

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-158-163](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-158-163)

УДК 678.023

Анатолій Юрійович Абаєв¹, Микола Петрович Швед²¹студент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: abayev@uk.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>²кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: npchved46@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРИ ДЛЯ СТІЙКОГО МАЙБУТНЬОГО: ЕКСТРУЗІЯ БІО- ТА ФОТОДЕСТРУКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

У роботі розглянуто проблему забруднення навколишнього середовища полімерними відходами та перспективи використання біо- та фотодеструктивних полімерів (PLA, PHA, PBAT) для виготовлення плівок. Описано особливості екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, зазначено оптимальні температурні та швидкісні параметри процесу. Розкрито роль добавок у формуванні властивостей плівок. Визначено значення міжнародних стандартів для оцінки біорозкладності. Зроблено висновок про важливість впровадження інноваційних полімерів у пакувальну промисловість задля екологічної стійкості.

Ключові слова: біополімери; екструзія; PLA; PHA; PBAT; біорозкладність; пакувальні плівки; фоторозклад.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі проблема забруднення навколишнього середовища полімерними відходами набуває дедалі більшої гостроти. Традиційні полімери, такі як поліетилен (PE) та поліпропілен (PP), розкладаються у природних умовах сотні років, що створює значне навантаження на екологію. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розробка та використання біорозкладних полімерних матеріалів, зокрема полілактиду (PLA), полігідроксіалканоатів (PHA) та полібутиленадипат-терефталату (PBAT). Ці матеріали здатні розкладатися під впливом природних факторів, таких як волога, кисень, ультрафіолетове випромінювання та діяльність мікроорганізмів [1-2]. Водночас вони демонструють механічні властивості, які дозволяють використовувати їх для виробництва плівкових матеріалів, що можуть стати екологічною альтернативою традиційним пластикам [3].

Постановка проблеми. Значний науковий і промисловий інтерес викликає питання розробки ефективної технології виготовлення біорозкладних плівок. Метод екструзії з роздуванням є одним із найбільш поширених і економічно вигідних процесів у виробництві полімерних пакувальних матеріалів. У цьому дослідженні розглядається можливість використання PLA, PHA та PBAT для отримання біо- та фоторозкладних полімерних плівок методом екструзії на каскадному дисково-шестеренному екструдері.

PLA, PHA та PBAT мають різні характеристики, що визначають їхнє застосування в пакувальній індустрії. PLA зазвичай використовують для виготовлення легких плівок і упаковок, проте його термостійкість обмежена. PHA і PBAT, у свою чергу, мають кращі механічні властивості при низьких температурах, що робить їх більш ефективними для виготовлення плівок, які повинні витримувати більші навантаження. У порівнянні з традиційними полімерними матеріалами, PLA, PHA та PBAT демонструють значні переваги з погляду біорозкладу та екологічної безпеки. Їхнє широке застосування в майбутньому дозволить знизити забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами, що є критично важливою проблемою для сучасного суспільства. На рис. 1 наведено графік порівняння механічних, термічних і біорозкладних властивостей PLA, PHA та PBAT.

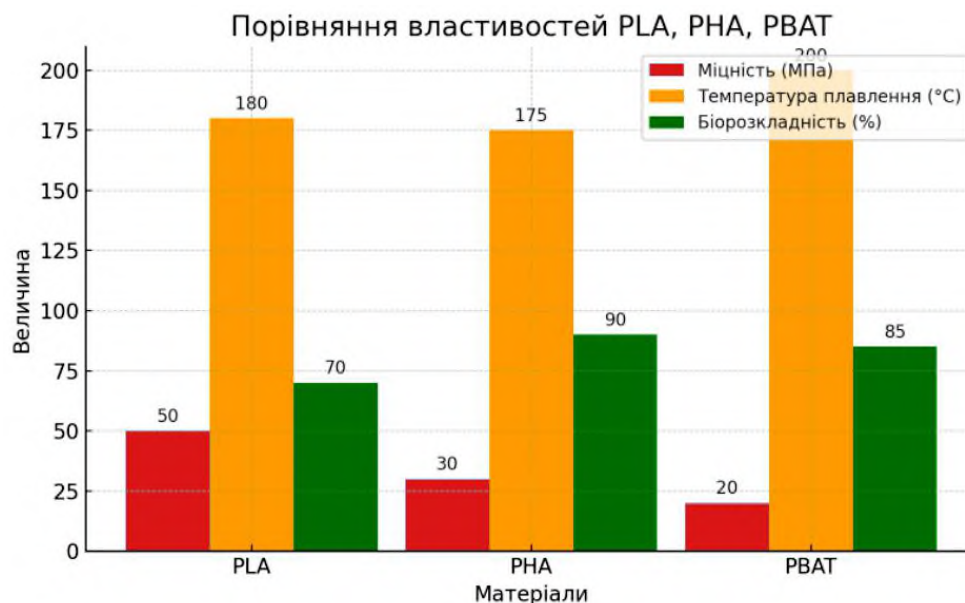


Рис. 1. Порівняння властивостей PLA, PHA та PBAT

Для підтвердження екологічної безпеки біополімерів важливо звернути увагу на міжнародні стандарти, які регулюють використання біорозкладних матеріалів [4]. Одним із таких стандартів є ISO 14851, який визначає методи тестування біорозкладу матеріалів у морській воді. Цей стандарт є важливим для оцінки здатності біополімерів, таких як PLA, PHA та PBAT, до розкладу в природних умовах, зокрема в морському середовищі. Такі тестування допомагають встановити, наскільки швидко та безпечно ці матеріали можуть розкладатися, зменшуючи загрози для навколишнього середовища. Відповідність цим стандартам є важливим кроком до забезпечення довіри споживачів та промислових виробників до біорозкладних полімерів, а також до їхнього впровадження на масовому рівні в різних сферах, включаючи пакувальну промисловість.

Виділення недосліджених частин проблеми. Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері біорозкладних полімерів (PLA, PHA, PBAT), залишаються недостатньо вивченими ключові аспекти їх промислового застосування. Зокрема, недостатньо досліджено: оптимальну взаємодію полімерних матриць із добавками (пластифікаторами, стабілізаторами) при високошвидкісній екструзії, що впливає на стабільність процесу та якість плівок; довгострокову поведінку матеріалів у реальних умовах експлуатації, особливо під комбінованим впливом УФ-випромінювання, механічних навантажень та біотичних факторів; ефективність розкладу в різних природних середовищах (окрім морської води, згідно ISO 14851), таких як ґрунти чи прісноводні екосистеми; масштабування технології для каскадних дисково-шестеренних екструдерів, зокрема вплив параметрів екструзії на механічні властивості плівок. Ці прогалини обмежують широке впровадження екологічно безпечних плівок у пакувальну галузь, що потребує комплексного науково-технічного обґрунтування.

Мета. Розробити та оптимізувати технологію виробництва біо- та фоторозкладних полімерних плівок (PLA, PHA, PBAT) методом екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, з оцінкою їхніх властивостей та відповідності міжнародним стандартам біорозкладу, для застосування в пакувальній промисловості як екологічної альтернативи традиційним пластикам.

Методика дослідження. Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського здійснює дослідження процесів виробництва плівки з такими якостями на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою

«знизу – нагору» рис. 2. Процес екструзії біо- та фоторозкладних плівок з PLA, PHA і PBAT передбачає встановлення певних температурних і швидкісних параметрів для кожного етапу. Типові температури для екструзії PLA знаходяться в межах 180–210 °С, для PHA — 170–190 °С, а для PBAT — 190–220 °С. Ці температури є оптимальними для плавлення матеріалів та забезпечення їхнього ефективного змішування.

Екструзійна установка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, рис. 2, що складається з дозатора 1, дискового розплавлювача – гомогенізатора 2 та дозуючого шестеренчастого насоса 3. Для виготовлення плівок із PLA, PHA чи PBAT необхідно ретельно підготувати полімерну суміш, що включає не лише самі полімери, але й добавки, які покращують властивості кінцевого продукту. До таких належать пластифікатори, стабілізатори, антиоксиданти, а також барвники або інші речовини, що покращують розкладність матеріалу під впливом світла та природних факторів [5].

Вихідний гранульований полімер і необхідні добавки шнековими дозаторами 1 подаються в бункер дискового екструдера. Особливу увагу слід приділити вибору стабілізаторів для біополімерів, оскільки вони часто схильні до деградації при високих температурах або впливу ультрафіолетових променів. Окрім того, додавання пластифікаторів дозволяє збільшити гнучкість плівок, що важливо для багатьох застосувань, зокрема для пакувальних матеріалів. Процес змішування, усереднення та фарбування полімерної маси відбувається в дисковому екструдері 2, а створення тиску та дозування – у шестеренному насосі 3, які з'єднані послідовно.

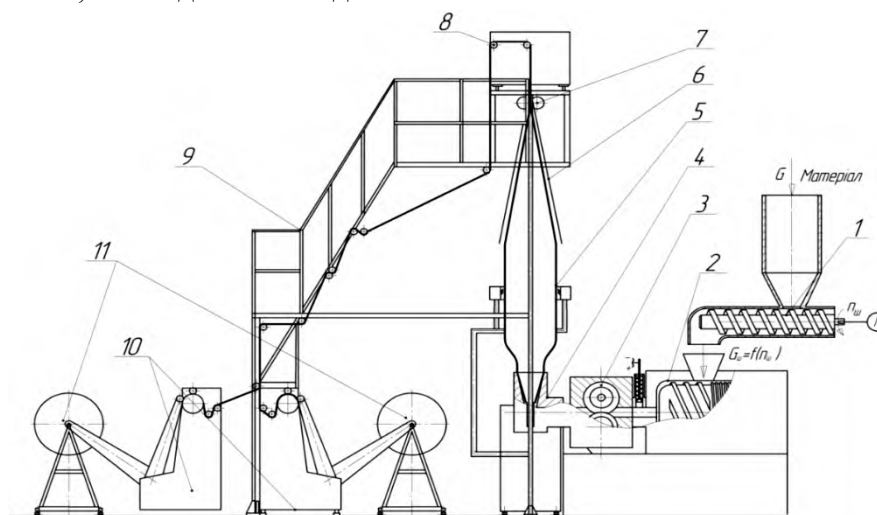


Рис. 2 – Схема установки для виробництва рукавної плівки

- 1 – дозатор сировини; 2 – екструдер дисковий; 3 – насос шестеренний; 4 – формуюча головка; 5 – кільце охолодження; 6 – складальні пластини; 7 – тягучі валки; 8 – обвідні валки; 9 – естакада; 10 – маніпуляційні верстати; 11 – прийомні верстати

Полімерна маса рухається від завантажувальної воронки до формувальної головки. Під час руху вздовж дискового екструдера в багатозахідній завантажувально-пластикувальній зоні гранули ущільнюються, завдяки обертанню диска й дисипації механічної енергії приводу в теплову плавляться, а в торцевих робочих зазорах розплав гомогенізуються і стає однорідним. Далі, отриманий розплав під тиском 5-7 МПа заповнює міжзубні впадини шестеренного насоса 3 і переноситься ними в зону високого тиску 20-25 МПа, проходить кільцеву формувальну головку 4, одночасно через дорн кільцевої головки в середину рукава подається повітря, яке роздуває його до певних розмірів, надаючи трубчасту форму. Після формування плівки за допомогою роздування, наступним етапом є її охолодження. Для цього плівка обдувається холодним повітрям у кільці охолодження

5, що дозволяє швидко знизити температуру полімеру і запобігти його деформації. Далі плівковий рукав складається за допомогою складальних пластин 6 і направляється між гумованими валками тягнучого пристрою 7, обминаючи обвідні валки 8 на верстаті-маніпулятори 10. Після них складена плівка попадає на прийомні верстати 11, де намотується в рулони у вигляді рукава або полотна.

Результати дослідження. Було проведено дослідження з виробництва PLA плівки в екструзійній установці, яка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, що складається з дискового розплавлювача, черв'ячного екструдера-домішувача та дозуючого шестеренчастого насоса на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою «знизу – нагору». Як сировину було використано гранули Ingeo 2003D від компанії NatureWorks LLC. У процесі дослідження для забезпечення оптимального плавлення та транспортування PLA Ingeo 2003D отримали наступний температурний профіль нашого екструдера (табл. 1).

Таблиця 1 – Температурний профіль екструдера

Зона екструзії	Температура, °C
Зона подачі	185-190
Зона пластифікації	190-195
Зона компресії	195-205
Зона дозування	205-210
Матриця	210

У процесі проведення реологічних досліджень отримали залежність в'язкості PLA від температури (рис. 3). В'язкість розплаву PLA Ingeo 2003D зменшується зі збільшенням температури, що є характерним для термопластичних полімерів. Це впливає на текучість матеріалу під час екструзії та, відповідно, на якість кінцевої плівки.

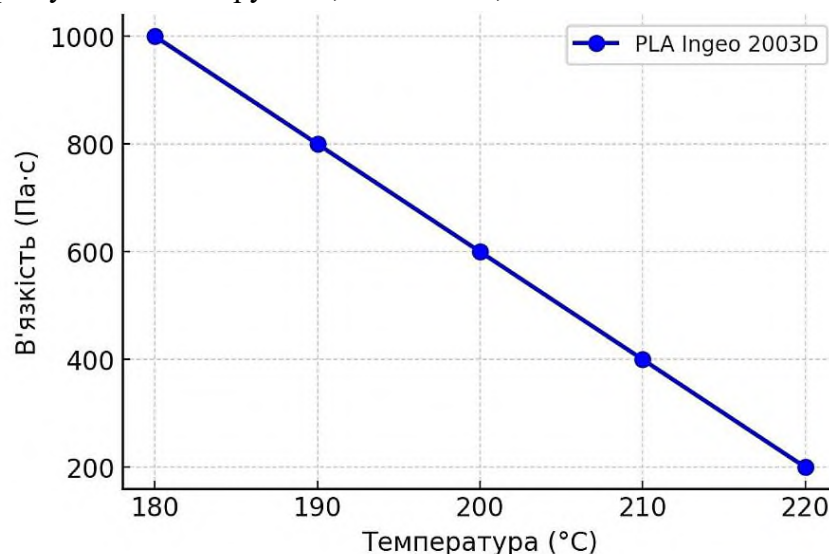


Рисунок 3. Залежність в'язкості PLA Ingeo 2003D від температури

PLA Ingeo 2003D має псевдопластичну поведінку – в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву. При надто високій швидкості зсуву PLA може деградувати та втрачати механічні властивості. Тому важливо підібрати оптимальне співвідношення температури та швидкості подачі розплаву шестеренчастим насосом, що допомагає уникнути термодеструкції та отримати якісну плівку. Під час роботи отримали оптимальний температурний профіль для PLA Ingeo 2003D в діапазоні 185–210 °C та оптимальну швидкість обертання шестерні дозуючого шестеренчастого насоса $n = 0,75$ об/с, при цьому опір формуючої головки склав $P = 25,3$ МПа, а продуктивність лінії $Q = 0,011$ кг/с.

Висновки. За вищенаведеною технологією можна одержувати найрізноманітніші екологічно безпечні плівки, які стануть у пригоді як виробнику, так і споживачу. Вдосконалення методів виробництва біо- та фоторозкладних плівок, зокрема на основі екструзії, дозволяє інтегрувати ці матеріали в наявні технологічні лінії без значних змін у виробничих процесах, що зменшує витрати та робить перехід до використання нових матеріалів більш доступним для виробників. При цьому традиційні пакувальні матеріали постійно вдосконалюються, що підвищує їх якість. Завдяки впровадженню нових наукових і технологічних розробок вдається покращити властивості матеріалів, зменшити товщину та вагу упаковки, а також створити нові види багаторазової тари [6]. Таким чином, біо- та фотодеструктивні полімери є важливим кроком до створення сталих екологічних технологій у пакувальній промисловості та інших сферах, що з часом можуть стати основним інструментом у боротьбі з пластиковими відходами. Їх широке впровадження вимагатиме подолання певних труднощів, але з огляду на важливість екологічної проблеми це є перспективним напрямком для майбутнього розвитку полімерної галузі.

Список використаних джерел

1. Замотаєв, П. В. (1999). Полімери що руйнуються під дією природних факторів. *Упаковка*, (№4), 34-37
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging. *arxiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Гавва, О. М. (2007). Шляхи вдосконалення та розвитку технологій і обладнання пакування. У *Матеріали науково-практичної конференції «Пакувальна індустрія»* (с. 162–175).

References

1. Zamotaiev, P. V. (1999). Polimery shcho ruiniuiutsia pid diieiu pryrodnykh faktoriv. [Polymers that degrade under the influence of natural factors]. *Upakovka – Packaging*, (4), 34-37.
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). *A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging*. arxiv preprint <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium- Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Havva, O. M. (2007). Shliakhy vdoskonalennia ta rozvytku tekhnolohii i obladnannia pakuvannia. [Ways to improve and develop packaging technologies and equipment]. *Pakuvalna industriia: naukovo-praktychna konferentsiia – Packaging industry: Scientific and Practical Conference* (pp. 162-175).

Отримано 23.04.2025

Anatolii Abayev¹, Mykola Shved²

¹Student, Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: abayev@uk.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>

²PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: npchved46@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

**INNOVATIVE POLYMERS FOR A SUSTAINABLE FUTURE:
EXTRUSION OF BIO- AND PHOTODEGRADABLE POLYMER FILMS**

The article addresses the global issue of environmental pollution caused by conventional polymer waste and explores innovative solutions using biodegradable and photodegradable polymers, including: polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). These materials are capable of decomposing under the influence of natural factors such as moisture, oxygen, ultraviolet radiation, and microbial activity. The study focuses on the extrusion-blow molding process for producing environmentally friendly films from these polymers using a cascade disk-gear extruder. The structure of the extrusion line is described, including the disc plasticizer, screw mixing extruder, and gear metering pump.

Optimal processing conditions were defined, namely: typical temperature ranges are 180–210 °C for PLA, 170–190 °C for PHA, and 190–220 °C for PBAT. The technological process also includes the precise formulation of the polymer blend, which incorporates various additives—such as plasticizers, stabilizers, antioxidants, and pigments—to enhance film performance and degradability. Particular attention is given to the role of stabilizers, considering the thermal and UV sensitivity of biodegradable polymers.

In the article, relevance of international standards is emphasized, especially ISO 14851, which determines test methods for biodegradation of plastics in marine environments. Compliance with these standards is crucial for industrial implementation of these materials. The research conducted at the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum-Refining Industries of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute confirms the feasibility of applying biodegradable materials using existing industrial extrusion equipment with minimal modification.

It is concluded in the study that development and industrial integration of bio- and photodegradable films represent a vital step toward sustainable packaging technologies. These materials offer significant ecological benefits and have the potential to replace conventional plastics in multiple applications, supporting the global movement toward circular economy and environmental responsibility.

Keywords: biopolymers; extrusion; PLA; PHA; PBAT; biodegradability; packaging films; photodegradation.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 6.