

Іщенко О.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Москаль Р.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

БІОРОЗКЛАДНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ

У статті розглянуто актуальну проблему забруднення довкілля відходами традиційних полімерів, які характеризуються надзвичайною стійкістю до біологічного розкладу та становлять глобальну екологічну загрозу. Визначено сучасні тенденції переходу до біорозкладних матеріалів, зокрема на основі відновлюваної сировини – крохмалю. Проведено аналіз наукових публікацій, що стосуються методів модифікації нативного крохмалю, його пластифікації та використання у складі композиційних матеріалів. Показано, що крохмаль є доступним, екологічним і перспективним біополімером, який після пластифікації перетворюється на термопластичний крохмаль (TPS), придатний для екструзії та лиття. Окрему увагу приділено ролі пластифікаторів (гліцерин, сорбіт, сечовина, формамід, етаноламін) та ко-пластифікації у покращенні фізико-механічних властивостей TPS і зниженні схильності до ретроградації. Розглянуто шляхи підвищення гідрофобності та водостійкості крохмальних біополімерів за рахунок хімічної модифікації, використання лимонної кислоти, нанонаповнювачів (целюлозні волокна, наноглина), а також введення біоактивних агентів (екстракт кавової гущі, протеїни, природні барвники). Наведені приклади свідчать про значний потенціал крохмалю для створення біопакувальних плівок із антибактеріальними, антиоксидантними та бар'єрними властивостями, що продовжують термін зберігання харчових продуктів та є повністю біорозкладними. Зроблено висновок, що Україна, як аграрна держава з розвинутою сировинною базою для виробництва крохмалю, має всі передумови для масштабування таких технологій на вітчизняних полімерних підприємствах. Це дозволить не лише зменшити екологічне навантаження та вирішити проблему накопичення пластикових відходів, але й сприятиме розвитку локального виробництва, імпортозаміщенню та інтеграції у світову біоекономіку.

Ключові слова: біорозкладні матеріали, крохмаль, пластикові відходи, термопластичний крохмаль.

Постановка проблеми. Проблема забруднення довкілля нерозкладними пластиками. Зростання попиту на біорозкладні матеріали.

Однією з найбільш актуальних екологічних проблем сьогодення є зростання обсягів виробництва та накопичення у довкіллі пластикових відходів [1]. Традиційні пластики, такі як поліетилен, поліпропілен і полістирол, є стійкими до біологічного розкладу, що призводить до їх тривалого існування в природі [2]. За оцінками, термін їхнього розкладу може сягати сотень, а подекуди й тисяч років, створюючи серйозну загрозу для екосистем, зокрема для світового океану, ґрунтів та дикої природи.

Ця проблема вимагає пошуку ефективних та екологічно безпечних альтернатив. Внаслідок цього, у сучасному світі спостерігається значне зростання попиту на біорозкладні матеріали, що здатні руйнуватися під дією мікроорганізмів

і природних факторів, повертаючись у біологічний цикл [3].

Перехід до біорозкладних матеріалів не лише сприяє зменшенню обсягів пластикових відходів на звалищах і в природі, але й є важливим кроком на шляху до циркулярної економіки та сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З моменту виникнення міст накопичення та утилізації твердих відходів (ТПВ) стали серйозною проблемою. У сучасному світі, де упаковка є найпомітнішим видом відходів, ця проблема набуває глобальних масштабів. В Україні, за даними, на звалищах накопичені десятки мільйонів тонн ТПВ [4].

Захоронення ТПВ – є найпоширеніший методом утилізації відходів в Україні – близько 90% відходів вивозиться на сміттєзвалища. Цей під-

хід є неефективним і екологічно небезпечним, оскільки кожне сміттєзвалище займає від 6 до 50 гектарів родючих земель, виводячи їх з корисного використання. Крім того, неконтрольоване захоронення призводить до забруднення ґрунтів і ґрунтових вод токсичними речовинами, що утворюється в процесі розкладання відходів [5].

Спалювання відходів розглядається як альтернатива для запобігання росту сміттєзвалищ. Однак, цей метод є дорогим і технологічно складним, оскільки потребує установок з ефективними фільтрами для очищення димових газів. Незважаючи на це, спалювання все ще супроводжується викидами шкідливих продуктів, зокрема токсичних солей важких металів, які згодом осідають на ґрунті та у воді, забруднюючи навколишнє середовище і створюючи загрозу для здоров'я людини [1].

Найбільш раціональним та екологічно виправданим шляхом є утилізація вторинної полімерної сировини (ВПС). Цей підхід дозволяє зменшити навантаження на довкілля, зберігати природні ресурси і перетворювати відходи на цінні матеріали. Ключовим етапом у цьому процесі є сортування відходів, що спрощує подальшу переробку. Для цього важливою є організація збору і сортування ВПС, а також застосування екологічного маркування. В Європейському Союзі поступово запроваджується уніфікована система екомаркування, що допомагає споживачам і переробним підприємствам ідентифікувати матеріали для подальшої переробки.

Таким чином, постійне зростання обсягів пластикових відходів, що не розкладаються, стимулює інноваційні дослідження у галузі біорозкладних технологій пакування, які перебувають у центрі уваги провідних світових наукових центрів та великих корпорацій. Проте, однією з головних перешкод для їхнього масового впровадження є висока вартість біодеградабельних матеріалів, яка наразі значно перевищує вартість традиційних пластиків [6].

Вирішення проблеми високої вартості біо-упаковки вимагає комплексного підходу. В Україні це може бути досягнуто за допомогою економічного стимулювання, а саме – запровадження податкових пільг для підприємств, що займаються виробництвом біорозкладного пакування. Це дозволить знизити собівартість продукції та зробити її конкурентоспроможною.

Необхідно проводити інформаційні кампанії для бізнесу та населення щодо переваг біопакування, правил сортування та утилізації. Це допоможе подолати бар'єр високої вартості та збіль-

шити попит на екологічну продукцію. У країнах з розвинутою економікою використання біодеградабельної упаковки є індикатором відповідального бізнесу, що підтримується споживачами.

Одним із найперспективніших напрямків у розробці біорозкладних полімерів є створення матеріалів на основі термопластичного крохмалю (TPS). Наукові дослідження зосереджені на модифікації крохмалю з метою покращення його фізико-механічних та бар'єрних властивостей. Додавання пластифікаторів, таких як гліцерин і сорбіт, дозволяє перетворювати крохмаль на термопластичний матеріал, придатний для екструзії та лиття [7, 8].

Дослідники активно працюють над хімічною модифікацією крохмалю для підвищення його гідрофобності та стійкості до вологості. Це критично важливо для пакувальних матеріалів, що контактують з харчовими продуктами [9].

Розробка композитних матеріалів на основі крохмалю з додаванням нановолокон целюлози, наноглини та інших біонаповнювачів дозволяє значно підвищити міцність, жорсткість і бар'єрні властивості кінцевого продукту [10].

Метою статті є систематизація знань про крохмаль як основу для біополімерів, аналіз методів його модифікації та властивостей отриманих матеріалів, а також визначення ключових напрямків досліджень.

Виклад основного матеріалу. Біополімери на основі крохмалю, PLA, PHA, PBS, PBAT, PTT – набувають дедалі ширшого розповсюдження як сталі рішення. Крохмаль вирізняється низкою важливих переваг: він доступний, недорогий, біорозкладний, нетоксичний, легко функціоналізується і має відновлюване походження.

Крохмаль – це природний біополімер, який отримують із рослинних джерел, таких як кукурудза, картопля, пшениця та тапіока та є важливою складовою харчових продуктів. У процесі клітинного дихання він розщеплюється до глюкози й забезпечує організм енергією [11]. Крохмаль широко застосовується не лише у харчовій промисловості, а й у виробництві полімерів, паперу, текстилю, засобів для обробки білизни та біопалива [12].

Нативний крохмаль є крихким матеріалом і, відповідно, не підходить для технічних застосувань. Його структура зумовлена великою кількістю внутрішньо- та міжмолекулярних водневих зв'язків між гідроксильними групами, що істотно обмежує рухливість полімерних ланцюгів і сприяє утворенню кристалічних доменів. Для надання йому

еластичності та термопластичності необхідне введення відповідного пластифікатора [13].

При пластифікації крохмаль перетворюється на однорідну полімерну фазу, завдяки руйнуванню водневих зв'язків між ланцюгами. Це призводить до втрати кристалічності та зниження температури склування, що суттєво покращує гнучкість. Результатом є термопластичний крохмаль (TPS), який легко формується та обробляється [14].

Найпоширенішим пластифікатором є гліцерин, завдяки його нетоксичності, доступності, низькій вартості та високій температурі кипіння. Властивості TPS суттєво залежать від типу та концентрації пластифікатора [15].

Згідно з літературою, для приготування TPS можна застосовувати не лише нативний крохмаль, але й його модифіковані форми. Наприклад, діальдегідний крохмаль (DAS), отриманий шляхом використання періодату та гліцерину. У такому випадку руйнується кристалічність, підвищуються міцність, водостійкість та бар'єрні властивості, а ретроградація значно гальмується, порівняно з TPS із нативного крохмалю [16].

Також досліджено альтернативні пластифікатори, зокрема амідні сполуки – сечовина, формамід і етаноламін. Вони стабілізують TPS завдяки можливості формування міцніших водневих зв'язків із гідроксилами крохмалю, аніж гліцерин. При цьому затримується процес ретроградації, покращуються механічні й термічні властивості матеріалу [17].

Особливий інтерес становить ко-пластифікація сечовиною (15%) та етаноламіном (15%) при одержанні TPS екструзією утворює міцніші водневі зв'язки та однорідну аморфну фазу. Такий TPS має кращу термостабільність, механічні властивості (наприклад: міцність на розрив $\sim 9,0$ МПа, подовження до розриву $\sim 34,4\%$, енергія руйнування $\sim 1,34$ Н·м) і значно знижує ретроградацію, порівняно з TPS із гліцерином [18].

Крім того, дослідження 2021 року демонструє, що система з гліцерином і сечовиною (TPS, отриманий при двошнекової екструзії) показує покращену ефективність пластифікації, вищу термостабільність і зниження ретроградації, в порівнянні з TPS лише на гліцерині [19].

За даними огляду останніх досліджень і публікацій, термопластичний крохмаль (TPS) є поширеним типом біопластику, на нього припадає близько 50% світового ринку біопластиків. У Європі, який є лідером за впровадженням біопластичних рішень, маркетингові дослідження свідчать, що ринок біопластиків на основі крохмалю становить понад

40% від загальноєвропейського ринку біопластичних виробів. Це свідчить про значний попит та масштабне застосування крохмалю як ключового компоненту в біопластиках.

Розроблено технологія біорозкладних пакувальних плівок для харчових продуктів на основі крохмалю/полівінілового спирту/лимонної кислоти/карбоксицелюлози. Отримати плівки характеризуються високою міцністю (до ~ 56 МПа), водостійкими та газо-бар'єрними властивостями, а також антибактеріальною активністю, це досягнуто шляхом утворення водневих зв'язків та зшивання естерифікацією лимонної кислоти простим та екологічним методом, що дозволяє уникнути використання пластифікаторів, шкідливих для здоров'я людини. Такі плівки зберігають фрукти (лічі, сливи) до 4–14 днів і повністю деградують у ґрунті за ~ 30 діб [20].

У складі крохмаль/полівініловий спирт із додаванням лимонної кислоти досягають підвищення міцності і зменшення набухання матеріалу, завдяки функціоналу карбоксильних груп, що сприяє утворенню ефірних мостів [21].

В [22] дослідженні автори розробили біоактивні пакувальні плівки з полівінілового спирту/крохмалю були виготовлені шляхом додавання комбінованих антиоксидантних агентів, а саме екстрагованої кавової гущі та лимонної кислоти. Плівка, що включала 30 мас.% лимонної кислоти, показала мінімальну інгібуючу концентрацію проти *Escherichia coli* (*E. coli*) та *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*). Включення кавової гущі та лимонної кислоти в плівку показало синергетичний ефект щодо антибактеріальної активності. Водостійкість та кінетична сорбція вологи покращилися з додаванням лимонної кислоти. Міцність на розрив та біорозкладність зразків були в діапазоні 5,63–7,44 МПа та 65,28–86,64% відповідно. На основі цього дослідження плівка може бути застосована як новий матеріал для пакування харчових продуктів.

Крім того, додавання целюлози, зокрема целюлозних волокон із залишків рисової соломи, у суміш крохмаль/PVA зі гліцерином значно підвищує сумісність матриці, механічні характеристики підвищилися на 52% та знижує проникність для водяної пари [23].

Додавання целюлозних нанокристалів (CNC) та нановолокон (CNF) у термопластичний крохмаль (TPS) у концентрації 1–30 мас.% сприяє підвищенню міцності на розрив та модуля пружності. Цей ефект зумовлений однорідною дисперсією наповнювача та формуванням міцних водне-

вих зв'язків між його молекулами та полімерною матрицею, що забезпечує армуючу дію. Водночас зменшення відсотка подовження при розриві пояснюється сильними міжфазними взаємодіями, які обмежують рухливість полімерних ланцюгів у системі «CNC–TPS». За відсутності належної взаємодії між нанонаповнювачем і матрицею спостерігається слабка передача напружень та швидке поширення тріщин.

Окремо досліджувалося використання нанокристалів целюлози, отриманих кислотним гідролізом конопель, у матриці горохового крохмалю з гліцерином. Було встановлено, що введення 0–30 мас. % CNC зумовлює суттєве варіювання механічних характеристик: міцність на розрив підвищувалася від 3,9 до 11,5 МПа, модуль пружності – від 31,9 до 823,9 МПа, тоді як подовження при розриві зменшувалося від 68,2 до 7,5% [24].

Введення органічно-модифікованих монтморилонітів (MMT) та наночастинок SiO_2 у термопластичний крохмаль (TPS) істотно підвищує його фізико-механічні та бар'єрні властивості. Оптимальний ефект досягається при концентрації 3–5% MMT, що забезпечує зростання міцності на розрив та зниження проникності для водяної пари завдяки «лабіринтовому ефекту» шаруватих структур. Додавання наночастинок SiO_2 у кількості до 5% також сприяє підвищенню механічної міцності та зниженню вологостійкості. Таким чином, комбіноване використання MMT і SiO_2 є ефективною стратегією для створення функціональних біополімерних плівок із покращеними експлуатаційними характеристиками [25].

З огляду на те, що Україна є аграрною державою з потужною сировинною базою для одержання крохмалю та інших природних полімерів, розвиток технологій з виробництва біорозкладних матеріалів на основі крохмалю виглядає цілком

перспективним і реалістичним. Аналіз сучасних літературних джерел демонструє значний потенціал використання крохмалю для створення біополімерних плівок та композитів із покращеними фізико-механічними й бар'єрними властивостями. Впровадження таких технологій на вітчизняних полімерних виробництвах може не лише сприяти імпортозаміщенню та зміцненню економічної стійкості країни, але й забезпечити суттєве зменшення антропогенного навантаження на довкілля.

Такі технології можна реалізувати без великих капітальних витрат на нове обладнання – процес сумісний з існуючими екструзійними чи литтєвими лініями на вітчизняних підприємствах. У поточній складній ситуації для України це виглядає як перспективний напрям розвитку локального виробництва біорозкладних матеріалів харчового призначення.

Висновки. Систематизація сучасних наукових даних свідчить, що крохмаль – є перспективна та відновлювальна сировина для створення біополімерів. Різноманітні методи його фізичної, хімічної та біотехнологічної модифікації дозволяють отримувати матеріали з покращеними механічними, бар'єрними та біодеградаційними властивостями, що відкриває широкі можливості для застосування в пакувальній, медичній, харчовій та фармацевтичній галузях. Аналіз літератури засвідчує, що ключовими напрямками подальших досліджень це підвищення вологостійкості термопластичного крохмалю, створення композицій на основі крохмалю із іншими біополімерами, додавання біоактивних добавок, а також масштабування технологій для промислового впровадження. У контексті розвитку біоекономіки та зростаючих екологічних викликів ці напрями є стратегічно важливими для формування стійких і екологічно безпечних технологій майбутнього.

Список літератури:

1. Власенко І. В., Постова В. В. Аналіз сучасних інноваційних методів утилізації відходів. *Економіка і організація управління*. 2020. № 3. С. 30–40. URL: <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.3.3>
2. Михайлова Є.О. Пластикове забруднення – одна з головних екологічних проблем людства. Комунальне господарство міст. *Серія: «Економічні науки»*. 2020. 4(157), 109–121. DOI 10.33042/2522-1809-2020-4-157-109-121
3. State of art review on sustainable biodegradable polymers with a market overview for sustainability packaging / S. K. Verma et al. *Materials Today Sustainability*. 2024. P. 100776. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100776>
4. Луців Н. Г., Капраль А. Р. Впровадження інноваційних технологій переробки твердих побутових відходів в Україні. *Електронний журнал "Ефективна економіка"*. 2024. № 12. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.12.64>
5. Колодійчук, І. А. (2023). Техніко-технологічний потенціал утилізації відходів у регіонах України / О.В. В кн. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України* : Вип. 161 (3) (с. 34–40). DOI: <https://doi.org/10.36818/2071-4653-2023-3-5>

6. Bioplastic for future: A review then and now / Manali Shah et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 056–067. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.2.0054>
7. Dang K. M., Yoksan R. Thermoplastic starch blown films with improved mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 188. P. 290–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.027>
8. Effect of different proportions of glycerol and D-mannitol as plasticizer on the properties of extruded corn starch / X. Xu et al. *Frontiers in Nutrition*. 2024. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1335812> (date of access: 04.09.2025).
9. Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review / X. Wang et al. *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 240. P. 116292. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>
10. Green composites based on thermoplastic starch reinforced with micro- and nano-cellulose by melt blending – A review / F. A. Cataño et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 248. P. 125939. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125939>
11. Adak S., Banerjee R. A green approach for starch modification: Esterification by lipase and novel imidazolium surfactant. *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 150. P. 359–368. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.038>
12. Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging / Ravindra V. Gadhave, Abhijit Das, Prakash A. Mahanwar, Pradeep T. Gadekar. *Open Journal of Polymer Chemistry*. 2018. Vol. 08, no. 02. P. 21–33. URL: <https://doi.org/10.4236/ojpcchem.2018.82003>
13. Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review / Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Dassanayake, R. S., Rajapaksha, S. M., Manamperi, A., Fernando, C. A. N., Kulatunga, A. K., Manipura, A. *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 22. P. 6880. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26226880>
14. Alissandratos A., Halling P. J. Enzymatic acylation of starch. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 115. P. 41–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.030>
15. Cuevas-Carballo Z. B., Duarte-Aranda S., Canché-Escamilla G. Properties and Biodegradation of Thermoplastic Starch Obtained from Grafted Starches with Poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*. 2019. Vol. 27, no. 11. P. 2607–2617. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01540-w>
16. Effect of dialdehyde starch on cassava starch/poly(vinyl alcohol) blends fabricated by melt mixing method with glycerol plasticized / Y. Wang, H Ma, S. Ying, J. Gao, X. Zhou, *Journal of Applied Polymer Science*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/app.55932>
17. Muncke J. Tackling the toxics in plastics packaging. *PLOS Biology*. 2021. Vol. 19, no. 3. P. e3000961. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000961>
18. Ma X.F., Yu J.G., Wan J.J. Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*. 2006. Vol. 64, no. 2. P. 267–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.11.042>
19. Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized with Glycerol/Urea Mixture / M. Paluch, J. Ostrowska, P. Tyński. *Journal of Polymers and the Environment*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02235-x>
20. Transparent, mechanically robust and antibacterial food packaging film based on starch/PVA/citric acid/carboxycellulose nanofibers by one-pot green process / X. Yuan, F. Wei, Wang, Z., Li, X., Deng, Y., X. Shi, B. Lin, *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 302. P. 140573. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140573>
21. Physico-chemical properties of biodegradable films of polyvinyl alcohol/sago starch for food packaging / F. F. Hilmi M. U. Wahit, N. A. Shukri, Z. Ghazali, A. Z. Zanuri, *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 16. P. 1819–1824. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.056>
22. Polyvinyl Alcohol (PVA)/Starch Bioactive Packaging Film Enriched with Antioxidants from Spent Coffee Ground and Citric Acid / A. Ounkaew, P. Kasemsiri, K. Kamwilaisak, *Journal of Polymers and the Environment*. 2018. Vol. 26, no. 9. P. 3762–3772. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1254-z>
23. Cao X., Chen Y., Chang P.R., Stumborg M., Huneault M.A. Green composites reinforced with hemp nanocrystals in plasticized starch. *J. Appl. Polym. Sci.* 2008;109:3804–3810. doi: 10.1002/app.28418.
24. Iwata T. Biodegradable and Bio-Based Polymers: Future Prospects of Eco-Friendly Plastics. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015. Vol. 54, № 11. P. 3210–3215. URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201410770>
25. Frangopoulos T., Marinopoulou A., Goulas A., Likotraftiti E., Rhoades J., Petridis D., Kannidou E., Stamelos A., Theodoridou M., Arampatzidou A., Tosounidou A., Tsekmes L., Tsihlakis K., Gkikas G., Tourasanidis E., Karageorgiou V. Optimizing the Functional Properties of Starch-Based Biodegradable Films. *Foods*. 2023 Jul 24; 12(14):2812. doi: 10.3390/foods12142812.

Ishchenko O.V., Moskal R.M. BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS BASED ON STARCH

The article discusses the pressing issue of environmental pollution caused by traditional polymer waste, which is highly resistant to biological decomposition and poses a global environmental threat. Current trends in the transition to biodegradable materials, particularly those based on renewable raw materials such as starch, are identified. An analysis of scientific publications on modifying native starch, its plasticisation, and use in composite materials. It is shown that starch is an affordable, environmentally friendly, and promising biopolymer, which, after plasticisation, is converted into thermoplastic starch (TPS), suitable for extrusion and moulding. Particular attention is paid to the role of plasticisers (glycerol, sorbitol, urea, formamide, ethanolamine) and co-plasticisation in improving TPS's physical and mechanical properties and reducing its susceptibility to retrogradation. Ways to increase the hydrophobicity and water resistance of starch biopolymers through chemical modification, the use of citric acid, nanofillers (cellulose fibres, nanoclay), and the introduction of bioactive agents (coffee grounds extract, proteins, natural dyes) are considered. The examples demonstrate the significant potential of starch for creating biopackaging films with antibacterial, antioxidant, and barrier properties that extend the shelf life of food products and are entirely biodegradable. It is concluded that Ukraine, an agrarian country with a developed raw material base for starch production, has all the prerequisites for scaling up such technologies at domestic polymer enterprises. This will not only reduce the environmental impact and solve the problem of plastic waste accumulation, but also contribute to the development of local production, import substitution, and integration into the global bioeconomy.

Key words: biodegradable materials, starch, plastic waste, thermoplastic starch.

Дата надходження статті: 28.08.2025

Дата прийняття статті: 19.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025