


Хмельницький національний університет
Факультет технологій і дизайну
Кафедра хімії та хімічної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ
ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ ПЛІВКИ**

Рівень вищої освіти другий магістерський
Галузь знань 16 – «Хімічна інженерія та біоінженерія»
Спеціальність 161 – «Хімічні технології та інженерія»
Освітня програма – «Хімічна технологія та інженерія»

КвРХТІ. 024129.24.12.ПЗ

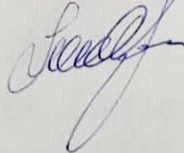
Виконала здобувачка 2 курсу група ХТІмз-24-1  Ольга НАВРОЦЬКА

Керівник д-р техн.наук, проф.



Ольга ПАРАСКА

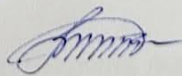
Нормоконтролер



Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри



Ольга ПАРАСКА

19.12.2025 р.

Хмельницький 2025

Хмельницький національний університет

Факультет Технологій і дизайну
Кафедра Хімії та хімічної інженерії
Освітній рівень Другий магістерський
Галузь знань 16 Хімічна інженерія та біоінженерія
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
Освітня програма Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д. т. н., проф. Ольга ПАРАСКА

25 серпня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Навроцької Ольги Юріївни

- 1 Тема роботи: Аналіз екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки
Керівник роботи Параска Ольга Анатоліївна, доктор технічних наук, професор
Затверджено наказом ректора університету від 25 серпня 2025 р. № 65
- 2 Термін подання здобувачем роботи на кафедру 1 грудня 2025 р.
- 3 Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики. Методичні вказівки до кваліфікаційної роботи. Стандарти ХНУ Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 207.01:2025.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Сучасні технології виробництва харчової плівки. Вплив технології виробництва харчової плівки на довкілля. Розробка рекомендацій для зниження екологічного навантаження від виробництва і утилізації полімерної харчової плівки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) 10
слайдів програми презентації Power Point

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1 Сучасний стан технологій виробництва харчової плівки	Параска О. А., завідувач кафедри хімії та хімічної інженерії	25.08.2025	25.08.2025
2 Об'єкт, методи та методики дослідження	Параска О. А., завідувач кафедри хімії та хімічної інженерії	25.08.2025	25.08.2025
3 Експериментальні дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки	Параска О. А., завідувач кафедри хімії та хімічної інженерії	25.08.2025	25.08.2025

7 Дата видачі завдання 25.08.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
Вступ	03.10.2025	Виконано
1 Сучасний стан технологій виробництва харчової плівки	03.10.2025	Виконано
2 Об'єкт, методи та методики дослідження	10.11.2025	Виконано
3 Експериментальні дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки	01.12.2025	Виконано
Висновки	01.12.2025	Виконано
Перелік джерел посилання	01.12.2025	Виконано

Здобувачка

Ольга НАВРОЦЬКА

Керівник кваліфікаційної роботи

Ольга ПАРАСКА

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: Аналіз екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки

Автор роботи: здобувачка вищої освіти групи ХТІмз-24-1 Ольга НАВРОЦЬКА

Керівник роботи: доктор технічних наук, професор Ольга ПАРАСКА

Обсяг кваліфікаційної роботи 69 сторінок, 10 таблиць, 5 рисунків, 33 джерел посилань, 10 слайдів графічної частини виконаних у програмі презентацій.

Ключові слова: ХАРЧОВА ПЛІВКА, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА, БІОРОЗКЛАДНА ХАРЧОВА ПЛІВКА, БІОПОЛІМЕРИ, АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРОДУКЦІЇ.

Мета кваліфікаційної роботи: аналіз впливу технології виробництва харчової плівки на довкілля.

Об'єкт дослідження: технології виробництва харчової плівки.

Предмет дослідження: біорозкладні полімерні харчові плівки.

Проаналізовано вплив хімічної природи біорозкладних полімерних матеріалів (термопластичного крохмалю) на їх утилізацію і компостування. Запропоновано безпечну рецептуру біополімерної плівки для харчових продуктів. Проведено порівняльний аналіз сучасних технологій виробництва харчової плівки з урахуванням зниження екологічного навантаження від виробництва та утилізації полімерної харчової плівки.

Запропоновано рекомендації врахування екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки на основі біополімерів для різних галузей промисловості.

Здобувачка 2 курсу ХТІмз-24-1

Ольга НАВРОЦЬКА

5.12.2025

ЗМІСТ

С

Скорочення та умовні позначення.....	3
Вступ.....	4
1 Сучасний стан технологій виробництва харчової плівки	6
1.1 Актуальні технології виробництва харчової плівки.....	10
1.3 Міжнародні стандарти та регулювання у сфері екологічності пакування, тенденції розвитку екологічно безпечних пакувальних матеріалів.....	24
2 Об'єкт, методи та методики дослідження	34
2.1 Обґрунтування вибору дослідних зразків харчової плівки.....	34
2.2 Методика Life Cycle Assessment виробництва харчової плівки з біополімерів.....	П
омилка! Закладку не визначено.	
3 Експериментальні дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки.....	39
3.1 Оцінка сучасних технологій виробництва харчових плівок та їх екологічних характеристик.....	36
3.2 Розрахунок показників впливу на довкілля (викиди CO ₂ , енергоспоживання, водоспоживання).....	48
3.3 Порівняльний аналіз традиційної та екологічної технології виробництва харчової плівки	52
3.4 Оптимізація використання біорозкладних та компостованих полімерів в технологіях виробництва харчової плівки	58
3.5 Пропозиції щодо зменшення екологічного навантаження від технологічного процесу виробництва харчової плівки	60
Висновки	64
Перелік джерел посилання	66

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- ASTM – Американське товариство випробувань і матеріалів
- ГДК – гранично допустимі концентрації шкідливих парів і газів
- ПЕ – поліетилен
- ПП – поліпропілен
- ПВХ – полівінілхлорид
- ПЕНГ – поліетилен низької густини
- ЛПЕНГ – лінійний поліетилен низької густини
- ПЕВГ – поліетилен високої густини
- ПЕТ – поліетилентерефталат
- ПЕН – поліетиленнафтален
- TPS – термопластичний крохмаль
- СЕМ – стандарти екологічного менеджменту
- БПМ – біорозкладні полімерні матеріали
- ФПМ – фоторозкладні полімерні матеріали
- ESG – оцінка відповідності підприємств критеріям (Environmental, Social, Governance)
- ЄС – Європейський Союз
- МОЗ – Міністерство охорони здоров'я
- ПЛА – полілактиди
- ПГА – полігідроксиалкоаноати
- LCA – аналіз життєвого циклу продукції

ВСТУП

У сучасних умовах глобалізації та зростання обсягів споживання пакувальних матеріалів проблема негативного впливу пакувальної індустрії на довкілля набуває особливої актуальності. Традиційні полімерні пакувальні матеріали, виготовлені на основі викопної сировини, характеризуються високою енергоємністю виробництва, значними викидами парникових газів та тривалим періодом розкладання в навколишньому середовищі. Накопичення таких відходів призводить до забруднення ґрунтів, водних об'єктів та формування мікропластику, що становить серйозну екологічну загрозу. Одним з найпоширеніших виробів з полімерних матеріалів є харчова плівка. Питанням екологічного впливу відходів технологій виробництва полімерних матеріалів на довкілля приділяють все більше уваги останнім часом. Провідні компанії світу докладають великих зусиль, для створення нових технологій виробництва полімерних матеріалів, які мають здатність до саморозкладання. Це дозволить в майбутньому знизити накопичення відходів. У зв'язку з цим одним із пріоритетних напрямів розвитку пакувальної галузі є впровадження екологічно безпечних, біорозкладних матеріалів, зокрема харчових плівок на основі відновлюваної сировини. Крохмаль як природний біополімер є перспективною сировиною для виробництва харчової плівки завдяки його доступності, біорозкладності, нетоксичності та можливості використання у харчовому пакуванні. Водночас технологія виробництва харчових плівок супроводжується споживанням значних обсягів води та енергії, утворенням стічних вод з підвищеним органічним навантаженням, а також викидами забруднювальних речовин, що потребує комплексного екологічного аналізу.

Оцінка екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки є необхідною передумовою для зниження негативного впливу на довкілля, підвищення ресурсоефективності та обґрунтування екологічної доцільності використання біорозкладних пакувальних матеріалів. Одним із найбільш інформативних інструментів такого аналізу є метод оцінки життєвого циклу

Life Cycle Assessment (LCA), який дозволяє кількісно оцінити вплив продукції на довкілля на всіх стадіях її життєвого циклу – від отримання сировини до кінця експлуатації.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилання. Мета кваліфікаційної роботи – аналіз впливу технології виробництва харчової плівки на довкілля. Об'єкт дослідження – технології виробництва харчової плівки. Предмет дослідження: біорозкладні полімерні харчові плівки. Завдання – оцінка екологічних факторів технології виробництва харчової плівки, розробка рекомендацій для зниження екологічного навантаження від технології виробництва харчової плівки.

Екологічні аспекти технології виробництва харчової плівки мають важливе значення, оскільки саме вони визначають рівень безпеки продукції для довкілля та здоров'я людини. Використання біорозкладних полімерів, енергоощадних технологій і систем повторного перероблення відходів зменшує накопичення токсичних речовин на полігонах утилізації відходів.

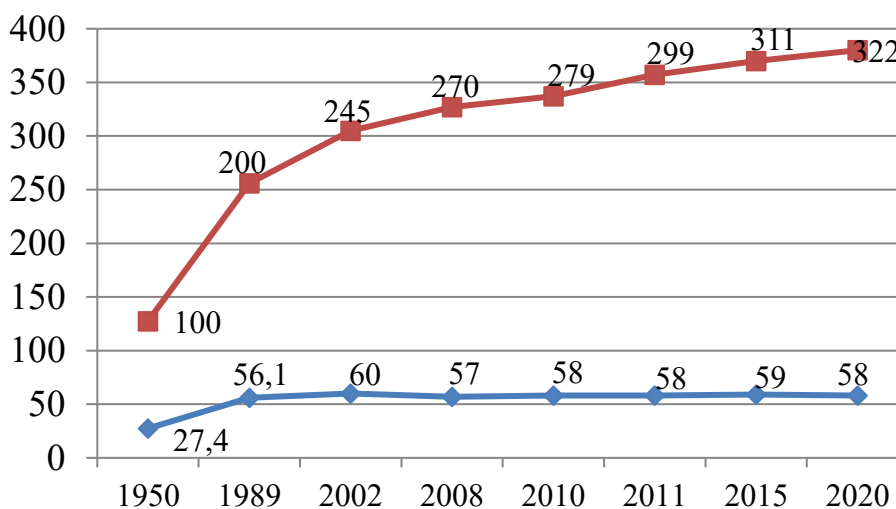
Роль екологічних аспектів виробництва харчової плівки є надзвичайно актуальною темою в умовах глобального зростання проблеми пластикових відходів та забруднення довкілля. Сучасні споживачі все частіше надають перевагу безпечним і біорозкладним пакувальним матеріалам, що стимулює розвиток нових технологій на основі природних полімерів. Впровадження екологічно орієнтованих рішень у виробництво харчових плівок не лише підвищує конкурентоспроможність підприємств, а й сприяє формуванню культури раціонального природокористування та відповідального ставлення до довкілля. Таким чином, дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки на основі біополімерів є актуальним з наукової та практичної точок зору, відповідає сучасним вимогам сталого розвитку, екологічної безпеки та циркулярної економіки.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ ПЛІВКИ

1.1 Актуальні технології виробництва харчової плівки

В результаті інноваційних досягнень і розробки нових унікальних технологій полімерні матеріали мають широке застосування в промисловості та в повсякденному житті людини. У різних сферах діяльності вироби з полімерних матеріалів мають важливе значення.

З 1960-х років почалося бурхливе зростання виробництва полімерних матеріалів. Причиною цього стало створення нових технологічних ліній, відкриття процесу ламінування, розробки технології рулонного друку. На початку 2000-х років в Європі відбулася стабілізація обсягів випуску і переробки полімерів, але в азіатських країнах, насамперед Китаю, випуск полімерних матеріалів істотно зростає. Аналіз виробництва полімерних матеріалів показано на рисунку 1.1.



Кількість у млн. т.: ■ – у світі; ◆ – в Європі

Рисунок 1.1 – Виробництво полімерних матеріалів з 1950 по 2020 р

Починаючи з 1960-х років глобальне виробництво полімерних матеріалів зросло у двадцять разів і склало на початок 2000-х років близько

359 млн т. Тільки в Європейському Союзі у 2018 р. оборот виробництва полімерів склав 360 млрд євро, при цьому в секторі їхнього виробництва працювало близько 1,6 млн осіб. Випуск полімерних матеріалів на початку 90-х років перебільшив лиття сталі, а на сьогодні полімерних матеріалів виробляють більше, ніж всіх металів разом узятих. За прогнозами очікують, що в найближчі 20 років обсяг виробництва полімерів знову збільшиться вдвічі [1-3].

Наразі обсяг виробництва виробів з полімерних сполук, включаючи виробництво штучних тканин і волокон, вже сягає 400 млн т на рік. Пакувальні матеріали зі значним відривом випереджають використання полімерів в інших галузях [2, 4, 5]. Розподіл застосування полімерних матеріалів у різних сферах країн Європейського Союзу наведений на рисунку 1.2.

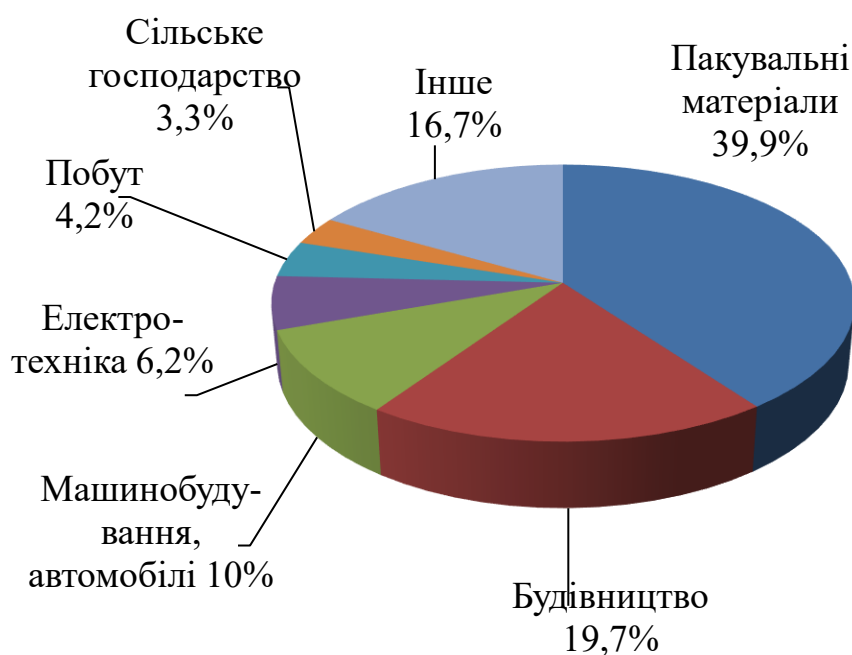


Рисунок 1.2 – Застосування полімерних матеріалів у країнах ЄС

Стрімкий ріст виробництва полімерних матеріалів обумовлений збільшенням населення планети, внаслідок чого росте споживання побутової техніки, предметів домашнього вжитку та ін. З розвитком переробки полімерних відходів традиційні матеріали замінюють на полімерні [6]. Як

показують дослідження [7, 8], відбувається стрімке зростання виробництва та споживання пакувальних матеріалів – щорічні темпи росту складають до 6 %.

На рисунку 1.3 наведено співвідношення використання найбільш поширених в Європі виробів з полімерів [2, 6].

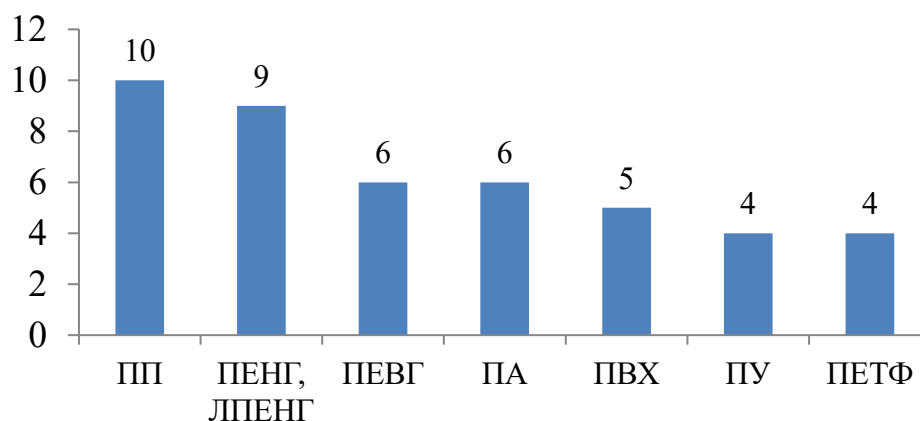


Рисунок 1.3 – Обсяги використання полімерів за номенклатурою у Європі, млн. т в рік

Сучасні технології виробництва харчової плівки використовують методи екструзії та ламінування [1, 9, 10].

Екструзія – це спосіб отримання виробів або напівфабрикатів з полімерних матеріалів шляхом витискання розплаву полімеру через фільтру потрібного профілю. Екструзія (плоскощільнна та видувна) також дозволяє на основі поліетилену (ПЕ) та полівінілхлориду (ПВХ) створювати багат шарові плівки високої еластичності, міцності та герметичності.

При застосуванні методу плоскощільнної екструзії пласке полотно утворюється шляхом видавлювання полімерного матеріалу через вузьку щільну. Цей метод часто використовують в технологіях виробництва багат шарових плівок від 5 до 7 шарів, які застосовують в автоматичному пакуванні.

Видувна екструзія передбачає видавлювання полімеру через кільцеву голівку в результаті чого утворюється труба, яку потім розширюють повітрям і згортають у пласке полотно.

Спеціалізовані методи, такі як ламінування та соекструзія, дозволяють поєднувати різні типи плівок для досягнення кращих властивостей харчових плівок. Вони забезпечують надійний захист продуктів від кисню, вологи, забруднень і подовжують термін їхньої придатності.

Соекструзія – це метод, що дозволяє одночасно видавлювати кілька полімерних шарів через одну екструзійну фільтру. В результаті створюють плівки з різними властивостями в різних шарах, наприклад, зовнішній шар може бути клейким, а внутрішній – міцним.

Ламінування – це метод склеювання або з'єднання вже готових плівок або інших матеріалів. Ця технологія дозволяє отримати плівки з унікальними властивостями, наприклад, поєднати бар'єрний шар з шаром, що легко розривається.

Найбільш поширеними прикладами використання сучасних технологій отримання харчової плівки є термозбіжна плівка та стрейч-плівка. Термозбіжну плівку також виготовляють за допомогою екструзії. Найбільш цінною є її здатність стискатися при нагріванні, що дозволяє герметично пакувати продукти, зберігаючи їх свіжість та захист від забруднення.

Для технологій виробництва стрейч-плівки найчастіше використовують плоскощільну екструзію, щоб створити багатошарову структуру, де зовнішні шари злипаються, а внутрішні забезпечують міцність та розтягування.

Таким чином, сучасне виробництво харчової плівки є високотехнологічним процесом, що базується переважно на методах екструзії термопластичних полімерів та спрямований на отримання матеріалів із заданими бар'єрними, механічними й санітарно-гігієнічними властивостями. Основним трендом галузі є зменшення екологічного навантаження, підвищення ресурсо- та енергоефективності, а також перехід до біорозкладних і компостованих матеріалів.

1.2 Класифікація полімерних плівкових матеріалів для виробництва харчової плівки

Пакування готового продукту виконує декілька функцій для збереження важливих споживачам властивостей [11, 12].

Здатність зберігати харчові продукти від шкідливої дії зовнішніх чинників – це головна захисна функція пакувальних матеріалів. Тривалий захист забезпечують безпека, сумісність з продуктами харчування та надійність.

Загальна класифікація полімерних матеріалів для харчових плівок:

- за походженням – синтетичні (поліолефіни, полістирол та ін.) та природні (целюлоза, крохмаль та ін);
- за способом синтезу – поліконденсаційні та полімеризаційні;
- за стійкістю до температури – термоактивні, які при нагріванні набувають незворотних перетворень, та термолабільні, тобто мають властивість при охолодженні та нагріванні відновлюються до свого початкового стану;
- за еластично-механічною характеристикою – нееластичні та ригідні (опір на міцність >1000 мПа), напівеластичні (опір на міцність > 400 мПа), м'які (опір на міцність > 20 мПа) та еластичні (опір на міцність <20 мПа);
- за складом основного ланцюга – карболанцюгові, тобто складаються з атомів вуглецю, та гетеро ланцюгові, у склад молекул яких окрім вуглецю входять атоми металів або неметалів.

В даний час на ринку пакувальних матеріалів та виробів з них широко використовують різні види полімерних пакувальних матеріалів (рисунок 1.4).

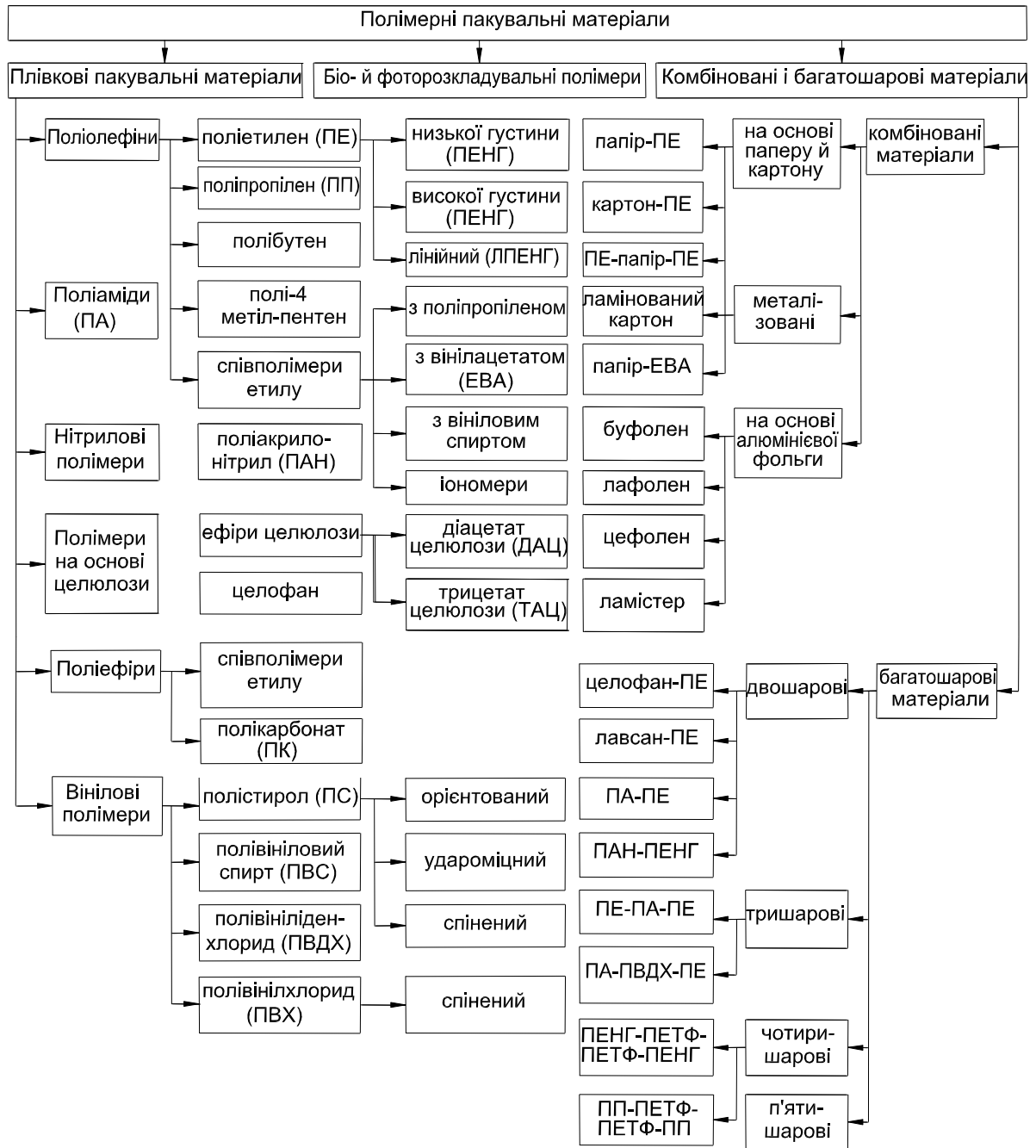


Рисунок 1.4 – Види полімерів для виробництва харчової плівки

Найбільш поширеними і популярними полімерами для плівкових матеріалів є поліолефіни (поліетилен різних типів), а також поліпропілен і співполімери етилену [5, 8, 13].

Поліетилен (ПЕ) отримують полімеризацією етилену. Молекули поліетилену складаються з атомів вуглецю і водню та можуть мати

розгалуження різного ступеня. За цією ознакою ПЕ поділяють на групи полімерів низької та високої густини.

Поліетилен низької густини (ПЕНГ, LDPE) є одним із найпоширеніших полімерних матеріалів, що застосовують для виготовлення харчових пакувальних плівок. Широке використання зумовлене поєднанням задовільних експлуатаційних, технологічних і санітарно-гігієнічних властивостей, а також відносно низькою собівартістю.

Плівки з ПЕНГ характеризуються високою гнучкістю та еластичністю, що забезпечує їх стійкість до деформацій і розриву під час експлуатації. Матеріал має порівняно низький модуль пружності, що дозволяє отримувати м'які плівки з хорошими стретч-властивостями. Міцність на розтяг ПЕНГ є достатньою для пакування більшості харчових продуктів, а подовження при розриві може досягати 300–600 %, що зумовлює високу опірність механічним пошкодженням.

Густина ПЕНГ зазвичай становить 0,915–0,930 г/см³, що обумовлює низьку масу готової плівки та сприяє зниженню матеріаломісткості пакування. ПЕНГ належить до термопластів і має відносно низьку температуру плавлення (105–115 °С), що забезпечує простоту його переробки методами екструзії з роздуванням або плоскощільної екструзії. Плівки з цього матеріалу мають добру зварюваність і здатність до термозапаювання, що є важливою вимогою для харчового пакування. Водночас обмежена теплостійкість ПЕНГ зумовлює неможливість його застосування для пакування продуктів, що піддаються високотемпературній обробці.

Плівки з ПЕНГ мають низьку проникність для водяної пари, що забезпечує ефективний захист харчових продуктів від висихання. Однак бар'єрні властивості щодо кисню, вуглекислого газу та ароматичних речовин є недостатніми, що обмежує використання ПЕНГ для пакування продуктів з підвищеними вимогами до газонепроникності. З метою покращення бар'єрних характеристик ПЕНГ часто застосовують у багатошарових плівках у поєднанні з іншими полімерними матеріалами [9, 14].

ПЕНГ-плівки характеризуються задовільною прозорістю та блиском, що дозволяє візуально контролювати стан упакованого продукту. Ступінь прозорості залежить від умов переробки, товщини плівки та наявності модифікувальних добавок.

Поліетилен низької густини є хімічно інертним матеріалом, стійким до дії більшості кислот, лугів і солей. Він не взаємодіє з харчовими продуктами та характеризується низьким рівнем міграції речовин, що дозволяє використовувати його для прямого контакту з харчовими продуктами відповідно до чинних санітарно-гігієнічних норм.

З екологічної точки зору ПЕНГ не є біорозкладним матеріалом, що створює проблему накопичення відходів у довкіллі. Водночас він добре піддається вторинній переробці, а повторне використання ПЕНГ дозволяє зменшити споживання первинної сировини та екологічне навантаження на навколишнє середовище.

У плівок з поліетилену, які мають високу густину спостерігають більшу жорсткість, вищий опір на розтягування і стискання, але нижчий удару на роздирання, порівняно з ПЕНГ.

ЛПЕНГ має проміжні властивості між поліетиленами низької та високої густини. Використовують для виробництва усадкових, розтягувальних та непроникних плівок. За будовою ЛПЕНГ схожий до поліетилену який має високу густину (наділений лінійною структурою), але має більшу частку численних та довгих розгалужень. Також ЛПЕНГ хімічно стійкіший, краще витримує високі і низькі температури, має підвищену стійкість до проколу, розтріскування та роздирання. Для плівки, яка матиме контакт з харчовими продуктами, в умовне позначення додають слово харчова.

Плівка для упакування харчових продуктів при випробуваннях у дистильованій воді не має змінювати фізико-хімічні та органолептичні властивості дистильованої води. Використання харчової плівки не вимагає дотримання особливих заходів, тому що вона не токсичний матеріал. При

перевищенні температури плавлення поліетилену спостерігають виділення оксиду карбону, альдегідів тощо.

Термоусадкову поліетиленову плівку виготовляють із поліетилену високого тиску або композицій на його основі з додаванням ковзаючих добавок і пігментів. Використовують переважно для пакування вантажів. Отримують термоусадкову плівку методом екструзії з наступним розтягуванням повітрям. В умовному позначенні плівки, яка матиме безпосередній контакт з продуктами харчування вказують харчова, а для перфорованої – перфорована.

Плівки зі співполімеру з вінілацетатом використовують для нанесення на картон, тому що вони прозорі, міцні і добре зварюються.

Співполімер вінілового спирту та етилену забезпечує підвищені бар'єрні властивості при великій вологості і високих температурах. Застосовують у пакуванні м'ясних виробів. У комбінованих матеріалах використовують в якості внутрішнього шару, який вступає в контакт з харчовим продуктом. Методом співекструзії співполімеру вінілового спирту та етилену з поліолефінами та нейлоном виготовляють мішки і пакети для харчових рідин.

Іономери – це прозорі термопластичні матеріали низької густини, які отримують співполімеризацією ненасичених органічних кислот з етиленом. У макромолекулах іономерів метали нейтралізують частину кислотних груп. Через інертність до дії органічних розчинників, жирів, лугів і мастил іономери застосовують як покриття для облягаючого або тонкостінного пакування.

Поліпропілен дуже схожий на поліетилен високої густини за властивостями [8, 16]. При цьому ПП має меншу густину, високу механічну міцність, жиро- й теплостійкість, але поступається стійкістю до низьких температур. Упаковки з поліпропіленових плівок мають кращий зовнішній вигляд, більші прозорість і блиск, ніж пакування з ПЕНГ.

ПП пластичний, удароміцний, термостійкий, хімічно стійкий, низька паро- і газопроникність. Температура плавлення поліпропілену складає від 160°C до 175°C, тому поліпропіленову тару можна використовувати в

мікрохвильових печах. Також термостійкість дозволяє піддавати короткочасній стерилізації товару, упакований в поліпропіленовий матеріал, при температурі 130 °С.

Виготовляють поліпропіленові плівки за напрямками в одному чи двох неорієнтованими та орієнтованими. Орієнтований поліпропілен має високу прозорість, за низьких температур у зіставленні з ПЕ має вищу ударну міцність. У орієнтованого ПП особливо цінними є бар'єрні властивості, тому його використовують у багат шарових пакувальних матеріалах для створення захисного зовнішнього шару.

Єдиним недоліком ПП є усадка його в місці зварного шва, що ускладнює термічне зварювання. Для полегшення зварювання орієнтований поліпропілен покривають більш легкоплавким співполімером вінілхлорид з вініліденхлоридом.

В якості внутрішнього термозварювального шару використовують неорієнтовану поліпропіленову плівку.

Завдяки своїм підвищеним бар'єрним властивостям покриті та співекструдовані ПП плівки надають захист виробам (наприклад, кондитерським та тютюновим виробам), чутливим до дії парів води або кисню.

В даний час біополімерні плівки є перспективним видом пакувальних матеріалів, що виготовляють з відновлюваної сировини або здатні до біорозкладання в природних умовах. Їх застосування в харчовій промисловості зумовлене зростаючими вимогами до екологічної безпеки пакування та зменшення негативного впливу полімерних відходів на навколишнє середовище [2, 7, 15].

До основних біополімерів, що використовують для виготовлення харчових плівок, належать: полілактид (PLA), крохмальні полімерні композиції, целюлозні та похідні целюлози, білкові плівки (желатин, казеїн, соєвий білок), хітозан та інші природні полімери.

Біополімерні плівки, як правило, характеризуються вищою жорсткістю та крихкістю порівняно з плівками на основі поліетилену. Міцність на розтяг

у таких матеріалів може бути досить високою, однак подовження при розриві є низьким, що обмежує їх використання для пакування продуктів, які потребують високої еластичності.

Для покращення механічних властивостей часто застосовують пластифікатори (гліцерин, сорбітол) або багатокомпонентні композиції.

Однією з основних переваг біополімерних плівок є високі бар'єрні властивості щодо газів, зокрема кисню та вуглекислого газу, що сприяє уповільненню окисних процесів у харчових продуктах. Водночас їх стійкість до водяної пари є недостатньою, особливо у крохмальних і білкових плівок, що обмежує застосування для продуктів з підвищеною вологістю.

Біополімерні плівки характеризуються обмеженою термостійкістю. Наприклад, плівки з PLA деформуються при температурах вище 55–60 °C, що ускладнює їх використання для гарячого пакування або термічної обробки. Це зумовлює необхідність ретельного підбору умов експлуатації. Більшість біополімерних плівок мають високу прозорість і добрі естетичні характеристики, що є важливим для споживчого пакування. Однак у деяких випадках можливе пожовтіння матеріалу під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Біополімерні плівки є безпечними для контакту з харчовими продуктами, проте вони чутливі до дії вологи, мікроорганізмів і ферментів, що прискорює процеси біодеградації. З одного боку, це є екологічною перевагою, з іншого – фактором, що обмежує термін зберігання продукції.

Головною перевагою біополімерних плівок є їх біорозкладність і компостованість, що дозволяє суттєво зменшити накопичення полімерних відходів. Водночас повна реалізація екологічних переваг можлива лише за наявності відповідної інфраструктури для компостування та контролю умов розкладання.

Таким чином, біополімерні плівки характеризуються високим екологічним потенціалом і добрими бар'єрними властивостями щодо газів, однак поступаються традиційним полімерним матеріалам за механічною

міцністю, вологостійкістю та термостійкістю. Це зумовлює доцільність їх використання у спеціалізованих сферах або у складі багат шарових пакувальних матеріалів.

Матеріали які є пропіленовими та біоксальноорієнтованими мають широке використання для пакування харчових продуктів. У Західній Європі виробництво даних плівок сягає 700 тис. т на рік [2, 3].

На даний момент компанія «Укrapластик» має 60 % обсягів продажів поліпропіленових плівок в Україні, є найбільшим виробником та найвідомішою вітчизняною торговою маркою пакувальних матеріалів [17].

Плівки, які виготовлені за технологією двовісної орієнтації, фізіологічно нейтральні, не мають шкідливих добавок та домішок, не велику синергічну міграцію компонентів матеріалу та продукту, не впливають на смак продуктів, безпечні при утилізації відходів упаковки. Тому вони мають дозвіл від МОЗ України на використання для харчових продуктів. Компанія «Укrapластик» випускає широкий асортимент харчових плівок:

- прозорі загального призначення;
- металізовані загального призначення;
- біло-перламутрові загального призначення;
- прозорі та білі з перламутровим відтінком для етикеток;
- прозорі для тютюнових виробів.

Прозорі плівки застосовують для використання з іншими багатокомпонентними матеріалами для нашарування та ламінування. Володіють високою прозорістю, блиском та привабливим товарним виглядом.

Металізовані плівки отримують вакуумним напилюванням парів алюмінію на плівку. Підвищені бар'єрні властивості металізованих плівок зробили їх популярними для фасування чіпсів, морозива, кави, горішків, чаю тощо.

Перламутрові плівки виготовляють з додаванням спеціального композиту, який надає особливого характеру заломленню світла. Вони мають оригінальний зовнішній вигляд. Перламутрові плівки мають мікропористу

структуру з низькою щільністю з підвищеними теплоізолювальними властивостями, що забезпечує їм відповідні вимоги при зберіганні морозива і заморожених продуктів.

Прозорі плівки розроблено для упакування тютюнових виробів в спеціальних високошвидкісних автоматах. В технологіях виробництва враховували вимоги не утворювати зарядів статичної електрики при русі трактами машин та мати необхідне ковзання.

Плівки, вироблені за технологією двовісної орієнтації, мають глянцеvu та гладку поверхню з низьким коефіцієнтом тертя, при цьому на них легко наносити друк, лакувати і ламінувати. БООП випускають різноманітних марок.

Марка П – це прозора плівка без термозварювального шару. Застосовують для фасування продуктів на пакувальних автоматах після ламінування поліетиленом. Після попередньої обробки праймером на основі полівініліденхлориду здійснюють ламінування БООП поліетиленом для зростання бар'єрних властивостей. Тому БООП марки П використовують для вакуумного пакування м'ясних та морепродуктів, а також продуктів з часткою жирів понад 5 %.

Марка ПМ – прозора плівка без антистатичних і ковзких добавок для подальшої металізації. Використовують як основу при виготовленні комбінованих плівок і для пакування продуктів харчування.

Марка С – прозора коекстудована плівка яка має один або два зварювальні шари, використовують для високошвидкісного пакування широкої палітри продовольчих товарів. Має високу термостійкість (від –50 до 100 °С) і еластичність. На плівку зручно наносити малюнок як глибоким друком, так і флексографією.

Марка СМ – коекстудована прозора плівка для металізації, яка має один чи два шари, без ковзких і антистатичних добавок. Конструктивною особливістю даного матеріалу є наявність одного або двох функціональних шарів, сформованих у процесі коекструзії, що забезпечує рівномірність

структури та стабільність властивостей по всій товщині плівки. Важливою характеристикою плівки марки СМ є відсутність ковзких та антистатичних добавок, що є принципово необхідним для процесу металізації. Така композиція забезпечує високу чистоту поверхні, добру адгезію металевому шару та однорідність металізованого покриття. Коекструзійна технологія виготовлення плівки СМ дозволяє отримати плівку з контрольованою товщиною та мінімальними відхиленнями. Сформувати поверхневий шар з оптимальною морфологією для вакуумної металізації. Забезпечити високу оптичну прозорість і низьку поверхневу дефектність. Відсутність добавок, що мігрують, знижує ризик забруднення вакуумних камер і покращує стабільність технологічного процесу нанесення металевому шару.

Плівка марки СМ характеризується високою прозорістю та низькою мутністю, що є важливим для отримання рівномірного металізованого шару з високими відбивними властивостями. Поверхня плівки має достатню рівність і чистоту, що сприяє формуванню суцільного металевому покриття без дефектів. Після нанесення металевому шару плівка марки СМ набуває покращених бар'єрних властивостей щодо кисню, водяної пари та світла, естетичних характеристик (металевий блиск), захисних властивостей пакування харчових продуктів.

Плівку марки СМ використовують як базовий матеріал для виробництва металізованих пакувальних плівок, що застосовують у харчовій промисловості, зокрема для пакування продуктів, чутливих до дії кисню, вологи та світла.

Марка СЖ – коекстудована небезбарвна перламутрова плівка з двох термозварюваних шарів. Застосовують для пакування продовольчих товарів на пакувальних машинах, а також для ламінування картону і паперу.

Марка СЖБ – коекстудована перламутрова полімерна плівка, конструкція якої передбачає наявність білого співполімерного шару на одній зі сторін. Така багат шарова структура формується методом коекструзії, що забезпечує стабільність товщини, однорідність будови та відтворюваність

експлуатаційних властивостей. Білий співполімерний шар виконує функціонально-декоративну та технологічну роль, надаючи плівці характерного перламутрового ефекту. Наявність цього шару покращує світловідбивні властивості матеріалу, оптичну однорідність поверхні, візуальну привабливість пакування. Основний прозорий шар забезпечує механічну міцність і необхідні бар'єрні характеристики плівки.

Плівка марки СЖБ характеризується перламутровим зовнішнім виглядом, поєднанням напівпрозорості з рівномірним розсіюванням світла. Білий шар зменшує світлопроникність, що є доцільним для пакування харчових продуктів, чутливих до світлового випромінювання.

Коекструдована структура плівки СЖБ забезпечує достатню міцність на розтяг і прокол, стабільність форми при експлуатаційних навантаженнях, помірну жорсткість у порівнянні з повністю прозорими плівками. Завдяки співполімерному шару плівка має кращу опірність механічним пошкодженням і рівномірний розподіл напружень.

Плівка марки СЖБ добре піддається ламінуванню, друку, термозапаюванню (залежно від складу внутрішнього шару). Білий співполімерний шар часом використовують як зовнішній декоративний або внутрішній функціональний шар, залежно від вимог кінцевого пакування.

Плівку марки СЖБ застосовують для виготовлення пакувальних матеріалів харчового призначення, зокрема для продукції, що потребує часткового захисту від світла та має підвищені вимоги до зовнішнього вигляду упаковки (кондитерські вироби, снеки, молочні продукти).

Марка СТ –коекструдована прозора термозварювана полімерна плівка. Виготовляють методом коекструзії, що забезпечує багат шарову структуру з чітко розмежованими функціональними шарами та стабільними експлуатаційними властивостями. Конструкція плівки марки СТ, як правило, включає базовий несучий шар, який забезпечує механічну міцність і стабільність розмірів. Термозварюваний шар, що забезпечує надійне герметичне запаювання упаковки при відносно низьких температурах.

Завдяки коекструзійній технології досягають високої адгезії між шарами без застосування клеїв.

Плівка СТ характеризується достатньою міцністю на розтяг і прокол, помірною гнучкістю, що дозволяє використовувати її на високошвидкісних пакувальних лініях, стабільністю механічних показників при змінних умовах експлуатації.

Однією з основних характеристик плівки марки СТ є добра термозварюваність. Матеріал формує міцні та герметичні шви в широкому діапазоні температур запаювання, що є критично важливим для пакування харчових продуктів з різними фізичними властивостями.

Плівка СТ має високу прозорість і низьку мутність, що забезпечує привабливий зовнішній вигляд упаковки та можливість візуального контролю стану продукту. Добре піддається, друку, ламінуванню, формуванню на автоматичних і напівавтоматичних пакувальних машинах.

Плівку СТ використовують для виготовлення гнучкої харчової упаковки, зокрема для фасування сипких, штучних і штучно-штучних харчових продуктів, де важливими є прозорість, герметичність і надійність термозварювання.

Основними напрямками розвитку сучасних полімерних пакувальних матеріалів для харчових продуктів є [1, 2, 7, 10]:

- створення нових видів полімерних матеріалів, які надійно захищають продукти тривалий час від дії навколишнього середовища;
- розроблення нових полімерів з заданими властивостями;
- створення сучасних технологій та обладнання для утилізації та переробки якнайбільшої кількості відходів полімерних матеріалів.

Світове співтовариство стикнулося з тим, що при постійному зростанні обсягів виробництва полімерів, питання переробки і утилізації відходів стає особливо актуальним. В структурі муніципальних відходів пакувальні матеріали зі синтетичних полімерів досягає 40 %. Наразі, в найкращому випадку, плівка попадає на полігони побутових відходів, де відбувається її

накопичення, адже процес розкладання синтетичних полімерів надто повільний. Один з шляхів розв'язання цієї проблеми – створення нових полімерних матеріалів, які володіють високим ступенем біорозкладу з утворенням безпечних матеріалів.

У контексті екологізації пакувальних матеріалів все більшого поширення набувають біорозкладні та фоторозкладні полімерні плівки, які розглядаються як альтернатива традиційним синтетичним полімерам. Їх використання спрямоване на зменшення негативного впливу полімерних відходів на навколишнє середовище та скорочення терміну їх перебування в екосистемах.

Біорозкладні полімерні плівки (БРП) – це матеріали, здатні до розкладання під дією мікроорганізмів (бактерій, грибів, водоростей) з утворенням простих низькомолекулярних сполук, таких як вода, вуглекислий газ та біомаса. Процес біодеградації відбувається за певних умов вологості, температури та наявності кисню.

До основних матеріалів для виготовлення БРП належать полілактид (PLA), полігідроксикапроати (PHA), крохмальні композиції, целюлозні та білкові полімери.

БРП характеризуються високим екологічним потенціалом, добрими бар'єрними властивостями щодо газів, обмеженою вологостійкістю, низькою або середньою механічною міцністю порівняно з ПЕ та ПП, обмеженою термостійкістю.

Біорозкладність БРП реалізована повною мірою переважно в умовах промислового компостування. За відсутності відповідної інфраструктури екологічні переваги таких матеріалів можуть бути частково нівельовані.

Фоторозкладні полімерні плівки (ФРП) – це матеріали на основі традиційних синтетичних полімерів (переважно поліетилену), до складу яких введені спеціальні фотосенсибілізатори або прооксидантні добавки, що ініціюють руйнування полімерних ланцюгів під дією ультрафіолетового випромінювання. Процес фоторозкладання відбувається у два етапи:

- фотодеструкція полімеру під дією УФ-випромінювання;
- подальше окиснення та фрагментація матеріалу до мікрочастинок.

ФРП зберігають експлуатаційні властивості традиційних полімерних плівок протягом визначеного терміну використання, після чого втрачають механічну міцність, розпадаються на дрібні фрагменти, не забезпечують повної мінералізації полімеру.

Основним недоліком ФРП є те, що вони не забезпечують повної біодеградації, а сприяють утворенню мікропластику, що становить екологічну загрозу. Саме тому використання ФРП є предметом наукових дискусій і регуляторних обмежень [2, 10, 19].

На даний час не спостерігають масового застосування біо- і фоторозкладних полімерів. Серед причин виділяють відсутність технологій, недостатні інвестиції в розробку цих технологій, відсутність досвіду, непристосованість традиційного обладнання до переробки. Механічні властивості біофоторозкладних матеріалів ще не можуть конкурувати зі звичайними полімерами. На сьогодні ці матеріали потребують покращення і подальшої розробки, тому що вони можуть піддаватися побічним реакціям і завчасній деструкції.

Біорозкладні полімерні матеріали для виробництва харчової плівки розділяють на три групи [20, 21]:

- синтетичні пакувальні матеріали;
- природні полімерні пакувальні матеріали (біологічні перетворення природних полімерів);

– пакувальні матеріали які є синтетичними полімерами та добавками. Завдяки цим добавкам пакувальні матеріали при закінченні користування та захороненні мають властивість розкладатися.

Британська фірма Imperial Chemical Industries розробила промисловий біорозкладний термопласт Viro1, який був першим подібним полімерним матеріалом, здатним повністю розкладатися та асимілюватися навколишнім

середовищем. Його виробляють за унікальною технологією збродження цукру та крохмалю.

Подальший розвиток технологій виробництва біорозкладних полімерів виявив, що найбільш перспективні матеріали на основі гідроксикарбонових кислот. Давно відомо, що полієфіри на основі молочної, гліколевої, валеріанової, капронової кислот розкладаються на карбону діоксид і воду під дією певних мікроорганізмів [22-25].

Найвідомішим полієфіром є полілактид, отримують конденсацією молочної кислоти, синтетичним та біологічним шляхом.

Полілактид – термоплавкий безбарвний полімер, за фізичними характеристиками полілактид схожий на поліетилен, поліпропілен і пластифікований полівінілхлорид. Із полілактиду виготовляють плівки для продуктів харчування, одноразовий посуд, але висока ціна стримує широке використання цього полімера. Термостійкі багат шарові пакувальні матеріали, які використовують для харчових продуктів виготовляють з целюлози та крохмалю. Цей вид пакування дозволяє розігрівати продукти в мікрохвильових печах. Перспективним напрямом вважають синтез біорозкладних полімерів на основі існуючих синтетичних матеріалів.

1.3 Міжнародні стандарти та регулювання у сфері екологічності пакування, тенденції розвитку екологічно безпечних пакувальних матеріалів

Проблема екологічного пакування стає все більш актуальною в умовах глобальних змін клімату та зростаючого обсягу відходів. Пакувальна плівка, будучи невід'ємною частиною сучасного виробництва і споживання, часто є осередком екологічних дискусій. У зв'язку з цим, міжнародні стандарти і нормативні документи, такі як ISO 14001 і директиви Європейського Союзу, мають важливе значення у формуванні стійкої практики в пакувальній галузі [26-28].

Екологічну безпеку пакувальних матеріалів для виробництва харчової плівки регулюють на міжнародному та національному рівнях. Система заходів охоплює такі ключові аспекти [28, 29]:

- обмеження використання шкідливих речовин у пакувальних матеріалах;
- маркування та класифікація матеріалів за здатністю до переробки або біорозкладання;
- оцінка впливу на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу пакування (LCA – Life Cycle Assessment).

Основними міжнародними стандартами Європейського Союзу є EU 10/2011 – регламентує безпечність матеріалів, що контактують з харчовими продуктами, у тому числі полімерних плівок. EN 13432 – стандарт на біорозкладні та компостовані пакувальні матеріали, що встановлює критерії деградації, токсичності та впливу на середовище. Directive 94/62/EC – Директива ЄС щодо пакувальних матеріалів та відходів пакування, яка визначає вимоги до скорочення кількості пакування, повторного використання та переробки.

В США головними є FDA Code of Federal Regulations (CFR), Title 21 – встановлює вимоги до безпечності контактних матеріалів з харчовими продуктами. ASTM D6400 – стандарт для біорозкладних та компостованих пластикових матеріалів, що визначає терміни та умови біодеградації.

Міжнародними організаціями розроблені основні серії стандартів виробництва пакувальних матеріалів, зокрема харчової плівки:

- ISO 18601–18606 – серія стандартів ISO щодо пакувальних матеріалів, включаючи екологічні вимоги, оцінку та маркування;
- ISO 14040/14044 – стандарти оцінки життєвого циклу (LCA), що застосовують для оцінки екологічного впливу пакування.

Багато країн впроваджують власні норми (національні стандарти та ініціативи), що відповідають міжнародним стандартам. Наприклад, у

Німеччині – Packaging Ordinance (VerpackV), у Франції – закони про зменшення пластику та обов’язкову переробку, у Японії та Китаї – норми щодо сортування та утилізації пакувальних відходів.

Аналіз міжнародних та вітчизняних стандартів у сфері екологічності пакувальних матеріалів наведено в таблиці 1.1 [26, 29]. Таблиця 1.1. демонструє комплекс міжнародних і національних стандартів, що регулюють виробництво, використання та утилізацію пакувальних матеріалів.

Таблиця 1.1 – Міжнародні та вітчизняні стандарти пакувальних матеріалів для харчових плівок

Стандарт	Рівень	Призначення
1	2	3
EN 13432	Міжнародний, ЄС	Стандарт для біорозкладних та компостованих пакувальних матеріалів; визначає критерії деградації, токсичності та впливу на довкілля.
EU 10/2011	ЄС	Регламентує безпечність матеріалів, що контактують з харчовими продуктами, включаючи полімерні плівки.
Directive 94/62/EC	ЄС	Директива щодо пакувальних матеріалів та відходів. Встановлює вимоги до скорочення кількості пакування, повторного використання та переробки.
ASTM D6400	США	Стандарт для біорозкладних та компостованих пластикових матеріалів. Визначає терміни та умови біодеградації.

Кінець таблиці 1.1.

1	2	3
FDA CFR Title 21	США	Вимоги до безпечності матеріалів для прямого контакту з харчовими продуктами.
ISO 18601–18606	Міжнародний	Серія стандартів ISO щодо пакувальних матеріалів, включно з екологічними вимогами, оцінкою та маркуванням.
ISO 14040 / ISO 14044	Міжнародний	Стандарти оцінки життєвого циклу (LCA) пакувальних матеріалів. Визначають методику оцінки екологічного впливу.
ДСТУ 4491:2005	Україна	Пакувальні матеріали. Загальні технічні вимоги.
ДСТУ EN 13432:2012	Україна	Національна адаптація європейського стандарту EN 13432 для біорозкладних і компостованих пакувальних матеріалів.
ДСТУ ISO 14040:2007	Україна	Національна версія ISO 14040; оцінка життєвого циклу пакувальних матеріалів.
ДСТУ ISO 18601:2014	Україна	Національна адаптація ISO 18601; вимоги до екологічної оцінки та маркування пакувальних матеріалів.

Аналіз таблиці 1.1. показує, що міжнародні стандарти ISO та ASTM забезпечують методологічну базу для оцінки екологічних характеристик пакування. ISO 14040/14044 визначає правила оцінки життєвого циклу (LCA), що дозволяє об'єктивно порівнювати різні матеріали та технології пакування з точки зору їхнього впливу на довкілля. ISO 18601–18606 встановлює загальні принципи екологічної оцінки та маркування пакувальних матеріалів. ASTM

D6400 регламентує вимоги до біорозкладних та компостованих пластикових матеріалів.

Європейські регламенти (EN 13432, EU 10/2011, Directive 94/62/EC) формують правову основу для виробництва безпечних і екологічно прийнятних пакувальних матеріалів, включаючи контроль хімічної безпечності, обмеження шкідливих речовин і зобов'язання щодо переробки та повторного використання.

Національні стандарти України (ДСТУ) є адаптацією міжнародних вимог, що дозволяє гармонізувати українське законодавство з міжнародними нормами та забезпечити відповідність пакувальних матеріалів екологічним і санітарним стандартам.

Слід зазначити, що міжнародні стандарти (ISO, ASTM, EN) та регламенти ЄС (EU 10/2011, Directive 94/62/EC) формують глобальні вимоги до безпечності та екологічності пакувальних матеріалів, встановлюють:

- критерії біорозкладності та компостованості (EN 13432, ASTM D6400);
- вимоги до обмеження шкідливих речовин у харчовому пакуванні (EU 10/2011);
- методики оцінки життєвого циклу (ISO 14040/14044).

Національні стандарти України (ДСТУ, адаптація EN та ISO) гармонізують з міжнародними, що дозволяє забезпечити сумісність української продукції з міжнародними ринками. А також впроваджувати екологічні практики виробництва відповідно до принципів сталого розвитку, підвищувати контроль за безпечністю харчових пакувальних матеріалів.

Система стандартів стимулює використання біорозкладних і компостованих матеріалів (PLA, крохмальні плівки, целюлозні плівки). Впровадження методів LCA (ISO 14040/14044) дозволяє оцінити вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу пакувальних матеріалів.

Принципи reduce, reuse, recycle інтегрують у виробництво пакування, що відповідає стандартам EN 13432 та Directive 94/62/EC. Використання моно-

матеріальних конструкцій та переробленої сировини зменшує витрати первинних ресурсів. Регламенти EU 10/2011 і відповідні ДСТУ встановлюють обмеження на міграцію хімічних компонентів у харчові продукти. Це забезпечує екологічну та санітарну безпеку пакування, зменшуючи ризик токсичного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Стандарти безпосередньо підтримують реалізацію принципів зеленої хімії у пакувальній промисловості [27, 29]. В таблиці 1.2 наведено реалізація принципів зеленої хімії в системі стандартів виробництва харчової плівки.

Таблиця 1.2 – Реалізація принципів зеленої хімії в системі стандартів виробництва харчової плівки

Принцип зеленої хімії	Стандарти, які реалізують принцип зеленої хімії
Використання відновлюваних ресурсів	Біорозкладні та компостовані плівки (EN 13432, ASTM D6400)
Мінімізація відходів	Впровадження LCA, моно-матеріальних конструкцій та переробки (ISO 14040, Directive 94/62/EC)
Безпечні хімічні речовини	Обмеження міграції шкідливих компонентів у харчові продукти (EU 10/2011, ДСТУ)
Енергоефективність	Вимоги до оптимізації товщини плівок, повторного використання матеріалів
Розробка матеріалів для повторного використання	Принципи circular economy, використання вторинної сировини

Отже, взаємозв'язок міжнародних та національних стандартів забезпечує системний підхід до екологічної безпеки пакувальних матеріалів, поєднуючи:

- санітарні та токсикологічні вимоги;
- контроль за переробкою, біорозкладністю та компостованістю;

- оцінку екологічного впливу протягом життєвого циклу.

Реалізація цих стандартів дозволяє різним галузям промисловості зменшити екологічний слід пакування, інтегрувати принципи сталого розвитку та зеленої хімії у виробничі процеси, підвищити безпеку для споживача і довкілля та сприяти переходу до циркулярної економіки.

Аналіз міжнародних та вітчизняних стандартів показує, що сучасне регулювання пакувальних матеріалів зосереджене на трьох ключових напрямках. Екологічна безпека – оцінка впливу на довкілля, біорозкладність, компостованість, утилізація та переробка. Харчова безпека – контроль міграції речовин з пакувальних матеріалів у продукти харчування. Енерго- та ресурсоефективність – зменшення товщини пакувальних матеріалів, використання повторно переробленої сировини, принципи кругової економіки.

Спостерігається гармонізація національних стандартів з міжнародними нормами, що дозволяє виробникам виходити на зовнішні ринки. Підвищення уваги до біорозкладних і компостованих матеріалів, що відображено у стандартах EN 13432 і ASTM D6400 та їх українських аналогах. Використання методики LCA (ISO 14040/14044) стимулює перехід до більш екологічно оптимізованих технологій виробництва пакування та впровадження принципів сталого розвитку. Загальна тенденція – інтеграція принципів reduce, reuse, recycle у структуру і виробництво пакувальних матеріалів для харчових плівок.

Аналіз міжнародних та вітчизняних стандартів показує, що сучасне регулювання пакувальної промисловості поєднує вимоги до екологічної безпеки, харчової безпеки та економічної ефективності. Впровадження міжнародних і національних стандартів стимулює розвиток екологічно безпечних пакувальних матеріалів, таких як біорозкладні плівки, моно-матеріальні пакети та вторинно перероблювані полімери, і забезпечує поступову інтеграцію принципів кругової економіки у харчову промисловість.

Сталий розвиток у технологіях виробництва харчової плівки передбачає збалансоване поєднання економічних, екологічних та соціальних аспектів, що включає:

- екологічну безпеку – мінімізацію шкідливого впливу на довкілля на всіх стадіях життєвого циклу пакування;
- раціональне використання ресурсів – зменшення споживання первинної сировини, оптимізація товщини плівок, повторне використання матеріалів;
- соціальну відповідальність – забезпечення безпечності харчових продуктів, збереження здоров'я споживачів та підвищення екологічної свідомості.

Принципи зеленої хімії орієнтовані на зменшення негативного впливу хімічних матеріалів на навколишнє середовище та здоров'я людини. Міжнародні та національні стандарти забезпечують системний підхід до екологічної безпеки пакувальних матеріалів для харчової плівки, що включає: контроль за шкідливими речовинами; оцінку життєвого циклу (LCA) для зменшення екологічного сліду; впровадження біорозкладних та компостованих матеріалів; стандартизацію маркування та вимог до вторинної переробки.

Зв'язок стандартів, які регулюють виробництво харчової плівки зі сталим розвитком і принципами зеленої хімії дозволяє зменшити негативний вплив пакування на довкілля, підвищити безпечність продуктів харчування, інтегрувати економічно ефективні та екологічно безпечні технології виробництва, сприяти переходу до циркулярної економіки, де матеріали максимально повторно використовують і переробляють.

Таким чином, стандарти які регулюють виробництво харчової плівки, не лише регламентують якість і безпеку матеріалів, але й стимулюють екологізацію пакувальної промисловості, реалізацію принципів зеленої хімії та досягнення цілей сталого розвитку.

Розвиток технологій виробництва харчової плівки спрямований на поєднання механічної надійності, бар'єрних властивостей та екологічної безпеки. Сучасні багатошарові та коекстуровані плівки дозволяють оптимізувати властивості матеріалу під конкретні потреби пакування, а інтеграція біополімерів та принципів циркулярної економіки відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку та зеленої хімії.

Тенденції розвитку технологій виробництва харчової плівки передбачають екологізацію виробництва [30-32]. Використання біорозкладних та компостованих полімерів (PLA, крохмальні плівки). Перехід до моно-матеріальних багатошарових конструкцій для спрощення переробки. Інтеграцію технологій кругової економіки Використання перероблених полімерів та скорочення відходів виробництва. Підвищення бар'єрних і механічних властивостей, розробка багатошарових коекстурованих плівок з підвищеною газонепроникністю. Використання нанотехнологій та адитивів для зміцнення плівок та підвищення стійкості до світла, кисню і вологи. Інтелектуальне пакування – харчові плівки з антимікробними, антиоксидантними або індикаторними властивостями. Застосування сенсорів та індикаторів свіжості продукту.

Актуальними тенденціями розвитку екологічно безпечних пакувальних матеріалів в даний час є:

- використання біорозкладних матеріалів (полілактид, крохмальні та білкові плівки, целюлозні матеріали; компостовані плівки для харчових продуктів);
- моно-матеріальні конструкції – заміна багатошарових пакувань на однорідні полімери для полегшення вторинної переробки;
- зменшення товщини плівок, економія сировини та зменшення енергетичних витрат при виробництві;
- рециклінг і вторинна переробка (використання перероблених полімерів) для виробництва нових пакувальних матеріалів;

- активні та інтелектуальні пакувальні системи (пакування з антимікробними, антиоксидантними або газопоглинаючими шарами), що подовжують термін зберігання продукту і зменшують утворення харчових відходів;

- фокус на круговій економіці інтеграція принципів reduce, reuse, recycle у дизайн пакування для харчових плівок.

Сучасні інноваційні технології виробництва харчових плівок наведено на рисунку 1.5 [2, 7, 15, 33].



Рисунок 1.5 – Інноваційні технології виробництва харчових плівок

Сучасні інноваційні технології виробництва харчових плівок спрямовані на підвищення екологічної безпеки, механічної та бар'єрної ефективності, а також інтеграцію принципів циркулярної економіки і зеленої хімії. Біорозкладні та компостовані матеріали, наноконпозиційні плівки, активні та інтелектуальні пакувальні системи формують нове покоління харчових плівок, що відповідає сучасним світовим тенденціям сталого розвитку.

2 ОБ'ЄКТ, МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування вибору дослідних зразків харчової плівки

З метою дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки, на основі аналізу літературних джерел, обрано склад біорозкладної плівки, що відповідає сучасним вимогам до екологічно безпечних пакувальних матеріалів для харчових продуктів. Для експериментальних досліджень фізико-механічних та екологічних властивостей пакувальних матеріалів використано біорозкладну плівку на основі крохмалю, оцтової кислоти, гліцерину та води.

Крохмаль є природним полісахаридом рослинного походження, який широко використовують у виробництві біорозкладних матеріалів завдяки своїй доступності, низькій вартості та повній біорозкладності. Вміст крохмалю обираємо емпіричними шляхом. Вміст крохмалю 25 г у складі плівки забезпечує формування безперервної плівкоутворювальної матриці, достатню механічну міцність та цілісність матеріалу, високий ступінь біорозкладу (до 90–100 % у природних або компостних умовах).

Крохмаль легко піддається термічній та хімічній модифікації, що дозволяє регулювати властивості плівки без використання токсичних реагентів, відповідно до принципів зеленої хімії.

Оцтова кислота у складі харчової плівки (у кількості 15 г) виконує функцію модифікувального та гідролізуючого агента, який сприяє руйнуванню міжмолекулярних водневих зв'язків у крохмалі, кращій желатинізації, гомогенізації крохмальної маси, підвищенню прозорості та однорідності плівки.

Крім того, оцтова кислота є харчовою добавкою (E260), що підтверджує її безпечність для застосування у матеріалах, призначених для контакту з харчовими продуктами. Її використання не призводить до утворення токсичних побічних продуктів та не ускладнює процес біорозкладання плівки.

Гліцерин у кількості 15 г введено до складу плівки з метою підвищення її еластичності та зниження крихкості. Як ефективний пластифікатор, гліцерин зменшує жорсткість крохмальної матриці, підвищує відносно подовження плівки при розриві, покращує технологічність формування плівкового матеріалу.

Гліцерин є біосумісною, нетоксичною речовиною, дозволеною для використання у харчовій та фармацевтичній промисловості. Його застосування відповідає вимогам екологічної безпеки та не перешкоджає біорозкладанню матеріалу.

Вода виконує функцію дисперсійного та структуроутворювального середовища, забезпечуючи рівномірне набухання крохмалю, ефективну желатинізацію при нагріванні, формування однорідної плівки без макродефектів.

Використання води як розчинника є екологічно доцільним, оскільки вона є нетоксичною, відновлюваною та не створює додаткового екологічного навантаження.

Запропонований склад біорозкладної плівки для проведення експериментальних досліджень має низку переваг:

- використання відновлюваної сировини;
- відсутність синтетичних токсичних компонентів;
- повний біорозклад матеріалу;
- відповідність принципам сталого розвитку та зеленої хімії;
- можливість застосування у пакуванні харчових продуктів з низькими та середніми бар'єрними вимогами.

Методика приготування біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю. Склад композиції: крохмаль харчовий – 25 г; оцтова кислота, 9 % – 15 г; гліцерин чистий – 15 г; вода дистильована – 45 г.

Для приготування біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю у термостійку скляну ємність вносять 45 г дистильованої води. До води при постійному перемішуванні поступово додають 25 г крохмалю, запобігаючи

утворенню грудок. Отриману суспензію перемішують магнітною мішалкою протягом 10–15 хв до однорідного стану.

До крохмальної суспензії додають 15 г оцтової кислоти та продовжують перемішування ще 5 хв. Після цього вводять 15 г гліцерину, який виконує роль пластифікатора. Суміш перемішують до повної гомогенізації протягом 5–10 хв. Оцтова кислота сприяє руйнуванню міжмолекулярних водневих зв'язків у крохмалі, а гліцерин забезпечує рівномірний розподіл пластифікатора у матриці.

Отриману суспензію нагрівають на водяній бані до температури 80 – 90 °С. Процес желатинізації триває 20–30 хв за постійного перемішування до утворення в'язкого прозорого гелю. Контроль температури є важливим для запобігання деструкції крохмалю. Формування плівки (метод лиття). Гарячий гель виливають тонким шаром на горизонтальну, знежирену поверхню (скло або тефлон). Товщину плівки регулюють об'ємом нанесеного гелю та вирівнюванням раклею.

Сушіння проводять за кімнатної температури (22–25 °С), протягом 24–48 год, або у сушильній шафі при 40–50 °С протягом 6–8 год.

Після висушування плівку акуратно знімають з підкладки, кондиціонують при відносній вологості 50 ± 5 % протягом 24 год перед проведенням досліджень.

2.2 Методика Life Cycle Assessment виробництва харчової плівки з біополімерів

Оцінку життєвого циклу виконують відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040:2006 Принципи та структура LCA, ISO 14044:2006 Вимоги та настанови щодо виконання LCA, ILCD Handbook (JRC, EU) для деталізації вибору методів впливу, EN 13432 для оцінки біорозкладності, за потреби.

Методика LCA включає чотири обов'язкові фази [8]:

- визначення мети та сфери дослідження;
- інвентаризація життєвого циклу (LCI);
- оцінка впливів життєвого циклу (LCIA);
- інтерпретація результатів.

Визначення мети та сфери дослідження (Goal and Scope) передбачає оцінку екологічних впливів виробництва харчової плівки на основі крохмалю та визначити ключові стадії, що формують екологічне навантаження.

Функціональна одиниця 1 кг готової харчової крохмальної плівки або 1 м² плівки товщиною 30–50 мкм. Системні межі Cradle-to-gate від вирощування сировини до виходу з виробництва або Cradle-to-grave з урахуванням утилізації/компостування.

Припущення та обмеження стаціонарний режим виробництва, середні дані енергетичного міксу, відсутність повторного використання плівки.

Інвентаризація життєвого циклу (LCI). Збір первинних даних витрати сировини (крохмаль, гліцерин, вода), енерговитрати (електроенергія, теплова енергія), викиди та відходи виробництва. Вторинні дані бази даних Ecoinvent, Agri-footprint, літературні джерела для агросировини.

Алокація за масою або енергетичною цінністю, для крохмалю – алокація між зерном, висівками, побічними продуктами

Перевірка якості даних повнота, репрезентативність, узгодженість одиниць.

Оцінка впливів життєвого циклу (LCIA). Вибір методу LCIA (ReCiPe 2016, CML 2001, ILCD 2011). Категорії впливу Global Warming Potential (GWP100), Acidification Potential, Eutrophication Potential, Photochemical Ozone Creation, Water Use, Cumulative Energy Demand (CED).

Інвентарні потоки співвідносять з категоріями впливу та множать на відповідні коефіцієнти. Потім здійснюють інтерпретацію результатів. Ідентифікація hotspot-ів, вирощування агросировини, стадія сушіння плівки.

Аналіз чутливості передбачає дослідження зміни джерел енергії, зміни частки гліцерину, альтернативних сценаріїв утилізації. Аналіз невизначеності

полягає у якісній оцінці достовірності. Одержані результати вносять до таблиці LCI, діаграми внеску стадій.

Методика LCA забезпечує прозорість припущень, відтворюваність розрахунків, коректність порівняльних тверджень.

Впровадження системи екологічного менеджменту (СЕМ) спрямоване на систематичне зменшення негативного впливу на довкілля, дотримання вимог природоохоронного законодавства, підвищення ресурсоефективності виробництва, забезпечення екологічної складової сталого розвитку підприємства. СЕМ впроваджують відповідно до ISO 14001:2015 Системи екологічного менеджменту. Вимоги та настанови, чинного екологічного законодавства України, галузевих стандартів харчової промисловості, принципів PDCA (Plan–Do–Check–Act).

Внутрішні фактори використання відновлюваної сировини (крохмаль), енергоємні операції (желатинізація, сушіння), утворення стічних вод з органічним навантаженням. Зовнішні фактори екологічні вимоги до пакування, попит на біорозкладні матеріали, регіональні обмеження водокористування.

Зацікавлені сторони у впровадженні СЕМ – контролюючі органи, споживачі харчової продукції, постачальники сировини, місцева громада.

Екологічна політика виробництва харчової плівки повинна відповідати характеру діяльності підприємства, включати зобов'язання щодо запобігання забрудненню, постійного поліпшення, дотримання законодавства, бути задокументованою та доведеною до персоналу.

LCA інтегрують в СЕМ та використовують для обґрунтування екологічних цілей, вибору сировини та енергії, оцінки екологічних інновацій, підтримки екологічного маркування.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ ПЛІВКИ

3.1 Оцінка сучасних технологій виробництва харчових плівок та їх екологічних характеристик

Сучасні технології виробництва харчової плівки є високотехнологічними процесами, що засновані переважно на методах екструзії термопластичних полімерів та спрямовані на отримання матеріалів із заданими бар'єрними, механічними й санітарно-гігієнічними властивостями. Основним трендом розвитку технологій виробництва харчових плівок є зменшення екологічного навантаження, підвищення ресурсо- та енергоефективності, а також перехід до біорозкладних і компостованих матеріалів [1, 18, 21].

В даний час основними полімерними матеріалами для виробництва харчової плівки є:

- традиційні полімери (поліетилен ПЕНГ, ПЕВГ, HDPE – найпоширеніший матеріал завдяки гнучкості, хімічній інертності та низькій вартості; полівінілхлориди використовують для стретч-плівок, але обмеження через екологічні та токсикологічні ризики пластифікаторів; поліпропілени – забезпечують високу прозорість і термостійкість);
- біополімери та альтернативні матеріали (полілактиди, крохмальвмісні композиції, целюлозні плівки), які відповідають концепції сталого розвитку, проте мають вищу собівартість і обмежену термостійкість.

Аналіз властивостей полімерних матеріалів з ПЕНГ, ПЕВГ, поліпропілену та біополімерних плівок наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика харчових плівок з різних полімерів

Показник	ПЕН	ПЕВГ	ПП	БіоП (PLA, крохмальні)
Густина, г/см ³	0,915–0,930	0,940–0,970	0,900–0,910	1,20–1,30
Температура плавлення, °С	105–115	125–135	160–170	130–170
Міцність на розтяг, МПа	8–15	18–30	30–40	40–70
Подовження при розриві, %	300–600	100–300	200–600	2–10
Гнучкість	Висока	Середня	Середня	Низька
Прозорість	Середня	Низька	Висока	Висока
Бар'єр до водяної пари	Високий	Високий	Середній	Середній
Бар'єр до газів (O ₂ , CO ₂)	Низький	Низький	Середній	Високий
Термостійкість	Низька	Середня	Висока	Обмежена
Зварюваність	Відмінна	Добра	Добра	Обмежена
Хімічна стійкість	Висока	Висока	Висока	Середня
Контакт з харчовими продуктами	Дозволений	Дозволений	Дозволений	Дозволений
Перероблювання	Висока	Висока	Висока	Обмежена
Біорозклад	Ні	Ні	Ні	Так
Екологічний вплив	Середній	Середній	Середній	Низький
Собівартість	Низька	Низька	Середня	Висока

На основі аналізу таблиці 3.1 ПЕНГ характеризується високою гнучкістю та технологічними властивостями, що доцільно для пакування широкого асортименту харчових продуктів. ПЕВГ має вищу міцність і жорсткість, проте поступається ПЕНГ за еластичністю та прозорістю. Поліпропілен вирізняється підвищеною термостійкістю та прозорістю, що розширює сферу його застосування, однак він менш ефективний як вологоізоляційний матеріал. Біополімерні плівки є екологічно перспективними, але їх використання дещо обмежено високою вартістю та нижчими механічними показниками.

Проаналізуємо основні технології виробництва харчової плівки [1, 11, 24]. Традиційні технології (Blown Film, Cast Film) виробництва харчової плівки ефективні виробництва плівок високої механічної міцності та термостійкості. Екструзія з роздуванням рукава (Blown Film) передбачає формування трубчатої плівки за рахунок подачі стисненого повітря. Універсальність, можливість отримання багатошарових структур, але мають значні енерговитрати, складність стабілізації процесу. Плоскощільна екструзія (Cast Film) передбачає формування плівки через плоску фільтру з подальшим охолодженням на вальцях. Перевагами технології є висока прозорість, рівномірна товщина харчової плівки. Недоліками є обмежені механічні властивості порівняно з Blown Film. Обидві технології створюють довготривалі пластикові відходи, менш екологічні, мають високий вуглецевий слід.

Технології коекструзії та металізації підвищують бар'єрні властивості харчової плівки. Ускладнюють вторинну переробку, потребують більше енергії, збільшують екологічний вплив. Багатошарова коекструзія передбачає поєднання кількох полімерів для досягнення бар'єрних властивостей. Дозволяє зменшити товщину харчової плівки без втрати функціональності.

Технології виробництва біорозкладних та компостованих плівок є найбільш екологічно безпечними. Знижують викиди CO₂ та мінімізують

пластикові відходи. Однак харчові плівки обмежені в термостійкості і механічних характеристиках.

Допоміжні процеси технології виробництва харчової плівки та її модифікація властивостей передбачають введення пластифікаторів, антиоксидантів, антифог-добавок. А також поверхневу обробку (коронний розряд, плазмова активація), ламінацію та нанесення функціональних покриттів.

Контроль якості та безпеки харчової плівки здійснюють за визначенням міграції компонентів у харчові продукти, товщини, прозорості, міцності, відповідності стандартам EU 10/2011, FDA, ДСТУ.

Екологічні аспекти сучасних технологій виробництва харчової плівки полягають у зниженні матеріаломісткості, використанні вторинної сировини для непрямого контакту з харчовими продуктами, створенні замкнених систем охолодження, рекуперації тепла, оцінці життєвого циклу (LCA).

Основні тенденції розвитку технологій виробництва харчової плівки спрямовані на перехід до моно-матеріальних плівок, придатних до переробки, активні та інтелектуальні плівки, розвиток біорозкладних і компостованих пакувальних матеріалів, посилення екологічного та санітарного регулювання.

Технологія екструзії з роздуванням є однією з найбільш поширених у виробництві харчових плівок завдяки простоті реалізації та універсальності. Вона забезпечує отримання плівок з високою механічною міцністю та еластичністю, що є важливим для пакування сипких і штучних харчових продуктів. Разом із тим, технологія характеризується підвищеним енергоспоживанням і значними викидами діоксиду вуглецю, що знижує її екологічну ефективність. Крім того, плівки, отримані методом роздування, мають середній рівень прозорості, що обмежує їх використання у преміальному пакуванні.

Плоскощілинна екструзія відрізняється кращою контрольованістю товщини та високою оптичною прозорістю плівки. Саме ці характеристики зумовлюють широке застосування даної технології для пакування харчових

продуктів, де важливий візуальний контроль якості. У порівнянні з екструзією з роздуванням, Cast Film характеризується дещо нижчими викидами CO₂, однак залишається енергоємною та чутливою до термічних деформацій. Екологічну безпеку таких плівок визначають типом використаного полімеру і, як правило, є обмежена у разі застосування традиційних полімерних матеріалів.

Технології коекструзії та багатошарової ламінації забезпечують формування плівок з покращеними бар'єрними властивостями до газів, вологи та світла за рахунок поєднання різних полімерних шарів. Це дозволяє суттєво подовжити термін зберігання харчових продуктів та зменшити втрати продовольства, що є позитивним з точки зору сталого розвитку. Водночас багатошарова структура ускладнює процеси вторинної переробки, що знижує екологічну ефективність таких плівок і підвищує навантаження на систему поводження з відходами.

Металізація полімерних плівок є ефективним методом підвищення бар'єрних властивостей, особливо щодо проникнення кисню та світла. Такі плівки широко застосовуються для пакування жиромістких і чутливих до окиснення продуктів. Проте додатковий етап металізації призводить до збільшення енергоспоживання та вуглецевого сліду виробництва. Крім того, наявність металевих шарів практично унеможлиблює механічну переробку плівки, що суттєво обмежує її екологічну доцільність.

Найбільш перспективними з екологічної точки зору є біорозкладні та компостовані плівки, виготовлені з полімерів на основі відновлюваної сировини. Вони характеризуються здатністю до повного біорозкладання або компостування, що дозволяє мінімізувати накопичення пластикових відходів у навколишньому середовищі. Разом із тим, такі плівки поступаються традиційним матеріалам за термостійкістю та механічною міцністю, а їх виробництво потребує підвищених енергетичних витрат і спеціалізованої інфраструктури для утилізації.

Таким чином, порівняння сучасних технологій виробництва харчових плівок показує, що традиційні методи забезпечують високі експлуатаційні характеристики, але мають значні екологічні обмеження, тоді як екологічно орієнтовані технології сприяють сталому розвитку, проте потребують подальшого вдосконалення для досягнення конкурентоспроможності. Оптимальним напрямом розвитку є поєднання ресурсозберігаючих технологій, зменшення товщини плівок, використання моно-матеріалів та впровадження біорозкладних компонентів у структуру пакування. Порівняльна характеристика сучасних технологій виробництва харчової плівки наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика сучасних технологій виробництва харчової плівки

Параметр / Технологія	Екструзія з роздуванням	Плоскощілинна екструзія	Коекструзія / Ламінація	Металізація	Біорозкладні / Компостовані плівки
1	2	3	4	5	6
Типи матеріалів	LDPE, HDPE, PP, PLA	LDPE, HDPE, PP, PET, PLA	LDPE, HDPE, PP, EVOH, PLA	LDPE, PP, PET	PLA, PHA, крохмаль, білкові полімери
Товщина плівки, мкм	20–200	10–150	20–100	15–50	20–50
Прозорість	Середня	Висока	Висока	Висока	Середня–висока
Механічна міцність	Висока	Середня–висока	Висока	Середня	Низька–середня

Кінець таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
Бар'єрні властивості	Середні	Середні–високі	Високі	Дуже високі	Середні
Енергоспоживання, кВт·год/кг	4,5–5,0	4,0–6,0	5,5–6,5	+1,0–1,5 до базової	5,5–6,5
Викиди CO ₂ , кг/кг	2,0–2,3	1,0–2,0	1,5–2,3	+0,5 до базової	0,8–1,5
Виробничі відходи	3–5 %	3–5 %	4–6 %	4–6 %	4–8 %
Біорозклад компостування	до 5 %	до 5 %	до 5 %	до 5 %	80–100 %
Термостійкість, °С	120–140	120–140	120–140	120–140	50–120
Можливість вторинної переробки	Висока	Висока	Обмежена	Обмежена	Низька (компостування)
Переваги	Багатопшаровість, еластичність, міцність	Висока прозорість, однорідність	Покращені бар'єрні та механічні властивості	Високі бар'єрні властивості, декоративність	Екологічна безпека, біорозклад, низький вуглецевий слід

За даними таблиці 3.2, традиційні технології (Blown Film, Cast Film) оптимальні для високої механічної міцності та термостійкості, але створюють довготривалі відходи і мають значний вуглецевий слід. Коекструзія та ламінація дозволяють оптимізувати бар'єрні та механічні властивості, проте

ускладнюють вторинну переробку. Металізація підвищує бар'єрні властивості, але збільшує екологічне навантаження. Біорозкладні та компостовані плівки мають мінімальний вплив на довкілля, проте обмежені в термостійкості та механічних характеристиках.

Порівняльний аналіз сучасних технологій виробництва харчових плівок свідчить, що кожна з них має специфічні технологічні, експлуатаційні та екологічні особливості, які визначають доцільність її застосування залежно від функціонального призначення пакування.

Екологічна оцінка технологій виробництва харчових плівок заснована на аналізі енергоспоживання, викидів парникових газів, утворення відходів, можливості вторинної переробки та впливу матеріалів на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу пакування [26-29].

Технологія екструзії з роздуванням характеризується значними енергетичними витратами, що зумовлено необхідністю підтримання стабільного температурного режиму та процесу роздування полімерної трубки. Середнє енергоспоживання становить 4,5–5,0 кВт·год/кг продукції, а викиди діоксиду вуглецю досягають 2,0–2,3 кг CO₂/кг при використанні традиційних полімерів. У процесі виробництва утворюється 3–8 % технологічних відходів, які, однак, можуть бути повернуті в процес рециклінгу. Екологічна ефективність цієї технології залишається обмеженою через низьку біорозкладність поліетиленових плівок.

Плоскощілинна екструзія характеризується дещо нижчими показниками викидів CO₂ у порівнянні з екструзією з роздуванням, що пов'язано з більш стабільним режимом охолодження плівки. Енергоспоживання коливається в межах 4,0–6,0 кВт·год/кг, а викиди CO₂ становлять 1,0–2,0 кг/кг. Відходи виробництва зазвичай не перевищують 3–5 %, що позитивно впливає на ресурсну ефективність процесу. Проте застосування традиційних полімерів обмежує екологічну безпеку таких плівок на етапі утилізації.

Коекструзія дозволяє оптимізувати функціональні властивості плівок і зменшити їх товщину, що сприяє зниженню загального споживання сировини.

Водночас ця технологія є більш енергоємною: 5,5–6,5 кВт·год/кг, а викиди CO₂ становлять 1,5–2,3 кг/кг. Основним екологічним недоліком багат шарових плівок є складність вторинної переробки, що призводить до накопичення відходів і збільшення навантаження на полігони або сміттєспалювальні установки.

Процес металізації істотно підвищує бар'єрні властивості плівки, але водночас негативно впливає на її екологічні характеристики. Додаткове енергоспоживання на стадії нанесення металевого шару становить +1,0–1,5 кВт·год/кг, що супроводжується зростанням викидів CO₂ близько на 0,3–0,5 кг/кг продукції. Наявність металевого шару ускладнює або повністю виключає механічну переробку плівки, що значно знижує її екологічну прийнятність.

Біорозкладні плівки, виготовлені з PLA, PHA та крохмальних полімерів, характеризуються найнижчим екологічним навантаженням на етапі утилізації. Викиди CO₂ під час виробництва становлять 0,8–1,5 кг/кг, а ступінь біорозкладності сягає 80–100 % протягом 90–180 діб за умов промислового компостування. Водночас енергоспоживання залишається відносно високим 5,5–6,5 кВт·год/кг, а екологічна ефективність значною мірою залежить від наявності інфраструктури для компостування.

Порівняльна оцінка екологічних характеристик технологій виробництва харчових плівок наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльна оцінка екологічних характеристик технологій виробництва харчових плівок

Технологія	Енергоспоживання, кВт·год/кг	Викиди CO ₂ , кг/кг	Відходи виробництва, %	Біорозклад, %
1	2	3	4	5
LDPE/HDPE Blown Film	4,5–5,0	2,0–2,3	3–5	<5

Кінець таблиці 3.3

1	2	3	4	5
Cast Film	4,0–6,0	1,0–2,0	3–5	<5
Коекструзія / ламінація	5,5–6,5	1,5–2,3	4–6	<5
Металізація	+1,0–1,5 кВт·год/кг	+0,5 кг CO ₂	4–6	<5
Біорозкладні (PLA, PHA)	6,0–6,5	1,2–1,5	4–6	90–100
Крохмальні компостовані	5,5–6,0	0,8–1,0	5–8	80–100

Порівняльний аналіз таблиці 3.3 показує, що традиційні технології виробництва харчових плівок мають вищий вуглецевий слід та обмежені можливості утилізації, тоді як біорозкладні та компостовані матеріали відповідають принципам сталого розвитку та зеленої хімії. Разом із тим, найбільш перспективним напрямом є оптимізація існуючих технологій шляхом зниження товщини плівок, використання моно-матеріалів і впровадження частково біорозкладних компонентів, що дозволяє зменшити екологічне навантаження без втрати експлуатаційних характеристик.

3.2 Розрахунок показників впливу на довкілля (викиди CO₂, енергоспоживання, водоспоживання)

Проведемо розрахунок екологічних показників для зразків біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю 25 г, оцтової кислоти 15 г, гліцерину 15 г та води – до 100 г. Під час висушування випаровується до 45 г води, суха маса готової плівки складає 55 г.

Розрахунки, виконані на основі узагальнених даних LCA для біополімерів і їхніх компонентів [26, 27].

Питомі екологічні показники компонентів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Питомі екологічні показники компонентів

Компонент	CO ₂ -викиди, кг CO ₂ /кг	Енергоспоживання, МДж/кг	Водоспоживання, л/кг
Крохмаль	0,2–0,3	8–12	5–20
Оцтова кислота	1,5–2,0	25–30	20–30
Гліцерин	0,4–0,6	10–15	5–10
Вода	0	0	0,1

Для розрахунків використовуємо середні значення.

Розрахунок викидів CO₂ (на 55 г готової плівки).

Крохмаль: 25 г = 0,025 кг.

$$\text{Викиди: } 0,025 \cdot 0,25 = 0,00625 \text{ кг CO}_2.$$

Оцтова кислота: 15 г = 0,015 кг.

$$0,015 \cdot 1,75 = 0,02625 \text{ кг CO}_2.$$

Гліцерин 15 г = 0,015 кг.

$$0,015 \cdot 0,50 = 0,0075 \text{ кг CO}_2.$$

Вода – 0.

Загальні викиди CO₂ для 55 г плівки:

$$0,00625 + 0,02625 + 0,0075 = 0,04 \text{ кг CO}_2$$

або 40 г CO₂ на 55 г харчової плівки, що відповідає 0,73 кг CO₂ на 1 кг плівки.

Проводимо розрахунок енергоспоживання.

Крохмаль

$$0,025 \cdot 10 = 0,25 \text{ МДж.}$$

Оцтова кислота

$$0,015 \cdot 27,5 = 0,41 \text{ МДж.}$$

Гліцерин

$$0,015 \cdot 12,5 = 0,19 \text{ МДж}$$

Нагрівання та висушування води (технологічні витрати). Випаровування 45 г води:

$$0,045 \text{ кг} \cdot 2,26 \text{ МДж/кг} = 0,102 \text{ МДж}$$

Загальне енергоспоживання:

$$0,25 + 0,41 + 0,19 + 0,102 = 0,952 \text{ МДж.}$$

Тобто, на виробництво 55 г плівки витрачають близько 1 МДж енергії, що відповідає 18 МДж на 1 кг плівки.

Розрахунок водоспоживання.

Крохмаль:

$$0,025 \cdot 12,5 = 0,31 \text{ л.}$$

Оцтова кислота

$$0,015 \cdot 25 = 0,375 \text{ л.}$$

Гліцерин

$$0,015 \cdot 7,5 = 0,112 \text{ л.}$$

Виробниче водоспоживання на миття обладнання 0,1 – 0,2 л. Загальне водоспоживання:

$$0,31 + 0,375 + 0,112 + 0,15 = 0,95 \text{ л}$$

Таким чином, для виробництва 55 г плівки витрачають близько 1 л води, що відповідає 18 л води на 1 кг плівки.

Узагальнена екологічна оцінка життєвого циклу біорозкладної плівки на основі крохмалю показує, що даний матеріал має суттєві переваги з точки зору сталого розвитку та екологічної безпеки на всіх основних етапах життєвого циклу – від отримання сировини до утилізації.

На етапі видобутку та підготовки сировини використання крохмалю як основного плівкоутворювача забезпечує залучення відновлюваних біоресурсів з відносно низьким вуглецевим слідом. Виробництво крохмалю супроводжується викидами CO₂ у межах 0,4 кг CO₂/кг, що є істотно нижчим показником порівняно з нафтохімічною сировиною для поліетиленових плівок. Оцтова кислота та гліцерин також характеризуються помірним

екологічним навантаженням і не належать до токсичних або стійких забруднювачів довкілля.

На стадії виробництва плівки екологічне навантаження визначається переважно енергоспоживанням процесів желатинізації, сушіння та формування плівки. Сумарні викиди CO₂ на цьому етапі становлять близько 0,8–1,2 кг CO₂/кг готової плівки, що є на 40–60 % нижчим, ніж для традиційних поліетиленових плівок. Важливою перевагою є відсутність токсичних побічних продуктів і можливість повторного використання технологічних відходів у процесі виробництва.

На етапі експлуатації біорозкладна крохмальна плівка є безпечною для контакту з харчовими продуктами, не виділяє шкідливих міграційних компонентів і не накопичує небезпечні речовини. Обмеженням є підвищена чутливість матеріалу до вологи, що зумовлює доцільність його використання для пакування продуктів з низькими та середніми бар'єрними вимогами.

Складаємо узагальнену екологічну оцінку життєвого циклу біорозкладної плівки на основі крохмалю (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Узагальнена екологічна оцінка життєвого циклу біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю

Етап	Вплив
Виробництво сировини	Низький для крохмалю, вищий для оцтової кислоти
Виробництво плівки	Низькі енерговитрати, випаровування води
Експлуатація	Нетоксична, безпечна
Кінець життєвого циклу	Біорозкладання повне, відходи відсутні

Найбільш вагомими екологічними перевагами виявляються на стадії утилізації та завершення життєвого циклу. Біорозкладна плівка на основі крохмалю здатна до 80–100 % біорозкладання протягом 90–180 діб у ґрунті або умовах

промислового компостування. У процесі деградації матеріал не утворює мікропластику та не призводить до довготривалого накопичення відходів у навколишньому середовищі, що принципово відрізняє його від синтетичних полімерів.

В результаті проведених розрахунків визначено, що зразки біорозкладної плівки на основі крохмалю має дуже низький вуглецевий слід 40 г CO₂ на 55 г харчової плівки. Енергоспоживання – в 6–10 разів нижче, ніж у традиційного поліетилену. Водоспоживання становить 1 л на порцію матеріалу. Плівка повністю біорозкладна та компостована. Вторинна переробка можлива, але обмежена через термопластичну деградацію.

У цілому результати LCA свідчать, що біорозкладна плівка на основі крохмалю характеризується нижчим сумарним екологічним впливом, зменшеним вуглецевим слідом, високою відповідністю принципам зеленої хімії, зокрема використанню відновлюваної сировини, зниженню токсичності та забезпеченню безпечної утилізації. Водночас подальше підвищення екологічної ефективності можливе за рахунок оптимізації енергоспоживання виробничих процесів і розвитку інфраструктури компостування.

3.3 Порівняльний аналіз традиційної та екологічної технології виробництва харчової плівки

Сучасне пакування харчових продуктів ґрунтується переважно на використанні синтетичних полімерних плівок, зокрема поліетилену та поліпропілену. Водночас посилення екологічних вимог і принципів сталого розвитку зумовлює зростання інтересу до екологічних технологій виробництва біорозкладних плівок [4, 12, 21]. Порівняльний аналіз цих двох підходів дозволяє оцінити їхні технологічні та екологічні переваги й обмеження.

Традиційна технологія виробництва харчових плівок базується на нафтохімічній сировині, яка є невідновлюваним ресурсом і характеризується

високим вуглецевим слідом на етапі видобутку та переробки. Навпаки, екологічна технологія використовує відновлювані біополімери, зокрема крохмаль, що отримують з рослинної сировини. Це зменшує залежність від викопних ресурсів, сприяє зниженню загального екологічного навантаження.

Виробництво традиційних полімерних харчових плівок здійснюють методом екструзії з роздуванням або плоскощільної екструзії за високих температур 160–220 °С, що супроводжує значне енергоспоживання на рівні 4,5–5,5 кВт·год/кг. Екологічна технологія виробництва крохмальних плівок передбачає процеси желатинізації та сушіння за нижчих температур 80 – 100 °С, однак загальне енергоспоживання залишається порівняним 5,5 – 6,5 кВт·год/кг через тривалість сушіння.

Традиційні полімерні плівки характеризуються викидами діоксиду вуглецю на рівні 2,0–2,3 кг CO₂/кг продукції. Для біорозкладної крохмальної плівки цей показник є суттєво нижчим і становить 0,8–1,2 кг CO₂/кг, що пояснюють біогенним походженням сировини та відсутністю енергоємних стадій полімерізації.

Поліетиленові плівки мають високі показники механічної міцності, термостійкості та вологостійкості, що забезпечує їх широке застосування для різних видів харчових продуктів. Крохмальні біоплівки поступаються за цими параметрами, зокрема мають підвищену гідрофільність і нижчу термостійкість, що обмежує сферу їх використання продуктами з низькими та середніми бар'єрними вимогами.

Ключова відмінність між технологіями проявляється на етапі утилізації. Традиційні плівки практично не біорозкладні та накопичуються в навколишньому середовищі, утворюючи довготривалі пластикові відходи. Екологічна технологія забезпечує 80–100 % біорозкладання крохмальної плівки протягом 90–180 діб, без утворення мікропластику та токсичних залишків.

Екологічна технологія виробництва біорозкладної плівки значною мірою відповідає принципам зеленої хімії, зокрема використанню

відновлюваної сировини, мінімізації токсичних речовин і забезпеченню безпечної утилізації матеріалів. Традиційні технології мають обмежену відповідність цим принципам через залежність від викопної сировини та проблеми з відходами.

В процесі проведення експериментів зі складання рецептури дослідних зразків і вивчення їх властивостей використано традиційну технологію отримання біоплівки в лабораторних умовах. Операції з приготування сумішей та виготовлення плівок проводили вручну, з застосуванням простих інструментів, пристосувань, з мінімумом обладнання.

Порівняльний аналіз традиційної та екологічної технології виробництва біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняльний аналіз традиційної та екологічної технології виробництва біорозкладної харчової плівки

Етап	Традиційна технологія	Екологічна технологія
1	2	3
Підготовка сировини	Суміш нагрівають у металевій ванні на плиті	Нагрів у реакторі з контролем температури та мішалкою, енергоощадний підігрів
Гомогенізація	Ручне перемішування або проста мішалка	Гомогенізатор низьких обертів, контроль в'язкості
Клейстеризація крохмалю	Нагрівання до 60–80°C без контролю параметрів	Нагрівання у контрольованих режимах 75–85°C
Видалення повітря з маси	Не проводять	Вакуумування або відстоювання для видалення бульбашок
Формування плівки	Ручне наливання на форму	Ливарна рамка або валкове формування

Кінець таблиці 3.6

1	2	3
Сушіння	Природне або в сушильній шафі	Інфрачервона або конвективна сушка з контролем вологості
Вихідна якість	Нерівномірною товщиною, можливі бульбашки, слабка міцність	Рівномірною товщиною, висока еластичність, менша крихкість

Для виробництва біорозкладних харчових плівок на основі крохмалю в промислових масштабах доцільна екологічна технологія із застосуванням виробничого обладнання, з дотриманням температурного режиму та показників вологості.

Порівняння властивостей харчової плівки на основі крохмалю, отриманої за допомогою різних технологій, наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Порівняння властивостей харчової плівки на основі крохмалю отриманої за допомогою різних технологій

Показник	Традиційна технологія	Екологічна технологія
1	2	3
Структура	Нерівномірною, з мікропорами	Гладка, однорідна
Товщина	Варіації $\pm 0,2$ мм	Контрольована $\pm 0,05$ мм
Прозорість	Низька, мутнувата	Краща прозорість
Міцність на розрив	1,5–2 рази нижча	У 2–3 рази вища завдяки кращій гомогенізації
Еластичність	Помірна	Висока завдяки точному дозуванню пластифікатора
Стійкість до вологи	Низька, набухає	Середня, можливе покриття воском

Кінець таблиці 3.7

1	2	3
Біорозкладання	За 30–45 днів	За 20–30 днів, за рахунок рівномірної структури
Екологічний слід	Немає контролю викидів	Мінімум відходів, менші енерговитрати
Собівартість	Низька	Дещо вища, але якість значно краща

Модернізована екологічна технологія виробництва харчової плівки дозволяє отримати біоплівки, які мають екологічні переваги перед плівками, виробленими за традиційною технологією. Через використання інфрачервоних або теплових насосів для сушіння, підтримку оптимальної температури без перегріву досягають зменшення енергоспоживання.

Дотримання оптимального температурного режиму запобігає обуглюванню крохмалю. Чітке дозування мінімізує надлишкову кількість гліцерину. Це дозволяє знизити кількість відходів.

Крім того, екологічна технологія передбачає зменшення кількості хімічних домішок. В рецептурі крохмалю відсутні пластифікатори ПВХ та синтетичні добавки. Плівка повністю компостується, що свідчить про високі можливості утилізації. Плівка піддається біорозкладу у природних умовах під дією вологи, мікроорганізмів та ультрафіолету. Термін повного розкладання традиційної біоплівки від 1 до 1,5 місяця, а модернізованої – від 20 до 30 днів. В процесі розкладання утворюються вода, вуглекислий газ та сліди органічних кислот, безпечні для ґрунтів [32].

Особливості органічного складу біоплівок на основі крохмалю дозволяють компостувати плівку разом із харчовими відходами. Найкращі умови для компостування: температура 45–60°C, вологість 50–60 %, використання аерації прискорюють компостування, в результаті якого утворюється органічне добриво.

Вторинна переробка харчової плівки на основі крохмалю можлива кількома способами:

- перетоплення та заливання повторно. У нагрітому стані харчова плівка знову переходить у термопластичний стан і може бути повторно сформована;

- подрібнення на гранулят, перемішування з новою масою та відлиття повторно. До 20–40% вторинної сировини використовують без погіршення характеристик;

- розчинення у воді – гліцериново-крохмальна плівка повністю розчинна у гарячій воді. Може бути утилізована без утворення твердих відходів.

Таким чином, традиційна технологія проста та дешева, але вироби мають нерівномірну якість, більший час висушування, нижчу міцність та більше відходів.

Модернізована екологічна технологія забезпечує контроль процесу, дозволяє отримати вищу міцність та еластичність, рівномірну товщину харчової плівки, очищену структуру. Біорозклад харчової плівки, виготовленої за екологічною технологією, відбувається швидше, є можливість вторинної переробки.

До недоліків екологічної технології відносять вищу вартість обладнання. Загалом екологічна технологія має значно кращі екологічні показники та властивості готової плівки.

Порівняльний аналіз таблиці 3.6, 3.7 показує, що традиційна технологія виробництва харчових плівок забезпечує кращі експлуатаційні характеристики, проте супроводжується значним екологічним навантаженням. Екологічна технологія на основі крохмалю є екологічно доцільною альтернативою для короткострокового пакування харчових продуктів і відповідає сучасним вимогам сталого розвитку, хоча потребує подальшої оптимізації з метою підвищення механічної міцності та вологостійкості.

3.4 Оптимізація використання біорозкладних та компостованих полімерів в технологіях виробництва харчової плівки

Обрана рецептура біополімерної харчової плівки передбачає використанні екологічно безпечних інгредієнтів рослинного та тваринного походження. Комплексний аналіз експериментальних зразків дозволив виявити критичні переваги та функціональні недоліки отриманого матеріалу. З метою підвищення експлуатаційних характеристик харчової плівки на основі крохмалю доцільною є оптимізація компонентного складу шляхом створення біополімерних сумішей. Зокрема, рекомендовано модифікацію матриці крохмалю додаванням полілактиду (PLA) у співвідношенні 70:30. Така комбінація дозволяє суттєво покращити механічну міцність та вологостійкість харчової плівки, зберігаючи при цьому його здатність до повної біодеградації та компостування.

Оптимізація пластифікатора передбачає використання гліцерину у мінімально необхідній кількості 12–15 г. За потреби можливе додавання невеликої частки PEG для покращення сумісності з PLA.

Для підвищення жорсткості й зменшення товщини харчової плівки рекомендовано додавати наповнювачі. Наприклад, 5–15 % целюлозних наночастинок або мікрофібри.

Для покращення водостійкості (але необхідно тестувати на міграцію речовин) застосовують реактивне зміцнення з використанням безпечних біологічних домішок. Наприклад, лимонна, цитратна сіль або слабкі поліфункціональні кислоти.

Для зниження вологопроникненості зразки покривають тонким шаром біополімерного захисту, наприклад, РНА. При цьому загальну кількість синтетичних компонентів зменшують у порівнянні з повністю поліетиленовим покриттям.

Додавання полімолочної кислоти PLA, яка є біорозкладним полієфіром, підвищує міцність на розрив, зменшує водопоглинання, покращує

термостійкість. Композиції біополімер/PLA дозволяють уникнути застосування звичайних синтетичних полімерів.

Включення полігидроксіалканоатів PHA, які є найбільш екологічними біополімерами не потребує додаткових стабілізаторів та повністю компостуються. Композиції біополімер/PHA значно підвищують екологічність харчової плівки.

Додавання композитів на основі відходів біомаси – біорозкладних мікронаповнювачів – рисове лушпиння, кукурудзяне борошно, волокна кокосу, деревне борошно – дозволяє зменшити частку синтетичних матеріалів до 0 %, забезпечити повне компостування протягом 6–12 місяців.

На основі проведених досліджень, рекомендовано основні етапи оптимізації технологій виробництва харчової плівки:

- проведення LCA, визначення цільових показників зменшення синтетичних речовин;
- розробка 2–3 рецептур (часткова заміна, гібридна структура, повна заміна), виконання лабораторних досліджень;
- оптимізація рецептури з урахуванням пластифікаторів, наповнювачів та домішок;
- проектування пілотного виробництва, випробування властивостей і стандартні тести компостування;
- налагодження маркування, логістики, утилізації та компостування.

Природні полісахариди, особливо термопластичні крохмалі в даний час розглядають як найбільш релевантні альтернативи полімерам нафтохімічного походження [18, 33]. Проте, попри біогенну природу сировини, життєвий цикл термопластичного крохмалю супроводжують певні екологічні навантаження, зумовлені інтенсивним споживанням енергоресурсів, води та емісіями, що виникають на стадіях термопластичної переробки та кінцевої деградації.

Мінімізація техногенного впливу потребує інтегрованого підходу – від технологічної оптимізації параметрів виробництва – до впровадження систем

екологічного менеджменту, що забезпечують безперервний моніторинг і контроль ресурсних потоків.

Основні екологічні проблеми, пов'язані з використанням термопластичного крохмалю в технологіях виробництва харчової плівки [26, 28] наступні:

- енергоспоживання під час нагріву та пластифікації крохмалю;
- викиди CO₂, пов'язані з отриманням сировини (сільськогосподарське виробництво), роботою обладнання (екструдерів, сушарок);
- водоспоживання на етапах гідратації крохмалю та санітарної обробки обладнання;
- утворення летких органічних компонентів, пов'язаних із розкладанням пластифікаторів при нагріванні;
- низька довговічність термопластичних крохмалів, що може призводити до збільшення кількості відходів.

Для зменшення екологічного навантаження рекомендовано низку заходів:

Оптимізація рецептури біополімерної харчової плівки за рахунок зменшення вмісту гліцерину з 15 г до 10–12 г, що дозволить знизити енергію денатурації крохмалю та час екструзії. Також можливе використання замінників пластифікаторів сорбіту, поліетиленгліколю, які екологічно стабільніші або лимонної кислоти замість частини оцтової.

Зниження енергоспоживання при переробці шляхом зниження робочої температури екструзії з 140–160°C до 120–135°C за рахунок збільшення дисперсії крохмалю та його попереднього желатинування. З метою рівномірної теплової передачі необхідне попереднє змішування пластифікаторів у теплому стані, в результаті чого будуть менші втрати енергії. Застосування повторного використання тепла (рекуперації) від зони охолодження термопластичного крохмалю також знизить енергоспоживання.

Для зменшення водоспоживання необхідно застосовувати замкнуті цикли промивання обладнання, а також утилізацію технологічної води у вигляді допоміжного реагенту для наступних партій.

Скорочення викидів CO₂ можливе з переходом на зелені джерела електроенергії (біогаз, сонячна або гідроенергія). Зменшення дефектів та браку сприяє зменшенню повторних екструзій, як наслідок, менше CO₂. Також зниженню викидів сприятиме удосконалення біорозкладу готового матеріалу шляхом введення природних ферментних каталізаторів – амілази.

З метою удосконалення технологічного процесу виробництва харчової плівки на основі крохмалю для зниження енергоспоживання застосовують технічні покращення виробництва (таблиця 3.8).

Таблиця 3.8 – Енергоефективність удосконалення технології виробництва харчової плівки

Етап	Традиційна технологія	Удосконалена екологічна технологія
Змішування	Звичайні змішувачі	Високоєфективні гомогенізатори
Нагрівання	Електронагрів без теплової ізоляції	Ізольовані циліндри, рекуперація
Екструзія	Температура 150–160°C	Зниження до 120–135°C
Сушка	Конвективна	Інфрачервона або теплові насоси
Охолодження	Повітряне	Контурне охолодження з повторним використанням тепла

Запропоновані технологічні заходи покращення виробництва харчової плівки на основі крохмалю дозволяють досягти економії енергії на 30 %.

3.5 Пропозиції щодо зменшення екологічного навантаження від технологічного процесу виробництва харчової плівки

Пропозиції щодо впровадження системи екологічного менеджменту (СЕМ) відповідно до ISO 14001:2015. Основні етапи впровадження:

- екологічний аудит виробництва харчової плівки на основі крохмалю передбачає ідентифікація джерел викидів, споживання енергії та води;
- оцінка екологічних аспектів;
- постановка вимірюваних екологічних цілей (наприклад 15 % електроенергії на 1 кг біополімеру; 20 % водоспоживання; 10 % CO₂ емісій);
- розроблення екологічних процедур та інструкцій;
- навчання персоналу (ощадне виробництво, сортування відходів);
- моніторинг екологічних показників;
- щорічний перегляд політики та коригування цілей.

Для забезпечення функціонування системи екологічного менеджменту пропонувано застосовувати сенсори CO₂ та температури в зонах екструзії, лічильники води з погодинним моніторингом. Необхідно проводити енергоаудит двигунів раз на 12 місяців, бажано використання зелених мастил та мийних засобів.

Соціально-економічні переваги впровадження СЕМ забезпечують:

- підвищення конкурентоспроможності продукції;
- доступ до зелених грантів і програм фінансування;
- зниження споживання ресурсів, економія 10–30 %;
- покращення іміджу підприємства.

Впровадження системи екологічного менеджменту, модернізація обладнання та оптимізація рецептури дозволяють знизити екологічний вплив виробництва біоплівки на 20–40 % за ключовими показниками (CO₂, вода, енергія). Це робить технологію виробництва харчової плівки на основі

термопластичного крохмалю більш конкурентною, економічною та екологічно безпечною.

Ефективність оптимізації технології, компонентів рецептури, матеріалів надає ряд переваг. Доведено, що перехід від традиційних синтетичних полімерів до інноваційних біокомпозитів забезпечує суттєвий екологічний ефект, зокрема зниження вуглецевого сліду виробництва харчової плівки на 20 – 60 відсотків. Оптимізація рецептури шляхом збільшення частки біорозкладних компонентів дозволяє інтенсифікувати процеси деструкції, скорочуючи період повної утилізації матеріалу з 5 років до 6–12 місяців. Крім того, високий рівень компостованості розроблених зразків гарантує їх повну мінералізацію, що практично нівелює ризик утворення вторинного мікропластику в екосистемах [27].

Технологічна ефективність запропонованих рішень базується на оптимізації температурно-часових режимів переробки. Встановлено, що зниження енергоємності стадій сушіння та екструзії забезпечує економію енергоресурсів у межах 10 – 25 відсотків. Покращення міжфазної сумісності компонентів системи сприяє формуванню гомогенної структури полімерної матриці, що мінімізує ризик виникнення структурних дефектів (мікротріщин, неоднорідностей). Важливим результатом є підвищення стабільності фізико-механічних властивостей термопластичного крохмалю під час тривалого зберігання, що нівелює проблему ретроградації амілози

Соціально-економічний ефект полягає у підвищенні іміджу підприємства як зеленого виробника. Зростає конкурентоспроможність на ринку біоматеріалів. Це відповідність міжнародним стандартам ESG:

- Environmental (E) скорочення відходів, зниження викидів CO₂, використання відновлюваної сировини;
- Social (S) безпечна продукція, зниження ризиків забруднення мікропластиком;
- Governance (G) впровадження систем екологічного менеджменту ISO 14001.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження екологічних аспектів технології виробництва харчової плівки на основі біополімерів з урахуванням сучасних вимог екологічної безпеки та принципів сталого розвитку. Проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку ринку пакувальних матеріалів, що дозволило встановити зростаючий попит на біорозкладні харчові плівки як альтернативу традиційним полімерним матеріалам. Обґрунтовано доцільність використання біополімерів, зокрема крохмалю як відновлюваної та екологічно безпечної сировини для виробництва харчової плівки.

Проаналізовані Міжнародні стандарти та регулювання у сфері екологічності пакування, а також тенденції розвитку екологічно безпечних пакувальних матеріалів. Досліджено стан сучасних технологій отримання екологічних біо- і фоторозкладних харчових плівок, які несуть менше екологічне навантаження на довкілля. Розглянуто методи та методики дослідження, аналіз життєвого циклу продукції LCA, оцінка викидів, енергоспоживання, утворення відходів. Запропоновано рецептуру біорозкладної харчової плівки на основі крохмалю.

Досліджено технологічну схему виробництва харчової плівки з крохмалю та ідентифіковано основні джерела екологічного впливу на довкілля, серед яких визначальними є споживання водних і енергетичних ресурсів, утворення стічних вод з підвищеним органічним навантаженням, а також викиди парникових газів, пов'язані з використанням енергоносіїв.

Проведено оцінку життєвого циклу LCA харчової плівки за підходом cradle-to-gate, що дозволило кількісно оцінити екологічні впливи виробництва. Встановлено, що найбільший внесок у загальний показник глобального потепління та сукупні енерговитрати формують етапи отримання агросировини та сушіння плівки.

На основі результатів LCA визначено екологічні hotspot технології та обґрунтовано напрями її екологічної оптимізації. Показано, що зниження енерговитрат за рахунок використання енергоефективного обладнання та оптимізації режимів сушіння може суттєво зменшити викиди CO₂, тоді як раціоналізація водокористування сприятиме зменшенню навантаження на водні ресурси.

Проведено порівняльний аналіз екологічних показників харчової плівки з біополімерів та традиційної технології, який засвідчив переваги біорозкладної продукції за показниками споживання викопної енергії та впливу на зміну клімату, за умови належного управління агросировинним етапом.

Обґрунтовано доцільність впровадження системи екологічного менеджменту відповідно до вимог ISO 14001 для підприємств з виробництва харчової плівки. Показано, що інтеграція результатів LCA в СЕМ дозволяє підвищити результативність екологічного управління, забезпечити системний контроль екологічних аспектів та сприяти постійному екологічному поліпшенню.

Отримані результати дослідження кваліфікаційної роботи мають наукову новизну та практичне значення відповідно принципам сталого розвитку та зеленої хімії.

Запропоновані у роботі організаційні та технічні заходи з мінімізації негативного впливу на довкілля можуть бути використані на практиці при проєктуванні, модернізації, експлуатації виробництв харчової плівки, а також бути основою для подальших наукових досліджень у сфері екологізації технологій виробництва харчової плівки.

Отримані результати підтверджують, що технологія виробництва харчової плівки на основі біополімерів за умови екологічної оптимізації та впровадження сучасних методів екологічного менеджменту є перспективною та відповідає вимогам сталого розвитку і екологічної безпеки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Віленський В. О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навчальний посібник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. – 348 с.
2. Alias A. R. Emerging materials and technologies of multi-layer film for food packaging application: A review // A. R. Alias, M. Khairul Wan, N.M. Sarbon // Food Control, Vol. 136. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108875>
3. Авраменко В. Л., Підгорна Л. П., Черкашина Г. М., Близнюк О. В. Технологія виробництва та переробки полімерів медико-біологічного призначення : навч. посіб. – Харків : Видавництво та друкарня «Технологічний центр», 2018. – 356 с.
4. Промислові полімери та Основи технології виробництва полімерних матеріалів : навчальний посібник до дисципліни та практикумів для студентів хімічного факультету / упорядн. І. О. Савченко, В. Г. Сиромятніков. – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2012. – 112 с.
5. Дейниченко Г. В., Горелков Д. В., Дмитрівський Д. В. Пакувальні матеріали та обладнання в харчовій індустрії : навч. посіб. – Харків : ХДУХТ, 2017. – 130 с.
6. Дишкантюк О. В., Андріянова А. І. Використання полімерних комбінованих плівок у технології sous-vide // Харчова наука і технологія. – 2017. – Т. 11, № 1. – С. 70–75.
7. Іщенко О. В., Соколовський В. А., Мельниченко А. Л. Екологічне пакування : сучасні тенденції розвитку // Вісник КНУТД. – 2018. – № 2. – С. 45–52.
8. Life Cycle Assessment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/> (дата звернення: 15.10.2025).
9. Колосов О. Є. Технологія зберігання харчової продукції: неупакованої та упакованої із застосуванням полімерних плівкових матеріалів : навч. посіб./ О. Є. Колосов. – Київ : ВПК «Політехніка», 2015. – 179 с.

10. Panda P. K., Sadeghi K., Seo J. Recent advances in poly(vinyl alcohol)/natural-polymer based films for food packaging applications: a review // Food Packaging and Shelf Life. – 2022. – Vol. 33. – Art. 100904.

11. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 293 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (дата звернення: 08.10.2025).

12. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей : навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 312 с.

13. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості) : термінол. слов. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 208 с.

14. Михайлюк О. Г., Савчук Т. Ю. Дослідження бар'єрних властивостей полімерних плівок для вакуумного пакування // Продовольчі технології. – 2019. – № 3. – С. 22–29.

15. Петренко С. В. Використання біополімерів у пакувальних технологіях харчових продуктів // Науковий вісник НУХТ. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 87–94.

16. Речицький О. Н., Решнова С. Ф. Хімія високомолекулярних сполук в схемах : навч. посіб. – Херсон : ХДУ, 2018. – 464 с.

17. Укрпластик [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://plastshop.com.ua/ua/> (дата звернення: 15.10.2025).

18. Суберляк О. В., Баштанник П. І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підручник. – Львів : Растр, 2015. – 456 с.

19. Про міжнародні стандарти та системи екологічного менеджменту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/promizhnarodni-standarty-ta-systemy-ekologichnogo-menedzhmentu/> (дата звернення: 15.10.2025).

20. Шендерівська Л. П., Давиденко О. М. Інноваційні полімерні матеріали для екологічної упаковки // Харчова наука і технологія. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 60–67.

21. Гавриленко О., Плішивий Є. Сучасні аспекти переходу до використання біорозкладних пакувальних матеріалів. Економічний простір. 2023. № 183. С. 128–133.

22. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П., Васишин Л. В. Вплив факторів старіння на властивості поліетиленових плівок пакувального призначення. Вісник ЛТЕУ. Технічні науки. – 2020. – № 24. – С. 5–13.

23. 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.

24. Малишевська О. С. Досвід і перспективи вирішення проблеми поводження з полімерною упаковкою у світі та Україні. Біологія, біотехнологія, екологія. 2018. № 5 (75). – С. 8-12.

25. Михайлова Є. О., Дейнека Д. М., Панчева Г. М. Аналіз методів перероблення пластикових відходів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Нові рішення у сучасних технологіях. 2021. № 1 (7). С. 80–89.

26. Директива Європейського Парламенту і Ради 94/62/ЄС від 20 грудня 1994 року про пакування та відходи пакування. OBL 365 31.12.1994, р. 10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text (дата звернення: 09.10.2025).

27. Офіс сталих рішень. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/yak-porahuvaty-vykydy-scope-1-scope-2-scope-3-za-ghg-protocol/> (дата звернення: 14.10.2025).

28. Оцінка відповідності підприємств критеріям ESG (Environmental, Social, Governance). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://economyandsociety.in.ua>download](https://economyandsociety.in.ua/download) (дата звернення: 15.10.2025).

29. European Commission. Guidelines on Plastic Food Contact Materials. – Brussels : EC Publications, 2021. – 85 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://food.ec.europa.eu/> (дата звернення: 14.10.2025).

30. Chunming Liu, Susil Baral, Kai Gu. Real-Time Single-Polymer Growth towards Single-Monomer Resolution // Trends in Chemistry. – 2021. – P. 1–14.

31. Thakur S., Martínez-Alonso C., Lopez-Hernandez E. Melt and solution processable novel photoluminescent polymer blends for multifaceted advanced applications // Polymer. – 2021. – № 215. – P. 45–52.

32. Dirpan A., Sothornvit R., Zainuddin N., et al. A review on biopolymer-based biodegradable film for food packaging: trends over the last decade and future research // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 13. – Article 2781.

33. Baghi F., Gharsallaoui A., Dumas E., Ghnimi S. Advancements in biodegradable active films for food packaging: effects of nano/microcapsule incorporation // Foods. – 2022. – 11(5):760.