

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПРОМИСЛОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПОЛІМЕРІВ НА ОСНОВІ ПОЛІГІДРОКСИБУТИРАТУ (ОГЛЯД)

Таланюк В.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України
вул. Боженка, 11, 03680, м. Київ
vika-toritalanuk@ukr.net

Термін «полімер» було введено видатним хіміком Й.Я. Берцеліусом ще в 1833 році для визначення виду ізомерії, під час якої речовини з однаковим складом відрізняються лише значенням молекулярної маси, наприклад: озон, бутілен, кисень, етилен. Уперше про синтетичні матеріали було згадано лише в 30-х роках XIX ст.: у 1837 році – про полівініліденхлорид та в 1838 році – про полістирол. Хімія полімерів як наука виникла в 60-х роках XIX ст. Російський хімік О.М. Бутлеров сформулював теорію хімічної будови речовин органічного походження, яка дала можливість систематизувати весь практичний матеріал, який був на той час отриманий хіміками в цій галузі. Видатні хіміки, зокрема Меєр, Штаудінгер, Фішер і Френсіс, займалися вивченням природи полімерів і способів їх отримання. Про існування низькомолекулярних сполук було набагато раніше відомо, ще до вивчення їхньої будови, наприклад, про природні полімери, які отримували завдяки бактеріям, грибок, водоростям, рослинам, тваринам або у клітках людського організму. Це целюлоза, яка є у складі клітин рослин, а також крохмаль, що накопичується рослинами, та колаген, шовк, каучук, хітозан, козеїн та інші природні полімери. Деревина, кістки, зуби також можуть визначатись як найкращі композиційні полімери за поєднанням своїх властивостей. Уперше синтетичний полімер було отримано хіміком Л.Г. Бакеландом на початку 1909 року. В основі цього матеріалу були фенолформальдегідні смоли, яким притаманні хороші ізоляційні властивості, він отримав назву бакеліт. Хімік Ф. Клатте у 1912 році розробив новий метод отримання промислового полівінілхлориду. Сьогодні біопластики застосовуються в харчовій сфері як тара та упаковка продуктів харчування. В галузях приладобудування, автомобілебудування і т.д. також застосовуються біопластики. Потенціал ринку біополімерів величезний, попри те, що нині біопластики представлені на ньому лише частково. В майбутньому за умови посилення вимог до екології біополімери зможуть успішно конкурувати з традиційними полімерами, замінюючи їх. Проблема біорозкладання промислових полімерів (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полістирол, поліетилентерефталат) розглянута та вивчена науковцями і займає важливе місце в дослідженнях. У роботі представлено результати з дослідження біодеградації зразків із чистого полімеру типу ПГБ у природних умовах. Досліджувані зразки було поміщено у ґрунти різного складу (чорнозем, глинистий та піщаний). Експериментально було встановлено, що кислотність ґрунту не впливає на швидкість біодеструкції. Також у дослідженні було встановлено, що зі збільшенням вологості ґрунту процес деструкції відбувається швидше. *Ключові слова:* біополімери, полігидроксibuтират, екологічні проблеми, застосування біополімерів.

Main characteristics and industrial application of biopolymers on the basis of polyhydroxybutyrate (review). Talaniuk V.

The term “polymer” was introduced by an eminent chemist J. Berzelius in 1833 to determine the type of isomerism during which substances with the same composition differ only in molecular weight, for example: ozone, butylene, oxygen, ethylene. Synthetic materials were first mentioned only in the 1830s: in 1837, about polyvinylidene chloride and in 1838 about polystyrene. The chemistry of polymers as a science was originated in the 1960s. The Russian chemist O. Butlerov formulated the theory of the chemical structure of substances of organic origin, which made it possible to systematize all the practical material that was obtained at that time by chemists in this field. In particular prominent chemists, in particular Meyer, Staudinger, Fisher and Francis, have been studying the nature of polymers and methods for their production. The existence of low molecular weight compounds was known much earlier, even before studying their structure, for example, natural polymers derived from bacteria, fungi, algae, plants, animals or in the cells of the human body. Cellulose, which is composed of plant cells and starch, which accumulates in plants and collagen, silk, rubber, chitosan, casein and other natural polymers. Wood, bones, teeth can also be represented as the best composite polymers in combination of their properties. For the first time a synthetic polymer was obtained by chemist L. Baekelan in early 1909. The basis of this material was phenol-formaldehyde resins, which has good insulating properties, called bakelite. Chemist F. Clutte in 1912 developed a new method of producing industrial polyvinyl chloride. Today, bioplastics are used in the food sector as food packaging. Bioplastics are also used in the fields of instrumentation, automotive, etc. The potential of the biopolymer market is enormous, despite the fact that bioplastics are now only partially represented. In the future, if environmental requirements are strengthened, biopolymers will be able to compete successfully with traditional polymers, replacing them. The problem of biodegradation of industrial polymers has been considered and studied by scientists and occupies an important place in research. This paper presents the results of a study on the biodegradation of samples of pure PHB polymer in vivo. The samples were placed in soils of different composition (chernozem, clay and sand). It has been experimentally found that soil acidity does not affect the rate of biodegradation. The study also found that with increasing soil moisture the destruction process is faster. *Key words:* biopolymers, polyhydroxybutyrate, environmental problems, application of biopolymers.

Постановка проблеми. Основним недоліком використання пластмас ще й досі залишається екологічний фактор. Економічна наука мало звертала увагу на екологічні проблеми, що й стало однією з причин формування техногенного типу економічного розвитку. Цей тип можна охарактеризувати як природоруйнівний, заснований на використанні штучних засобів виробництва, створених без урахування екологічних обмежень. Для запобігання глобальній і локальній екологічним кризам необхідно змінити техногенний тип розвитку на сталий. Останній дає можливість задовольнити потреби сучасних поколінь, але не ставить під загрозу існування наступних. Концепція сталого розвитку набула визнання як в економічній науці, так і в міжнародній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На початку 30-х років ХХ ст. розпочався великий прогрес в історії розвитку технологій із переробки нафтопродуктів і полімерних матеріалів. Було створено матеріали, такі як: синтетичні волокна, полістирол, а також нейлон, також відомий у науці як капрон і поліамід. Це дало змогу зменшити використання у великій кількості натуральної сировини та збільшити виробництво штучних матеріалів і зумовило подальше здешевлення собівартості товарів. Наступний етап – це використання цих матеріалів у різних галузях, наприклад в оптиці, медицині, машинобудуванні, а також для виготовлення предметів побуту, одягу та взуття [1].

Далі, полімери почали застосовуватися майже у всіх галузях. У ракетно- та літакобудуванні широкий спектр застосування полімерних матеріалів можливий завдяки їхнім механічним, фізичним і хімічним властивостям. У виготовленні одягу для космонавтів широке використання мають шарові нейлонові тканини, а також тканини з поліаміду, політерефталану етилену. Щороку їх виробництво зростає. Наприклад, у 1977 році у світі виготовили 22,5 млн тонн пластмаси, а у 2013 році було випущено майже 340 млн тонн пластмаси. Найважливішими штучними полімерами, які виготовляють у світі, є такі: поліетилен, полістирол, поліпропілен, поліуритан, полівінілхлорид і полістирол. Широкого використання полімерів виробники отримали в галузях електротехніки, електроніки та будівництва та як упакування [2–4].

В автора в його роботі [5] було представлено поділ полімерів за способами отримання на:

- 1) натуральні полімери – біополімери:
 - полісахариди – крохмаль і целюлоза,
 - натуральний каучук, білки, нуклеїнові кислоти;
- 2) синтетичні полімери:
 - біополіетилен, що виготовляють у процесі ферментації цукрового очерету (так званої цукрової тростини),
 - поліетилен, що виготовляють із продуктів нафтопереробки;
- 3) модифіковані полімери:

- синтетичні, структура яких була змінена шляхом фізичної або хімічної модифікації,
- натуральні.

Основною сировиною для виробництва полімерів є сира нафта, а також продукти нафтопереробки. Лише близько 4% світового виробництва нафти використовують у пластмасовій галузі, що сировину використовують дуже економно під час виробництва цих матеріалів [6–9].

Також у нафтовій сировині може міститися вугілля, природний газ, азот, водень і вапняк або солі. У виробництві полімерів загальна частка продуктів переробки нафти, природного газу становить майже 91%, а частка продуктів переробки вугілля – 8–9%. У такому випадку собівартість сировини під час виробництва становить 70–80% від готового продукту [10–12].

Крім нафтохімічних полімерів, є ще біологічні полімери, які отримують із відновлюваної сировини. Нині кількість цих полімерів становить лише 5% від усієї кількості полімерів на ринку. На відміну від нафти, рослинна сировина є більш альтернативною, адже кількість нафти у світі безперервно зменшується. Біополімери, що отримують нині на основі деревних компонентів та однорічних рослин, що містять крохмаль і целюлозу (наприклад, картопля, кукурудза, пшениця, рис), є найбільш затребуваними. Також ці матеріали отримують за допомогою деяких бактерій, грибів і водоростей [13; 14].

Більшість полімерів синтезовано з ненасичених вуглеводнів (реакція полімеризації), їх полімерний ланцюг складається з атомів вуглецю, такі полімери мають назву карболанцюгових [15–18]. Механічні властивості полімерів залежать від факторів будови, температури, часу експлуатації та докладеного навантаження на полімер. За дії докладених напружень на полімер відбувається розпрямлення та розкручування ланцюжків макромолекул та їх переміщення. Полімерам притаманна зміна фізико-механічних властивостей, або явище старіння, що спричиняється різними хімічними реакціями (окиснення, утворення вільних радикалів, деполімеризація з одиничними розривами ланцюжків), які проходять у полімері. Під тривалою дією тепла, озону в атмосфері може відбуватися старіння полімеру. За бажанням процес старіння можна пришвидшити, якщо докласти до вищезазначених умов механічні навантаження. Антиоксиданти вводять до складу полімерів для уповільнення та запобігання явищу старіння. Антирадикали вводять до складу полімерів, щоб підвищити їхню стійкість до дії іонізуючого випромінювання [19; 20].

Полімери, зокрема біополімери, набувають широкого використання в різноманітних галузях народного господарства, а останнім часом біополімери в багатьох галузях практично замінюють традиційні полімери [21–23]. До основних переваг полімерів, що мають здатність до біодеструкції, належать такі:

- а) можливість обробки на стандартному для традиційних термопластичних полімерів оснащенні;
- б) у звичайних умовах стійкість до розкладання;
- в) за природних або штучно створених умов швидко і повністю розчиняються;
- г) безпроблемна утилізація відходів;
- г) свобода від нафтохімічної сировини.

Сьогодні біопластики застосовуються в харчовій сфері – тара та упаковка продуктів харчування. В галузях приладобудування, автомобілебудування і т.д. також застосовуються біопластики. Потенціал ринку біополімерів величезний. За умови посилення в майбутньому вимог до екології, що може допомогти біополімерам успішно конкурувати з традиційними полімерами, замінюючи їх.

Основною перевагою пластмас є невелика густина, що надає виробам із них надзвичайної легкості. Пластмаси виявляють досконалі властивості в термо- і електроізоляції, а деякі полімери можуть бути застосовані як електропровідники. Полімери проявляють стійкість до різних середовищ, що здатні викликати корозію багатьох інших матеріалів. У виробництві оптичних пристроїв використовують пластмаси завдяки їхній прозорості. Завдяки їхній гнучкості можна отримувати різноманітні бажані моделі, а також з'єднувати їх із іншими матеріалами. Різносторонність у використанні пластмас дає змогу застосовувати їх у галузях будівництва, транспорту, електричній і електронній промисловості, у виробництві товарів для сільського господарства, медицини та спорту. Можливості в їх застосуванні практично необмежені, а матеріали пластмас становлять практично необмежене джерело для інновацій у різних галузях промисловості та життєдіяльності [26–28].

Через мале промислове виробництво багато років люди використовують перероблені матеріали для створення нових виробів. Промислова революція XIX ст. створила умови для синтезу матеріалів і виробництва полімерів у XX ст., а також зумовила збільшення кількості відходів і зменшила цикл придатності продуктів. З метою розвитку полімерних матеріалів учені розробили в них такі характеристики, як екологічність сировини на кожному етапі виробництва, переробки та утилізації. Нині більшу увагу звертають на екологічність сировини, зокрема на використання полімерних відходів, а також сировини рослинного походження, що відновлюється [29; 30].

Проектування і селекція матеріалів реалізуються зі вказанням способу розпаду, рециркулюванням або утилізації, тобто з урахуванням кінцевого етапу їхнього циклу життя. Частина пластмас, що є біопохідними, можуть розпадатися протягом короткого часу, тобто біодеградувати. Використання матеріалів, що біодеградують, – це вирішення проблем утилізації відходів швидко й екологічно. Збільшення асортименту виробів із пластмаси та винайдення нових композицій для виготовлення пластмас призводять

до нагромадження багатівідходності як у вигляді технологічних відходів чи упаковок, так і у формі вжитих виробів. Велика кількість пластмасових відходів, а також їх розмаїття знижують можливість їх використання вдруге у вигляді сировини чи матеріалів [31; 32].

З огляду на вищезазначену проблему виробники виробів із пластмас, що після закінчення строку експлуатації перетворюються або можуть перетворюватися на відходи, повинні побудувати свою роботу так, щоб:

- під час виробництва виробів, під час і після завершення їх використання запобігти утворенню відходів або обмежити їх кількість і негативну дію на довкілля;
- забезпечувати відновлювання матеріалу згідно з принципами охорони навколишнього середовища, за умови, якщо не вдалося запобігти утворенню відходів;
- забезпечити ліквідацію відходів згідно з принципами охорони навколишнього середовища, якщо їх не вдалося переробити або запобігти утворенню відходів.

З метою забезпечення рециркулювання полімерних матеріалів використовують такі сучасні технології:

- 1) механічна переробка сировини відпрацьованих виробів;
- 2) переробка сировини двома методами: термічним і хімічним;
- 3) паливне використання відходів (термічна переробка);
- 4) компостування виробів із полімерів, що мають здатність деградувати;
- 5) проектування виробів, що полегшує їх переробку;
- 6) обробка радіацією [33].

Основним недоліком використання пластмас ще й досі лишається екологічний фактор. Економічна наука мало звертала увагу на екологічні проблеми, що й стало однією з причин формування техногенного типу економічного розвитку. Цей тип можна охарактеризувати як природоруйнівний, заснований на використанні штучних засобів виробництва, створених без урахування екологічних обмежень. Для запобігання глобальній і локальній екологічній кризам необхідно змінити техногенний тип розвитку на сталий. Останній дає можливість задовольнити потреби сучасних поколінь, але не ставить під загрозу існування наступних. Концепція сталого розвитку набула визнання як в економічній науці, так і в міжнародній практиці [33; 34].

Головним завданням усіх виробників полімерних матеріалів зараз є впровадження методів, які дадуть змогу реалізувати життєдіяльність суспільства шляхом упровадження його до природних біохімічних циклів, що призведе до мінімізації використання природних ресурсів, збереження необхідних ресурсів і умов для майбутніх поколінь. Це стане можливим

у разі заміни звичайних полімерних матеріалів на біологічні. Якість навколишнього середовища дещо поліпшилася у розвинених країнах, але погіршується у нових індустріальних країнах. Найгірше те, що до основної проблеми виснаження невідновлюваних ресурсів додалася і стала найголовнішою деградація відновлюваних ресурсів – ґрунтів, лісів, водних ресурсів, атмосфери [34].

Для створення такої економічної стратегії сталого розвитку необхідно обмежити споживання. Суспільство має обмежити своє існування необхідними корисними потребами, які забезпечать безкризове існування. Престижні та згубні потреби мають бути ліквідовані. Критеріями сталого розвитку мають стати мінімальна собівартість і висока якість корисної та необхідної продукції та послуг, невисока диференціація під час розподілу серед членів суспільства матеріальних благ, які створюються у сфері суспільного виробництва. Використання полімерних матеріалів дасть змогу швидше досягти поставленої мети в Україні та в усьому світі. Інтерес до біополімерних матеріалів, які розпадаються за дії на них різних мікроорганізмів, в останні роки значно зростає як в Україні, так і в інших країнах. Виготовлення матеріалів, строк служби яких можна регулювати шляхом введення спеціальних домішок, що пришвидшують розпад макромолекули полімерів, значно полегшує проблему переробки полімерів. Як домішки використовують крохмаль із кукурудзи, картоплі, рису, пшениці або інших рослин [35].

Популярний спосіб зробити традиційні пластики біорозкладними – введення до складу макромолекули біорозкладних мономерів, наприклад того ж крохмалю. Основою таких матеріалів є ПЕ високого тиску і крохмаль злакових рослин як добавка, що біологічно розкладається. Але це не зовсім біорозкладні пластики, тому що вони лише розпадаються на маленькі частини, що роками повністю розкладатимуться.

Щоб отримати матеріал, який буде використовуватись як повновартісна сировина для подальшої переробки, застосовують матеріальну або механічну переробку, що полягає в безпосередній переробці відходів без застосування хімічних процесів. Отримані вироби можуть бути ще однією сировиною для створення нових виробів. Правильна сегрегація

комунальних і промислових є важливою умовою для ефективності застосування цього методу [36].

Є декілька типів деградації полімерів під дією зовнішніх факторів. Терміном «біорозкладний» зазвичай називають полімер, деструкція якого хоча б частково спричинена біологічною системою [37]. Загалом деструкція полімеру включає процеси поглинання тепла і світла, дифузії компонентів середовища, обростання мікроорганізмами, ферменти яких сприяють розірванню хімічних зв'язків у макромолекулах.

Відповідно до [37] фотодеградація – руйнування полімеру під дією ультрафіолетового (далі – УФ) випромінювання. Полімерний матеріал розтріскується, поступово покривається суцільною сіткою тріщин, розпадається на шматки і згодом перетворюється на порошок, що складається із низькомолекулярних фракцій. Цей порошок поступово остаточно розкладається під дією мікроорганізмів. Найбільш чутливими до фотодеградації є полімери групи поліолефінів, до складу яких із метою захисту від впливу УФ випромінювання зазвичай вводять спеціальні стабілізатори. Якщо, навпаки, необхідно зробити поліолефін фоточутливим, до його складу додають сполуки – ініціатори фотохімічних реакцій (сенсibilізатори). Синтезують також сополімери поліолефінів із альдегідними та кетонними групами, що послаблюють молекулярний ланцюг або з карбонільними групами, які активно поглинають випромінювання [37–39].

У [39] вказано, що хімічна деградація – швидке розчинення деяких біополімерів у специфічних рідких хімічних середовищах (зокрема, лужних) на основі води. На наступному етапі за аналогією з фотодеградацією відбувається повне розкладення розчину полімеру шляхом перетравлювання мікроорганізмами. Наприклад, це відбувається в установках для біологічного очищення стічних вод.

Відома також деградація окремих біополімерів під дією кисню. В цьому випадку до складу звичайного полімеру додають спеціальну хімічну речовину – продеградант. Якщо полімерний виріб є в кисневій атмосфері, ця домішка через визначений час призводить до повного перетворення його молекулярної структури і робить придатним до поїдання бактеріями.

Власне, біодеградація – послідовне розірвання хімічних зв'язків молекулярного ланцюга полімеру



Рис. 1. Варіанти промислового позначення біопластиків

під дією ферментів мікроорганізмів. Руйнуючи полімер, бактерії, гриби або водорості використовують залишки його молекул як джерело життєво необхідних простих органічних сполук, а також для отримання енергії. Зазвичай біодеградація відбувається у водному або вологому середовищі в процесі так званого компостування. Відходи біопластику, подібно до опалого листя або інших органічних відходів, укладаються шарами на ґрунті і поступово перетворюються в екологічний матеріал.

Через велику кількість варіантів біорозкладних пластиків для їх ідентифікації у промисловості застосовують декілька позначок (рис. 1). Пластики, що компостуються та розкладаються у вологому середовищі, отримують позначку «compostable». Пластики, що розкладаються, зокрема, на відкритому повітрі, позначають як «biodegradable». Нарешті, деякі біорозкладні пластики, що є новими та властивості яких досліджені не досить, позначаються як інші («other») [40].

Здатність полімеру до біодеградації залежить, головним чином, від хімічного складу його молекулярного ланцюга. Він повинен бути гетероланцюговим і включати доступні до біорозкладу хімічні групи. Ланцюг не повинен включати фрагменти, що складаються з більше ніж п'яти груп CH_2 . Руйнуванню молекулярного ланцюга сприяє наявність в його структурі об'ємних заступників атомів водню з досить великим об'ємом. Можливе також включення в склад ланцюга природних органічних груп – крохмалю, целюлози, сечовини та подібних [41].

Біополімери з аморфною надмолекулярною структурою завжди розкладаються швидше, ніж напівкристалічні. Вочевидь, компактна структура кристалічних утворень у полімерах обмежує проникнення води та ферментів усередину молекулярної матриці, уповільнюючи процес розірвання ланцюгів. Швидкість біологічного розкладу полімеру суттєво зростає зі зменшенням його молекулярної ваги. Мікроорганізми живляться короткими олігомерами та мономерними групами, а довгі молекулярні ланцюги зазвичай залишаються стійкими до біологічних ферментів. Тому перед біодеградацією часто застосовується попереднє подрібнення молекулярних ланцюгів завдяки фотоокислювальним, термічним, хімічним або іншим процесам.

Деградація макрочастинок на фракції з меншою частинковою масою (наприклад, методами гідролізу, алкоголізу, сольволізу) сприяє сировинній переробці. Ці фракції повторно використовуються як мономери або сировина для виготовлення нових чи подібних хімічних продуктів. Полімерні композити підлягають переробці незалежно від виду використаного полімеру, наповнювачів чи домішок. Поданий метод не потребує сегрегації відходів на початку, їх очищення водою або усунення інших органічних речовин. Необхідність застосування складних установок високих температур і тиску, каталізаторів і докладний контроль параметрів переробки суттєво обмежують поширення цієї групи методів переробки [42].

Біополімер, що займає значне місце у промисловому виробництві – полігидроксibuтират (ПГБ) – біополімер, який за фізичними властивостями, подібний полістиролу, виявлений у бактерії *Alcaligenes eutropus*. ПГБ швидко руйнується ґрунтовими мікроорганізмами. Полімер отримують під час вирощування *Azotobacter* на глюкозі з лімітацією кисню, також *Alcaligenes* – під час дефіциту азоту в біологічно активному середовищі [42].

Природні компоненти, що утворені на основі пластичних мас – це пластмаси, що складаються з целюлози, крохмалю, протеїну та хітозану. Одноразовий посуд, плівки для пакування та сільськогосподарських потреб виготовляють на цих композиціях і т. д. Початковою сировиною для біохімічного процесу служить крохмаль (маїсовий, кукурудзяний, картопляний, злаковий) або меляса, одержувана під час виробництва цукру з цукрового буряка або цукрового очерету, а також деякі інші рослинні продукти, що містять гексозани [43].

У дослідженні важливе місце займає проблема надання властивостей гарно освоєним біорозкладаним малотоннажним полімерам промислового характеру (поліетилену, поліпропілену, полівінхлориду, полістиролу, поліетилентерефталату). В активному розробленні наявні такі напрями:

а) додавання до структури молекул, з функціональними групами у своєму складі, що сприяють полімерному фоторозкладанню;

б) кінцевим результатом є багатотоннажні полімери з біологічно руйнуючими натуральними добавками, що здатні в певний момент часу спровокувати розпад стрижневого полімеру [44].

в) спрямований синтез біодеградуємих пластичних мас на базі промислово орієнтованих штучних продуктів.

Біорозкладні полімери мають низку переваг:

– здатність обробки на стандартному устаткуванні подібна до звичайних полімерів;

– пропуск кисню та водяної пари є в низькому бар'єрі (оптимальному для використання в галузі харчової упаковки);

– у звичайних умовах стійкий до розкладання;

– за різних умов – як за спеціально створених, так і за природних – спостерігається швидка і повна розчинність, що сприяє безпроблемній утилізації відходів.

– нафтохімічна сировина не є основною.

Можливі сфери застосування ПГБ — це виготовлення біорозкладаних матеріалів для пакування і сформованих товарів, одноразових серветок, предметів для індивідуальної гігієни, плівки і волокна, водовідштовхуючого покриття для паперу та картону. Перше промислове виробництво кополімерів РНВ-РНВ організувала в 1980 році англійська фірма ICA під торговою маркою Biopol. Цей полімер характеризується відносною термостабільністю, пропусковими можливостями кисню, міцністю та стійкістю до агресивних хімікатів, якщо порівняти його з поліпропіленом [44].

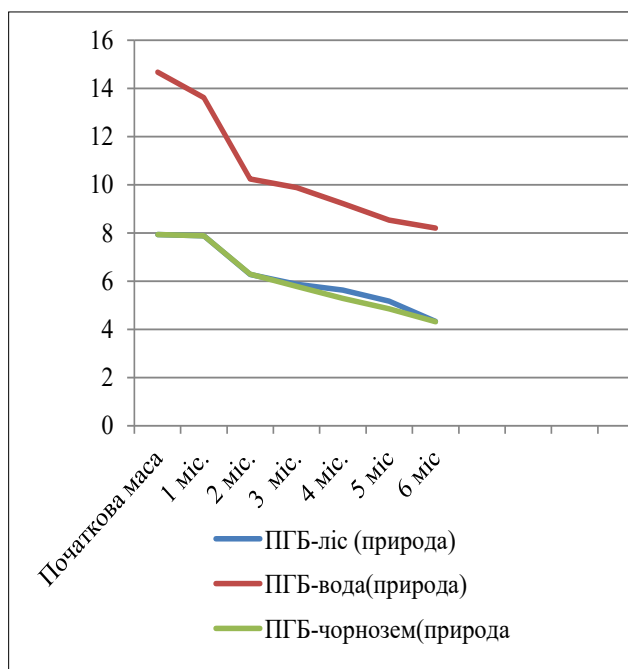


Рис. 2. Графік залежності розпаду полімеру ПГБ від виду ґрунту

У роботі представлено результати з дослідження біодеградації зразків із чистого полімеру типу ПГБ у природних умовах. Досліджувані зразки було поміщено у ґрунти різного складу (чорнозем, глинистий і піщаний). Експериментально було встановлено, що кислотність ґрунту не впливає на швидкість біодеструкції. А також досліджено, що зі збільшенням вологості ґрунту процес деструкції відбувається швидше.

Як видно із графіка (рис. 2), швидкість розпаду зразків у чорноземі більша ніж у глинистих ґрунтах, проміжне положення займає швидкість розпаду зразків ПГБ у піщаному ґрунті.

Наступний етап у дослідженні є формування зварних швів і дослідження їх розпаду порівняно з основним матеріалом.

Головні висновки. Отже, під час дослідження літературних джерел було встановлено, що для екологічної безпеки є необхідність у заміненні звичайних полімерів на біорозкладні. Оскільки значна кількість полімерів використовується саме як упакування, то подальші дослідження у формуванні зварних з'єднань є актуальним. На цьому етапі використання біополімерів є більш перспективним, ніж звичайних полімерів, у яких дуже великий період розпаду.

Література

1. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. 4-е изд., перер. и дополн. Москва : Научный мир, 2007. 576 с.
2. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. Москва : Химия, 1991
3. Бордюк М.А., Волошин О.М., Колупаев Б.С., Липатов Ю.С. *УФЖ*. 1996. 41, № 4. С. 438–441.
4. Бордюк Н.А., Колупаев Б.С., Волошин О.М. *Физика и техника высоких давлений*. 1995. № 3. С. 49–58.
5. Кравченко С. Мониторы завтрашнего дня. 1999. *Chip*. №11. С. 24–26.
6. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта. Москва : Машиностроение, 1998. 448 с.
7. Кулезнев В.Н. Основы технологии переработки пластмасс / под ред. В.Н. Кулезнёва и В.К. Гусева. Москва : Химия, 2006. 726 с.
8. Переработка полимерных композиционных материалов / В.А. Пахаренко, Р.А. Яковлева, А.В. Пахаренко. Киев : Изд. комп. «Воля», 2006. 552 с.
9. Технология переработки полимерных та композиційних матеріалів: підручник / О.В. Суберляк, П.І. Баштанік. Львів : Вид-во «Растр-7», 2007. 376 с.
10. Конструкционные полимерные композиты : учеб. пособие / Н.А. Адаменко, А.Ф. Фетисов, Г.В. Агафонова. Волгоград : ВГТУ, 2010. 99 с.
11. Бордюк М.А., Волошин О.М., Колупаев Б.С., Липатов Ю.С. *УФЖ*. 1996. 41, № 4. С. 438–441.
12. Бордюк Н.А., Колупаев Б.С., Волошин О.М. *Физика и техника высоких давлений*. 1995. №3. С. 49–58.
13. Колупаев Б.С., Бордюк М.А., Липатов Ю.С. Доп. НАН України. 1995. № 8. С. 112–114.
14. Кравченко С. Мониторы завтрашнего дня. *Chip*. 1999. №11. С. 24–26.
15. Воловик Л.С., Ковалевська Є.І., Манк В.В., Мірошников О.М. та ін. Колоїдна хімія. Київ, 1999.
16. Фізична хімія : навч. посібник / Є.І. Ковалевська та ін. Київ : ІСОО, 1995.
17. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика : учеб.пособие / Г.К. Лобачев, В.Ф. Желтобрюхов, Л.И. Кутянин, Н.И. Перминова. Волгоград, 1999. 180 с.
18. Биоразлагаемые полимеры – новый класс полимерных аналогов. *Отраслевой сервер*. URL: <http://www.Unipak.ru>. Спец. выпуск «Всё о плёнках». Декабрь 2004.
19. ISOStandart14855–1. 2005. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions –Method by analysis of evolved carbon dioxide – Part 1: General methodISO International.
20. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для вузов / В.М. Потехин, В.В. Потехин. Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2017. 943 с. 978-5-93808-287-8. URL: <http://www.iprbookshop.ru/67346.html>.
21. David A. Bell, Brian F. Towler, Maohong Fan. *Coal Gasification and Its Application*. Elsevier Inc., 2011, 399 p.
22. Sadeghebeigi R. *Fluid Catalytic Cracking Handbook. Design, Operation and Troubleshooting of FCC Facilities*. Butterworth-Heinemann, 2000. 384 p.
23. Переработка тяжелых нефтей, нефтяных остатков и отходов / Е.К. Онгарбаев, Е.О. Досжанов, З.А. Мансуров. Алматы : Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 2011. 256 с. 978-601-247-355-1.
24. Платэ Н.А., Сливинский Е.В. Основы химии и технологии мономеров : учеб. пособие Москва : Наука, 2002. 696 с.

25. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 2017. 784 с.
26. Киреев В.В. Высокомолекулярные соединения : учебник в 2 ч. Ч. 1. Москва : Юрайт, 2016. 366 с.
27. Киреев В.В. Высокомолекулярные соединения : учебник. Москва : Юрайт, 2015. 602 с.
28. Нефть и газ. Технологии и продукты переработки : монография / В.Е. Агабеков, В.К. Косяков. Минск : Белорусская наука, 2011. 459 с. 978-985-08-1359-6.
29. Химическая технология переработки газового сырья. Производство мономеров из газового сырья : учеб. пособие / Р.А. Ахмедьянова, А.Г. Лиакумович. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2015. 181 с. 978-5-7882-1704-8.
30. Гетьманчук Ю.П., Братичак М.М. Хімія та технологія полімерів. Львів : ВЦ «Бескид Біт», 2006. 496 с.
31. Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения : учеб. для вузов Москва : Академия, 2003. 368 с.
32. Физикохимия полимеров / А.М. Кочнев, А.Е. Заикин. Казань : Изд-во «ФЭН», 2003. 512 с.
33. Mamunya Ye., Iurzhenko M., Lebedev E., Levchenko V., Chervakov O., Matkovska O., Sverdlyakovska O. Electroactive polymeric materials. 2013, Alpha Reklama, Kyiv, Ukraine. 398 p.
34. Akiyama M., Tsuge T., Doi Y.: Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. *Polymer Degradation and Stability*. 80. P. 183–194 (2003). DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00400-7.
35. Sudesh K., Gan Z., Maehara A., Doi Y.: Surface structure, morphology and stability of polyhydroxyalkanoate inclusions characterized by atomic force microscopy. *Polymer Degradation and Stability*. 77. P. 77–85 (2002). DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00081-2.
36. Jacquelin N., Lo C.-W. (2008) Isolation and purification of bacterial poly (3-hydroxy alkanoates). *Biochemical Engineering Journal*. 39 (1). P. 15–27. DOI: 10.1016/j.bej.2007.11.029.
37. Al-Majed A.A.; Abd-Allah A.R.; Al-Rikabi A.C.; Al-Shabanah O.A. & Mostafa A.M. (2013). Effect of oral administration of Arabic gum on cisplatin-induced nephrotoxicity in rats. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*. Vol. 17. No. 3 (January 2013). P. 146–153. ISSN: 1099-0461.
38. Jiang X., Ramsay J. A., Ramsay B. A.: Acetone extraction of mcl-PHA from *Pseudomonas putida* KT2440. *Journal of Microbiological Methods*, 67. P. 212–219 (2006). DOI: 10.1016/j.mimet.2006.03.015.
39. Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices / N. Amanat, N.L. James, D.R. McKenzie // *Medical Engineering and physics*. 2010. Vol. 32. P. 600–699. DOI: 10.1021/ie9707432.
40. Rydz J., Wolna-Stypka K., Adamus G., Janeczek H., Musioł M., Sobota M., Marcinkowski A., Krzan A., Kowalczyk M. (2015) Forensic engineering of advanced polymeric materials. Part 1 – degradation studies of polylactide blends with atactic poly[(R,S)-3-hydroxybutyrate] in paraffin. *Chem Biochem Eng Quart* 29. P. 247–259.
41. Караев Р.Ф. Сварка пластмасс : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УПИ, 2008. 138 с.
42. Maximilian Brosda, Phong Nguyen, Alexander Olowinsky, Arnold Gillner. Laserwelding of biopolymers. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 74. P. 548–552. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.116>.
43. Karla Enid Lebron, Iowa State University. Interfacial healing and transport phenomena modeling of biopolymers. 2017.
44. Hanuma Reddy Tiyyagura, Tamilse Ivan Mohan, Snehashis Pal, Mantravadi Krishna Mohan. 9 – Surface modification of Magnesium and its alloy as orthopedic biomaterials with biopolymers. *Fundamental Biomaterials: Metals Woodhead Publishing Series in Biomaterials*. 2018. P. 197–210. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102205-4.00009-X>.