначення міцності на розрив та відносного подовження.



Рис. 1. Полімерні та альтернативні матеріали, які обрані для експерименту



Цей тест дозволяє оцінити, наскільки матеріал здатний зберігати структурну цілісність при навантаженні, транспортуванні або запаюванні пакування [2, 7]. Наступним етапом було вимірювання бар'єрних характеристик. Для цього визначали швидкість проникнення водяної пари (WVTR) та кисню (OTR), оскільки саме ці параметри критично впливають на збереження продуктів із високим вмістом вологи або жирів. Застосовували стандартні методики вимірювання WVTR за ізотермічних умов та OTR при контрольованій різниці тиску газу [8, 10].

Для підтвердження практичної придатності проведено серію тестів на «shelf-life» з використанням модельних продуктів. Як такі обрано сухі вироби (печиво, хлібці) та продукти, чутливі до пари та температури. Дослідження включало моніторинг зміни активності води (a_w), маси зразків у часі, а також мікробіологічні показники (загальна кількість мікроорганізмів, TVC) протягом тер-

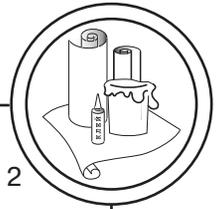
міну зберігання [1, 7]. Додатково здійснювалась органо-лептична оцінка стану продукту для перевірки відповідності споживчим вимогам. Для зручності подання результатів сформовано таблицю з основними характеристиками матеріалів (табл. 1), які містять дані T_g , T_m , Tonset, міцність на розрив, відносне подовження, WVTR та OTR. На основі цих даних проведено інтерпретацію придатності матеріалів для різних сценаріїв використання пакування.

У табл. 2 наведено узагальнені результати дослідження термічних властивостей на основі диференційної скануючої калориметрії (DSC) та термогравіметричного аналізу (TGA). Дані підтверджують, що біополімери, такі як PLA та PHA, мають нижчу температуру термічного розкладу порівняно з поліетиленом, проте демонструють кращу стабільність, ніж крохмальні плівки без модифікації.

Графічне представлення цих даних наведено на рис. 2, де чіт-

Таблиця 1
Параметри досліджуваних пакувальних матеріалів

Матеріал	T_g (°C)	T_m (°C)	Tonset (°C)	Міцність на розрив (MPa)	Відносне подовження (%)	WVTR (г/м ² . день)	OTR (cc/м ² . день)
PE	120	110	290	12–15	500–700	0,5–2	200–400
PLA	55–60	150–160	280	50–70	2–10	15–25	500–1500
PLA/PBAT	50–55	120–130	270	20–30	100–300	5–10	300–800
Крохмалева біоплівка	60–70	—	220	10–20	50–100	50–150	2000–4000
Папір + бар'єрне покриття	—	—	200	30–40	2–5	2–8	50–200
Bagasse-композит	—	—	210	15–25	20–40	30–70	500–1000



Таблиця 2

Термічні властивості паковальних матеріалів (DSC/TGA)

Матеріал	Tg (° C)	Tm (° C)	Tonset (° C)	Tmax (° C)
Крохмалева плівка	~60	—	220	280
PLA	~55–60	150–160	320	360
PNA	~5	170	280	310
PBAT	-32	110–120	350	390
Крафт-папір + бар'єр	—	—	250	280
PE (еталон)	125	110–120	420	470

ко видно, що біополімери займають проміжне положення між традиційними синтетичними пластиками та паперовими матеріалами з бар'єрними покриттями. Це вказує на можливість їхнього використання в умовах середніх термічних навантажень, наприклад, для пакування кондитерських виробів та сухих сніданків.

Додатково проведено випробування на розрив та визначено відносно подовження (табл. 3). Результати підтверджують, що PLA має високу міцність, але низьку пластичність, тоді як PBAT демонструє гнучкість, близьку до полі-

етилену. Крохмальні плівки залишаються крихкими без додавання пластифікаторів або композитних наповнювачів.

На рис. 3 відображено бар'єрні властивості досліджуваних матеріалів за показниками WVTR та OTR. Виявлено, що крохмальні плівки мають високу проникність для вологи, що обмежує їх використання для пакування продуктів із низькою водоактивністю. PLA та PNA демонструють середній рівень бар'єрності, який може бути значно покращений за рахунок створення нанокомпозитів або ламінатів з крафтом.

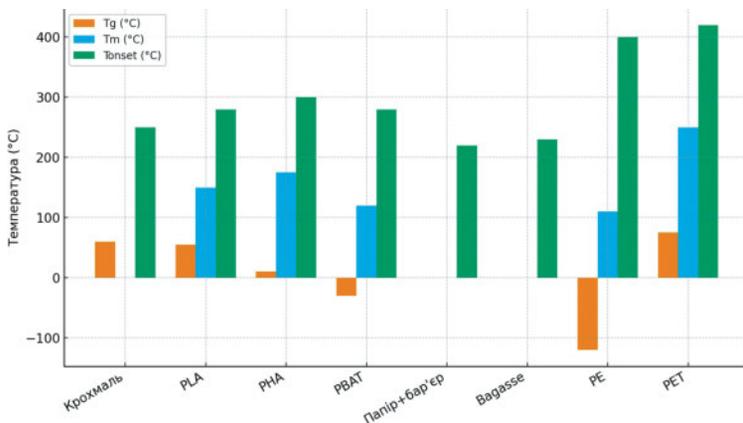
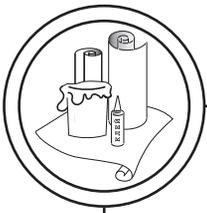


Рис. 2. Термостійкість матеріалів



Таблиця 3

Механічні властивості матеріалів (тест на розтяг)

Матеріал	Міцність на розрив (МПа)	Відносно подовження (%)
Крохмалева плівка	20–30	2–5
PLA	50–70	3–10
PHA	30–40	5–20
PBAT	20–25	400–600
Крафт-папір + бар'єр	25–35	1–3
PE (еталон)	10–20	300–500

Найкращі показники продемонстрували багат шарові структури, однак вони мають суттєві проблеми з переробкою.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що жоден із біополімерних матеріалів не може універсально замінити всі види традиційних пластиків. Кожна група має власні переваги та обмеження: PLA ідеально підходить для жорсткого пакування, PBAT — для гнучких плівок, а крохмальні композити — для короткострокового використання в сегменті сухих продуктів. При цьому проблема переробки багат шарових рішень залишається актуальною та потребує подальших досліджень.

У ході експерименту досліджено вплив різних типів пакування на динаміку збереження маси, активності води (a_w), а також органолептичних властивостей дослідних зразків продукту протягом 30 днів зберігання. Для аналізу обрано чотири типи пакувальних матеріалів: крафт-папір, PLA-біопластик, традиційний PET та комбінований картон із бар'єрним покриттям.

Результати показали (табл. 4), що найбільші втрати маси спостерігалися у зразках, упакованих у крафт, де вже на 15-й день середнє зниження становило понад 8 %, тоді як у PLA втрати не перевищували 3 %, а в PET — лише 1,5 %. Така різниця пояс-

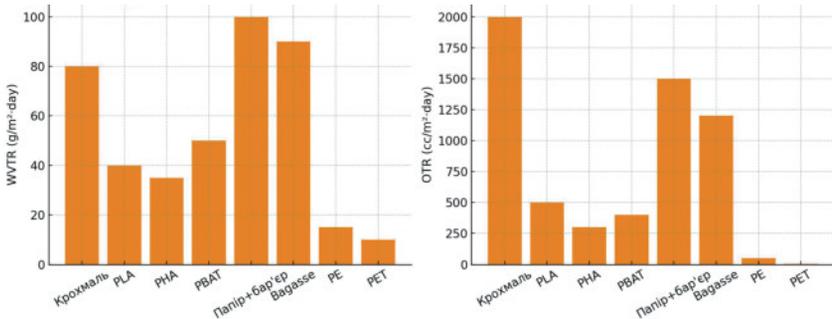
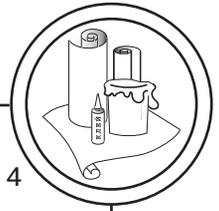


Рис. 3. Відмінності у бар'єрних характеристиках WVTR/OTR



нюється низьким бар'єрним потенціалом паперу щодо водяної пари (рис. 4), а також відсутністю полімерного захисту, здатного регулювати газо- та вологopроникність [7, 8].

Динаміка активності води (aw) свідчить, що у зразках з PLA значення залишалося в межах 0,45–0,55 протягом усього терміну (табл. 5), що забезпечило збереження хрусткої текстури та гальмування розвитку мікрофлори.

Натомість у крафті вже на 10-й день aw перевищувало 0,65, що сприяло швидкому росту плісняви, яка була візуально зафіксована на 12-й день експерименту. PET демонстрував найстабільніші показники (0,40–0,48), що підтверджує його високі бар'єрні властивості (рис. 5).

Органолептичний аналіз показав суттєві відмінності: зразки у крафті втратили типовий смак і аромат, набули стороннього запаху та втратили привабливий зовнішній вигляд. Упакування в PLA дозволило зберегти хруст-

Таблиця 4
Порівняння середніх втрат маси (%) у різних видах пакування протягом 30 днів

День	Крафт	PLA	PET	Картон + покриття
0	0	0	0	0
10	4,2	1,1	0,6	1,8
20	7,6	2,4	1,2	3,3
30	10,3	3,8	1,5	5,1

кість та приємний смак, хоча після 25 днів з'явилися незначні ознаки втрати аромату. Зразки в PET найкраще зберегли текстуру та запах, однак мали ризик затримки окисних процесів, що підтверджувалося слабким прогрітвом присмаком наприкінці зберігання. Отримані дані підтверджують вже відомі результати про різні механізми збереження свіжості: біопластики, зокрема PLA, здатні підтримувати оптимальне співвідношення вологоутримання та газообміну, тоді як паперові матеріали без бар'єрних покриттів

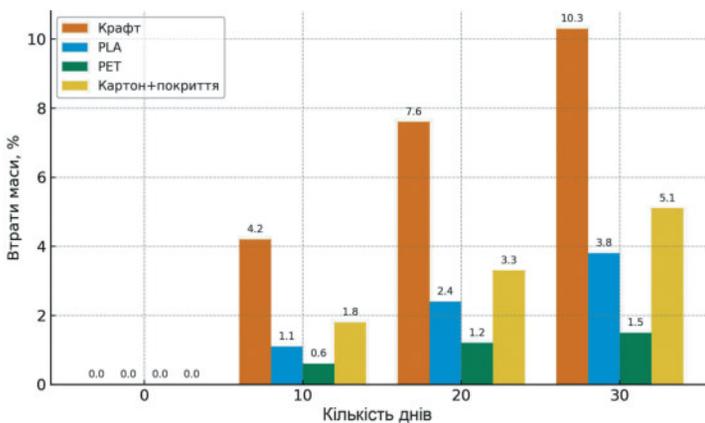
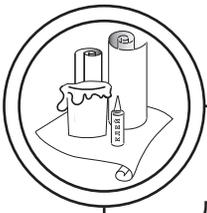


Рис. 4. Динаміка зміни маси (%) зразків у різних пакуваннях протягом 30 днів



Таблиця 5
Динаміка активності води (a_w)
у різних пакуваннях

День	Крафт	PLA	PET	Картон + покриття
0	0,42	0,44	0,40	0,43
10	0,66	0,49	0,43	0,52
20	0,71	0,52	0,46	0,57
30	0,74	0,55	0,48	0,61

є непридатними для тривалого зберігання продуктів з високою чутливістю до вологості.

Аналітична інтерпретація результатів показує, що співвіднесення лабораторних даних із реальними умовами використання дозволяє більш чітко зрозуміти придатність кожного матеріалу до певного типу харчових продуктів.

Полілактидна кислота (PLA) демонструє добрі механічні характеристики та бар'єрність до кисню, що робить її придатною для пакування сухих сніків, кондитерських виробів та охолоджених продуктів, але водночас вона

має обмеження у використанні при температурах понад 60°C , оскільки відбувається деформація та втрата міцності. Це обмежує можливості застосування PLA для гарячого розливу, хоча у випадку додавання модифікаторів або змішування з РВАТ властивості можуть бути частково покращені.

Крохмальні плівки, незважаючи на їхній екологічний потенціал та біорозкладність, мають високу гігроскопічність і схильність до поглинання вологи, що підтверджується як результатами експериментів, так і літературними джерелами. Це робить їх малопридатними для продуктів із підвищеною активністю води або для тривалого зберігання хрустких сніків, проте вони можуть бути ефективними у комбінації з бар'єрними покриттями на основі целюлози чи воску [1, 8].

Поліетилентерефталат (PET), що належить до традиційних полімерів, у нашому експерименті підтвердив найвищу стабільність маси та низьке зростання актив-

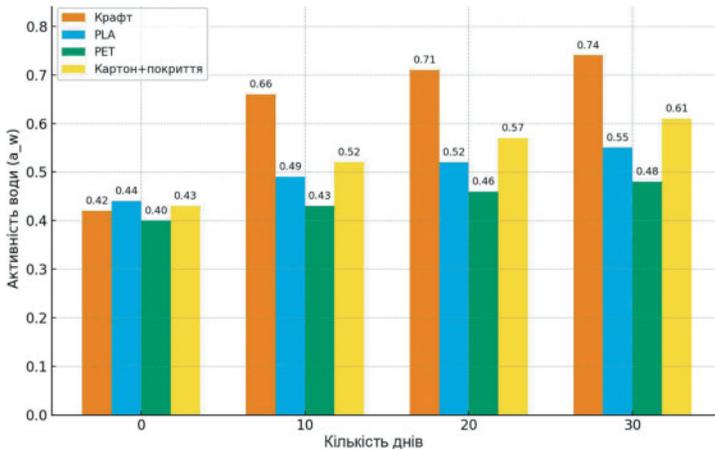
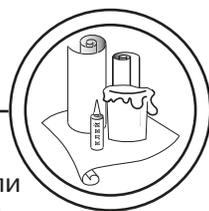


Рис. 5. Динаміка зміни активності води (a_w) продуктів у різних пакуваннях



ності води продуктів. Завдяки високим бар'єрним властивостям він придатний для пакування як сухих, так і вологих охолоджених продуктів, а також для напоїв і продуктів, які вимагають захисту від кисневого окислення. Водночас його екологічна проблема полягає у складності переробки та високому вуглецевому сліді, що підтверджується статистичними даними глобального накопичення пластику [10].

Паперові матеріали з бар'єрними покриттями показали проміжні результати. У чистому вигляді крафт-картон швидко поглинає вологу і втрачає захисні функції, однак додаткові бар'єрні шари (полімерні або воскові) значно покращують придатність до зберігання продуктів із помірною вологістю. Цей експеримент підтверджує, що майбутнє паперового пакування полягає саме у гібридних рішеннях, які поєднують екологічність і функціональність.

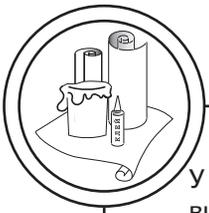
Аналіз результатів показує, що вибір матеріалу безпосередньо визначає не лише функціональні характеристики пакування, але й усю логіку його проектування, зберігання та утилізації. Традиційні полімери, зокрема поліетилен та поліпропілен, тривалий час залишалися домінуючими завдяки своїй універсальності, високій бар'єрності щодо вологи та газів, а також простоті переробки у технологічних процесах. Такі матеріали дозволяли створювати легке та відносно дешеве пакування для широкого спектра продуктів — від заморожених овочів до молочних виробів. Проте їхня низька екологічність

і проблеми з утилізацією стали ключовим чинником пошуку альтернатив.

Введення біополімерів, зокрема полілактиду (PLA) чи полігідроксиалканоатів (PHA), відкрило можливість виробництва біорозкладного пакування, яке ефективно розкладається в умовах компостування. Водночас такі матеріали накладають обмеження на температурні сценарії використання: PLA, наприклад, стійкий лише до $+50^{\circ}\text{C}$, що обмежує його застосування для гарячих продуктів, але дозволяє ефективно пакувати сухі сипучі вироби чи фастфуд. Це вимагає змін у конструкції пакування, зокрема, використання багатoshарових рішень, де біополімер поєднується з папером чи картоном для підвищення бар'єрних властивостей.

Папір і картон з біопокриттям поступово відновлюють позиції завдяки поєднанню екологічності та придатності до вторинної переробки. Водночас їхня сфера застосування обмежена вологістю та жирністю продуктів, що зумовлює активний розвиток нових покриттів на основі крохмалю чи біополімерів. Таке пакування найчастіше використовується для випічки, сухих продуктів та страв швидкого харчування, де температура переважно коливається від кімнатної до помірно високої ($30\text{--}40^{\circ}\text{C}$).

Важливим напрямом стали композитні матеріали, які поєднують властивості паперу та біополімерних покриттів. Таке рішення дозволяє забезпечити водо- і жиरोбар'єрність, проте створює нову проблему — складність утилізації багатoshарової структури.



У практичному застосуванні це видно на прикладі універсальних контейнерів для страв на виніс, що витримують як холодні, так і теплі сценарії, але вимагають спеціалізованої переробки. У табл. 6 систематизовано основні властивості досліджуваних матеріалів, що дозволяє порівняти їхні характеристики та визначити критичні обмеження.

У табл. 7 наведено узагальнені дані щодо сфер практичного застосування, які відображають відповідність матеріалів конкретним типам пакування, температурним сценаріям та групам продуктів. Зміна матеріалів суттєво вплинула на дизайн пакування. Якщо полімерні рішення дозволяли створювати тонкі та міцні

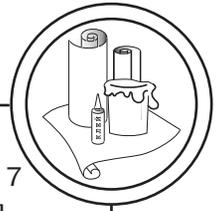
плівки з можливістю прозорості, то папір і біополімери обмежують дизайнерів у гнучкості, водночас стимулюючи пошук нових графічних і структурних рішень.

Зокрема, збільшення площі для друку на картоні дозволило перенести акценти з форми на візуальну ідентичність. Герметизація також зазнала змін: поліетиленові шви легко зварювалися термічно, тоді як композитні рішення потребують складніших технологій склеювання або біозварювання.

У сфері логістики нові матеріали вплинули на вагу і стійкість пакування. Якщо поліетиленові плівки забезпечували мінімальну масу та максимальну щільність, то картонні рішення потребують

Таблиця 6
Узагальнення властивостей досліджуваних матеріалів

Матеріал	Сфера використання	Ключові обмеження
Поліетилен (PE)	Пакування сипучих продуктів, заморожених овочів, фруктів, м'яса	Низька екологічність, тривалий період розкладання, обмеженість переробки
Поліпропілен (PP)	Тара для молочних продуктів, упаковка готових страв	Схильність до крихкості при низьких температурах, залежність від нафтопродуктів
Поліетилентерефталат (PET)	Напої, соуси, масла, тара для рідин	Проблеми з утилізацією, потреба у високо-температурній переробці
Біополімери (PLA, PHA)	Біорозкладні пакети, одноразовий посуд, пакування сухих продуктів	Обмежена термостійкість, чутливість до вологи, вища собівартість
Папір та картон з біопокриттям	Упаковка сухих продуктів, випічки, фастфуду	Обмежена бар'єрність (волога, жири), втрата міцності при зволоженні
Композитні матеріали (папір + крохмаль/біополімер)	Універсальні контейнери, замітники пластику для їжі	Складність утилізації (шари важко розділити), вища ціна виробництва



Таблиця 7

Карта відповідності матеріалів, пакування та сфер використання

Матеріал	Тип пакування	Температурні сценарії	Приклади продуктів
PLA (полілактид)	Стаканчики, лотки, плівки	до +50–60° С, непридатний для гарячих рідин	Сухі снеки, випічка, фастфуд, свіжі овочі
PNA	Плівки, плівкоутворюючі покриття	до +70° С, придатний для холодних та теплих продуктів	Молочні вироби, йогурти, фрукти
Крохмальні плівки	Обгортки, паке-тики, покриття	кімнатна температура, чутливі до вологи	Сухофрукти, сухі снеки, чай
Папір/картон з біопокриттям	Коробки, лотки стаканчики	до +40° С, обмежена вологостійкість	Випічка, фастфуд, снеки
Композит (папір + біополімерне покриття)	Контейнери для страв на виніс, багатшарові пакети	холодні та теплі сценарії, до +70° С	Готові страви, сальати, м'ясні продукти
Традиційний поліетилен/поліпропілен	Плівки, пакети, пляшки	від –20° С до +100° С	Заморожені овочі, соуси, напої, молочна продукція

більшого простору і дають додаткову вагу. Проте вони значно краще відповідають сучасним вимогам життєвого циклу пакування (LCA), адже придатні до переробки та повторного використання. У цілому, зсув від синтетичних полімерів до біополімерів та паперових композитів відображає широкую тенденцію трансформації пакувальної галузі від акценту на економічність і універсальність до балансу між функціональністю, екологічністю та бренд-іміджем.

Висновки

У роботі розглянуто, за яких умов екологічні матеріали можуть забезпечити належний рівень захисту продукції та стати ефективною альтернативою традиційним полімерам.

Проведене дослідження дозволило встановити, що сучасні екоматеріали мають значний потенціал у сфері пакувальних технологій, водночас зберігаючи низку обмежень, які визначають сфери їх практичного застосування. Дослідження результатів вказує на критичні обмеження біополімерів. PLA залишається матеріалом з високим потенціалом для ринку пакування, але вимагає ретельного вибору умов застосування. PLA-плівки показали високу ефективність у збереженні хрустких закусок та сухих продуктів, проте вони залишаються чутливими до температур вище 60° С і не можуть застосовуватися у hot-fill технологіях.

Крохмальні плівки, незважаючи на їхню екологічність і повну



біорозкладність, продемонстрували високу чутливість до вологи, що обмежує їх використання лише для сухих снєків та продуктів з низьким вмістом води. Паперові та крафтові матеріали з бар'єрними покриттями показали задовільні результати для пакування випічки та кави, але при тривалому зберіганні виявляли появу цвілі та втрату герметичності, що підтверджує необхідність комбінування їх із захисними шарами. PET-пакування продемонстрували найкращу бар'єрність проти вологи й кисню, ефективно затримуючи окислювальні процеси у жиромісних продуктах, проте вони залишаються складними для утилізації і потребують розвитку технологій повторної переробки. PET продовжує займати домінуючі позиції завдяки універсальності, хоча проблема пластику як глобального забруднювача обмежує його майбутнє.

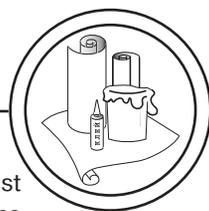
Практичні рекомендації для виробників полягають у доцільності комбінування біополімерних матеріалів із бар'єрними покриттями, що дозволить розширити

сферу їх використання та продовжити термін зберігання продуктів. Друкарням, які працюють із паковальними матеріалами, варто звернути увагу на особливості друку по біоплівках та паперових основах, де технологія нанесення фарб і покриттів потребує адаптації до зниженої термостійкості та чутливості до вологи.

Напрями подальших досліджень варто спрямувати на розробку композитних біоматеріалів із підвищеними бар'єрними характеристиками, а також на оцінку їх життєвого циклу (LCA), включно з енергетичними витратами на виробництво та утилізацію. Важливим завданням також є вивчення споживчого сприйняття екопакування та її впливу на бренд-імідж компаній, оскільки екологічний чинник дедалі більше визначає конкурентоспроможність продукції на ринку. Сукупність отриманих результатів підтверджує, що використання екоматеріалів у пакуванні є не лише екологічною необхідністю, але й стратегічним напрямом розвитку галузі.

References/Список використаної літератури

1. Arruda, T. R., Machado, G. O., et al. (2025). An Overview of Starch-Based Materials for Sustainable Food Packaging: Recent Advances, Limitations, and Perspectives. *MDPI. Macromol*, 5(19), 2–34. <https://doi.org/10.3390/macromol5020019> [in English].
2. Helanto, K., Matikainen, L., Talja, R., & Rojas, O.-J. (2019). Bio-based Polymers for Sustainable Packaging and biobarriers: A critical review. *Bio-based barriers, BioResources*, 14(2), 4902–4951. DOI: 10.15376/biores.14.2. Helanto [in English].
3. Jamshidian, M., et al. (2010). Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 552–571. DOI:10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x [in English].
4. Signori, F., Coltelli, M.-B., & Bronco, S. (2009). Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing. *Polymer Degradation and Stability*, 94(1), 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.10.004> [in English].



5. Deineko, Zh. V., & Litsenko, M. A. (May 14–17, Kyiv, 2025). Efektyvnist ekopakuvannia u formuvanni ekolohichnoho imidzhu brendu [The effectiveness of eco-packaging in shaping a brand's environmental image]. *Proc. Polihrafichni, multymediini ta web-tekhnologii*, 1, 47–48. Retrieved from <https://openarchive.nure.ua/handle/document/31293> [in Ukrainian].

6. Hortseva, L. V., Kostiuchenko, T. P., Stadnichuk, N. O., Mikhlyk, I. V. & Kronikovskiy, O. I. (2020). Osoblyvosti bezpechnoho vykorystannia i toksykolohichna otsinka suchasnoho kharchovoho pakuvannia ta vymohy do noho [Features of safe use and toxicological assessment of modern food packaging and requirements for it]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharkovoykh tekhnologii*, 26(2), 50–56. Retrieved from <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/32141> <https://openarchive.nure.ua/handle/document/31293> [in Ukrainian].

7. Siracusa, V., Rocculi, P., et al. (2008). Biodegradable Polymers for Food Packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634–643. DOI:10.1016/j.tifs.2008.07.003 [in English].

8. Adibi, A., Trinh, B. M., & Mekonnen, T. (August 2023) Recent progress in sustainable barrier paper coating for food packaging applications. *Progress in Organic Coatings*, 181, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107566> [in English].

9. Walker, T. W., et al. (2020). Recycling of multilayer plastic packaging materials by solvent-targeted recovery and precipitation. *Science Advances*, 6(47), 290–297. DOI: 10.1126/sciadv.aba7599 [in English].

10. Peelman, N., Meulenaer B., et al. (2013). Application of bioplastics for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 32(2), 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.003> [in English].

*Corresponding author: **Zhanna Deineko**, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, zhanna.deineko@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>.

Mariia Litsenko, Postgraduate student, Kharkiv National University of Radio Electronics.

Research of Modern Eco-Materials for Food Packaging: Comparative Analysis of Properties and Operational Limitations

The article presents a systematic analysis of the physical-mechanical, thermal, and barrier properties of modern biopolymers and eco-materials in comparison with traditional polymer materials widely used in food packaging. The potential of these materials for practical application has been identified, their technological advantages analyzed, and the limitations influencing the choice of packaging type and its field of application outlined. Particular attention is given to testing the hypothesis that environmentally friendly materials, despite having lower barrier performance compared to polyethylene, can ensure adequate



preservation of food quality when the packaging structure is properly selected (film-based, laminated, or combined solutions).

A comparative analysis was conducted of the main physico-mechanical and thermal characteristics of eco-materials relative to polyethylene. Experimental studies were carried out to assess thermal stability using differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). Additionally, tensile strength, elongation at break, and water vapor (WVTR) and oxygen (OTR) permeability rates were determined. The study outlines potential application areas for the analyzed materials and identifies limitations that may restrict their use under certain packaging conditions. It emphasizes that these findings contribute to a deeper understanding of the potential of biopolymers as an alternative to conventional polymeric materials, which is essential for the development of sustainable packaging technologies and the formation of ecological policies in packaging production.

The results of the study deepen the scientific understanding of the potential of biopolymers as an alternative to traditional polymer materials and are of great importance for the development of sustainable packaging technologies, the minimization of environmental impact, and the formation of modern policies of ecological responsibility in packaging production. The findings can be applied in the practice of packaging material manufacturers, specialists in the printing and packaging industries, packaging designers, and researchers engaged in the implementation of environmentally oriented solutions in the packaging sector.

Keywords: eco-materials; packaging; biopolymers; biodegradable packaging; polylactide-based polymers; starch-based films; barrier coatings; polymers; shelf-life.

Надійшла до редакції/Received: 13.11.25

Рецензія/Peer review: 17.11.25

Опубліковано/Printed: 30.12.25