

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТОВАРОЗНАВСТВА

УДК 678.5

Доманцевич Н. І.,

nina.domantzevich@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6157-7079,

Researcher ID: F-3069-2019,

*д.т.н., проф., професор кафедри товарознавства, митної справи та управління якістю,
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів*

Яцишин Б. П.,

bogdan.yatsyshyn7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6762-2646,

д.т.н., проф., професор кафедри,

Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

СТАРІННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У РІЗНИХ УМОВАХ СКЛАДУВАННЯ ТА ПІД ДІЄЮ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація. У статті проведено розширений аналіз змін фізичних властивостей поліетиленових плівок із невеликим (до 10 ваг. %) вмістом додатків – летких інгібіторів атмосферної корозії металів на основі амінів, пластифікаторів, екрануючих стабілізаторів та технологічних інгредієнтів, що становить значний науковий інтерес. Метою роботи було дослідження впливу умов складування та УФ-опромінення на характеристики модифікованих поліетиленових плівок і визначення номінальних термінів захисної здатності полімерного матеріалу для зберігання металовиробів. Для всіх досліджень полімерних плівок, що перебували в умовах впливу природного середовища чи у камері штучної погоди, встановили відхилення характеристик модифікованих зразків від першопочаткових за механічними, за дифузійними характеристиками (киснепроникність, паропроникність) та за змінами оптичних та спектральних характеристик. Розглянуто особливості перебігу процесу зміни бар'єрних властивостей полімерних матеріалів протягом різних сезонних періодів за відкритого складування. Окремо проаналізовано вплив УФ-опромінення. У ході дослідження встановлено, що для умов відкритого складування, модифікування матеріалу полімерних плівок з метою надання антикорозійних властивостей невеликою кількістю додатків може приводити до значних відхилень вихідних характеристик деяких зразків, аж до повного руйнування бар'єрного захисту. Проведено порівняння величин розкиду виміряних значень паропроникності у модифікованих поліетиленових плівок за умов відкритого та закритого складського зберігання та у залежності від складу матеріалу. Аналіз дії умов складування модифікованих поліетиленових плівок на зміну фізико-механічних характеристик дав можливість визначити порядок експлуатації отриманих матеріалів. Зроблено висновок, що шляхом використання незначної кількості додатків – інгібіторів атмосферної корозії до матеріалу пакувальних плівок, призначених для захисту та консервації металовиробів, – можна змінювати умови та терміни їх гарантованого зберігання.

Ключові слова: полімери, поліетиленові плівки, фізико-механічні та хімічні характеристики, фактори впливу, старіння.

Domantsevych N. I.,

nina.domantzevich@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6157-7079,

Researcher ID: F-3069-2019,

Doctor of Engineering, Professor, Professor at the Department of Commodity Science,

Customs Affairs and Quality Management,

Lviv University of Trade and Economics, Lviv

Yatsyshyn B. P.,

bogdan.yatsyshyn7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6762-2646,

Doctor of Engineering, Professor, Professor at the Department,

Lviv University of Trade and Economics, Lviv

AGING OF POLYMER MATERIALS IN DIFFERENT STORAGE CONDITIONS AND UNDER THE EFFECT OF LIGHT RADIATION

Abstract. *The article carries out an extended analysis of changes in the physical properties of polyethylene films with a small (up to 10 wt. %) content of additives – volatile inhibitors of atmospheric corrosion of metals based on amines, plasticizers, shielding stabilizers, and technological ingredients, which is of considerable scientific interest. The purpose of the article was to study the influence of storage conditions and UV-irradiation on the characteristics of modified polyethylene films and to determine the nominal terms of the protective capacity of the polymer material for storing metal products. For all studies of polymer films that were exposed to the natural environment or in an artificial weather chamber, deviations of the characteristics of the modified samples from the original ones were established in terms of mechanical, diffusion characteristics (oxygen impermeability, vapor permeability) and changes in optical and spectral characteristics. The peculiarities of the process of changing the barrier properties of polymeric materials during different seasonal periods during open storage are considered. The influence of UV radiation was analyzed separately. In the course of the study, it was determined that for open storage conditions, modifying the material of polymer films in order to provide anti-corrosion properties with a small number of applications can lead to significant deviations in the initial characteristics of some samples, up to the complete destruction of the barrier protection. A comparison of the spread of the measured values of vapor permeability of modified polyethylene films under conditions of open and closed warehouse storage and depending on the composition of the material was carried out. Analysis of the effect of storage conditions of modified polyethylene films on changes in physical and mechanical characteristics made it possible to determine the order of usage of the obtained materials. It was concluded that by using a small number of additives – atmospheric corrosion inhibitors to the material of packaging films intended for the protection and conservation of metal products – it is possible to change the conditions and terms of their guaranteed storage.*

Key words: polymers, polyethylene films, physical and chemical characteristics, influence factors, aging.

JEL Classification: L69

DOI 10.32782/2522-1221-2024-37-02

Постановка проблеми. В умовах сьогодення полімерні матеріали широко використовують як пакувальні. При упакуванні виробів із металів у полімерні плівки останні суттєво впливають на збереження їх вихідних характеристик. Проблеми зміни властивостей полімерних матеріалів у процесі старіння вимагають більш широкого вивчення внаслідок постійної модифікації цих матеріалів, застосування нових видів додатків та інгредієнтів, що незначно змінюють структуру та властивості матеріалів, проте у значній мірі переінакшують часові рамки проходження деструкційних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення факторів старіння та їх вплив на фор-

мування споживних властивостей та якості полімерних матеріалів знайшли розвиток у роботах багатьох науковців, а саме: Феллера Р. Л. [1], Янга Р. [2], Ходжі Я. М. [3], Гольдаде В. А. та групи вчених [4], Брауна і Дж. Г. Грінвуда [5], Харвея Дж. А. [6].

Перебіг процесів фотодеструкції та фотоокиснення вважається основним напрямком у вивченні деградації структури та властивостей полімерів під час старіння. Зацікавленість до даного питання була посилена з вивченням змін властивостей полімерних виробів, спричинених дією агентів природного середовища, комплексною дією багатьох агентів старіння, а освітлення та тепло супро-

воджували інші чинники. Для виділення дії фотодеструкційних агентів створено устаткування та розроблено методи досліджень, які описані у роботах Я. Рабека [7-8], Г. Випича [9], Дж. В. Чіна [10], Р. Л. Грея та групи вчених [11].

На даний час усі роботи з вивчення природного старіння полімерних матеріалів проводяться за трьома напрямками, які визначені стандартами ISO (Міжнародної організації зі стандартизації), CEN (Європейського комітету зі стандартизації), IEC (Міжнародної електротехнічної комісії), ASTM (Американського товариства з випробувань матеріалів) та SAE International (Міжнародного співтовариства автотранспортних інженерів), а саме:

а) методики створення умов досліджень у природному середовищі, підготовки зразків, схеми й обробки результатів вимірювання;

б) методики проведення досліджень у штучно створеному середовищі;

в) розроблення та вдосконалення методик дослідження з окремих розділів властивостей, які беруться за основу у визначенні деструктивних процесів та зміни характеристик.

Основним правилом, яке слід застосовувати під час вибору того чи іншого стандарту, є використання визнаних методик та процедур випробувань, а також можливість відтворити умови досліджень та експериментів [12]. Повний перелік нормативних документів із цієї тематики поданий у роботі [13].

Постановка завдання. Метою роботи було дослідження впливу процесів старіння на характеристики поліетиленових плівкових матеріалів, модифікованих невеликою кількістю (до 10 ваг. %) додатків інгібіторів атмосферної корозії металів, пластифікаторів та стабілізаторів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вихідним матеріалом для виготовлення виробів був гранулят поліетилену низької густини LDPE 15803-020. Модифікуючі добавки та деякі технологічні інгредієнти (до 10 ваг. %) вводили безпосередньо у гранулят перед екструзією, забезпечуючи найбільш можливо рівномірний розподіл модифікуючих компонент. Добавки у вигляді інгібіторів атмосферної корозії вибирались у першу чергу з точки зору високої ефективності їх дії при захисті металевої поверхні, широкого температурного інтервалу застосування, величини тиску насиченої пари та низьких токсичних властивостей, а лише пізніше – сумісності з іншими компонентами та матрицею. Як інгібітори атмосферної

корозії використовувалися матеріали амінного типу: метанітробензоат гексаметилендіаміну ($\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2 \cdot \text{HOOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NO}_2$ (м-), відомого під промисловою назвою Г-2, нітрит дициклогексиламіну ($\text{C}_6\text{H}_{11})_2\text{NH} \cdot \text{HNO}_2$ – НДА, циклогексиламін бензоату ($\text{C}_6\text{H}_{11})\text{NH}_3^+ \cdot (\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-)$ – ЦГАБ, дициклогексиламін бензоату ($\text{C}_6\text{H}_{11})_2\text{NH}_2^+ \cdot (\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-)$ – ДЦГАБ, нітрит дициклогексиламіну ($\text{C}_6\text{H}_{11})_2\text{NH} \cdot \text{HNO}_2$ – НДА).

З метою полегшення переробки і сприяння суміщенню інгібіторів із основою до складу полімерної матриці вводилися пластифікатори: дибутилфталат $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOC}_4\text{H}_9)_2$ – ДБФ, диоктилфталат $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOC}_8\text{H}_{17})_2$ – ДОФ, диоктилсебацінат ($\text{H}_4\text{C}_2\text{OOC}(\text{CH}_2)_8\text{COOC}_2\text{H}_5$) – ДОС та ди-2-етилгексилфталат ($\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$) – ДЕГФ.

У модифіковані поліетиленові покриття вводили як захист полімеру від впливу світла екрануючий стабілізатор – порошковий алюміній Al. Крім цього, у склад шихти додавали до 1 ваг. % додатки для ковзкості типу “сліп” на основі олеаміду для забезпечення технічних параметрів виробництва.

Зразки поліетиленових тонкоплівкових матеріалів із додатками виготовляли на промисловому рукавно-плівковому агрегаті типу ЛРП. Товщина полімерних плівок перебувала у діапазоні від 120 мкм до 170 мкм.

Дослідженнями полімерних плівок, що знаходилися в умовах впливу природного середовища чи у камері штучної погоди, встановили відхилення характеристик модифікованих зразків від першопочаткових за механічними властивостями (напруженість при розриванні $\sigma_{\text{рр}}$ за дифузійними характеристиками (киснепроникність, паропроникність тощо) та за змінами оптичних та спектральних характеристик [11–19]. Головним маркером цих змін виступають дифузійні характеристики, відносно яких можна судити про стан плівкового покриття та можливу набуту дефектність, ранні етапи руйнування. Правильність трактування результатів вимірювань встановлюється з допомогою електронної мікроскопії та ІЧ-спектроскопії [20–24].

Встановлено, що захисні характеристики полімерних плівок значно змінюються за перебування у природному середовищі (в умовах відкритого складування), виявляючи залежності від виду, часу та періоду дії основних агентів старіння (УФ-випромінювання, окиснення, впливу агресивного зовнішнього середовища, вивітрювання, вимивання тощо), а також від виду та кількості речовини-модифікатора (рис. 1).

Використовуючи результати попередніх досліджень [13, 15–17, 19], з'ясовано, що перебування немодифікованих поліетиленових плівок при відкритому складуванні незначною мірою змінює їх вихідні характеристики з паропроникності. Перебування немодифікованих зразків під дією УФ-опромінення протягом 200 год. суттєво підвищує значення показників WVTR. Аналогічні результати були встановлені для інгібованих плівок, проте при УФ-опроміненні значення показників паропроникності виявилися нижчими. Зразки матеріалів із пластифікаторами мали нижчі величини паропроникності на всіх напрямках досліджень за мінімальними значеннями та більші – за максимальними значеннями показника WVTR за осінній та весняний період відкритого складування. Модифіковані плівки, які містили інгібітор, пластифікатор та наповнювач, у свою чергу, продемонстрували значний розкид показників паропроникності, а після весняного відкритого складування у них фіксувалися значно вищі показники WVTR.

Загалом за незначних термінів природного старіння (2 місяці осіннього чи весняного періоду при відкритому складуванні) поліетиленові плівки, до складу яких був введений амінний інгібітор атмосферної корозії, мали нижчі значення початкових показників паропроникності WVTR, ніж у немодифікованих поліетиленових плівок [19]. Різниця значень показників паропроникності для пластифікованих полімерних матеріалів може свідчити про значний вплив УФ-опромінення, яке протягом весняного періоду значно інтенсивніше та триваліше. Плівки, модифіковані пластифікаторами та світловідбиваючим матеріалом (порошком алюмінію), мали значно нижчі значення показників паропроникності порівняно з немодифікованими зразками.

Початкові етапи старіння поліетиленових плівок із додатками (до 1 року закритого складського зберігання) приводять до меншої зміни показників паропроникності порівняно з аналогічними початковими етапами, які проходять у природних умовах (рис. 2).

Інтенсивність змін бар'єрних характеристик інгібованих поліетиленових плівок в умовах закритого складського зберігання значно зростає при збільшенні тривалості досліджень, а для інгібованих та модифікованих плівок показники WVTR після 6-10 років складування значно перевищують набуті значення для плівок, що знаходилися у природних умовах протягом 2-х місяців.

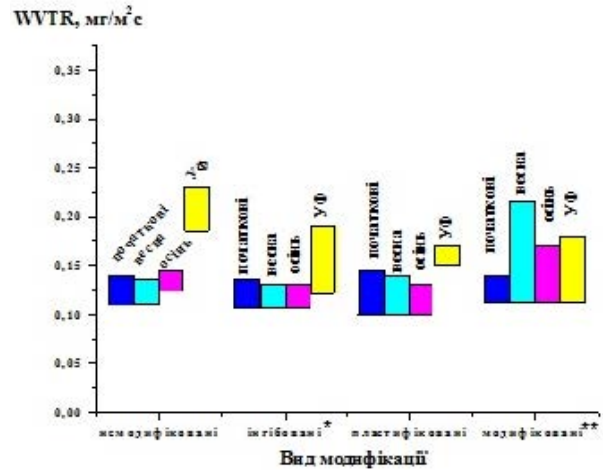


Рис. 1. Порівняльна схема змін величин паропроникності (максимальні та мінімальні значення) поліетиленових плівок залежно від умов відкритого складування та складу (наявності додатків та наповнювачів) за результатами досліджень і даних робіт [13, 15–17, 19], h = 120–170 мкм:

* Крім плівок із інгібітором Г-2, паропроникність яких є значно нижчою на початкових етапах досліджень і стрімко зростає після дії агентів старіння;

** Крім плівок із порошковим алюмінієм як наповнювачем, величини паропроникності яких є значно нижчими.

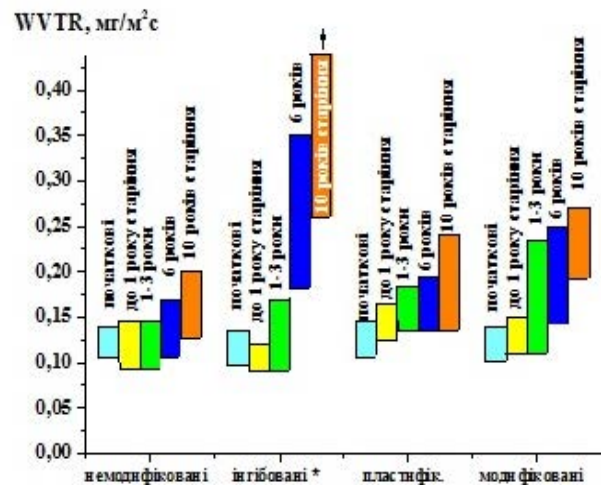


Рис. 2. Схематичне зображення величин розкиду виміряних значень паропроникності у модифікованих поліетиленових плівок за умов закритого складського зберігання та у залежності від складу матеріалу [13, 15–17]:

* Крім плівок із інгібітором Г-2, паропроникність яких є значно нижчою на початкових етапах досліджень і відзначається стрімким зростанням показників після 2 років складування.

Використання модифікованих поліетиленових плівок для захисту металовиробів обумовлене в основному двома причинами – можливістю виготовлення компактного пакування з матеріалу

з достатньо високими бар'єрними показниками та створенням в обмеженому просторі пакування додаткового захисту легкою хімічною речовиною, яка змінює (пасивує чи інгібує) поверхню металу парами. Втім, поєднання таких властивостей в одному полімерному продукті вимагає зусиль для встановлення рівноважної та сепаративної дії додатків, а також введення у матеріал-основу речовин, які не завжди сприяють підвищенню чи довготривалому збереженню інших фізико-механічних характеристик захисного матеріалу. У випадку введення у поліетилен легких амінних інгібіторів атмосферної корозії спостерігається незначне зменшення паропроникності на початкових етапах досліджень, особливо видиме до 1 року при закритому складуванні. Такі зміни сприймаються як наслідки миттєвого впливу інгібітора на структуру полімера, що стає більш кристалічною і, відповідно, менш проникною. Проте в подальшому ця дія інгібітора знівельовується внаслідок його незначної кількості (до 7 ваг. %) в матеріалі-основі [19]. Відповідно, у результаті невеликої кількості використаних інгібіторів їх дія на 2-5 рік на полімерну матрицю як амінних антиокислювачів може не розглядатись.

Пряма дія УФ-випромінювання чи фактори впливу відкритого складування (теплове нагрівання, вивітрювання, вимивання) інтенсивно зменшують кількість інгібітора у полімері та його парів у пакувальному просторі (рис. 3).

Проте залишковий ефект від першопочаткового впливу інгібітора на матрицю за закритого складування залишається у вигляді збільшення змін структури, що за подальшого старіння (більше 5-6 років) викликає схильність до кристалізації.

Збільшення кристалічності у поліетилені визначає автоматичне збільшення границь розділу аморфна-кристалічна фаза (пори, каверни, мікротріщини), зростання дефектності на межі розділу фаз, а при утворенні значних кристалічних агломератів – дефектності внаслідок нагромадження та стикування (великі тріщини, розриви), про що свідчить зростання показника WVTR за закритого більше 1 року складування [16]. У результаті обмеженого (до 2 місяців) часу досліджень за відкритого складування цей показник мало змінюється, хоча дослідження морфології поверхні таких об'єктів вказує на розвиток деструкційних процесів та вимивання елементів структури. Механічні характеристики таких дефектних тонкоплівкових матеріалів також падають [13, 14, 18].

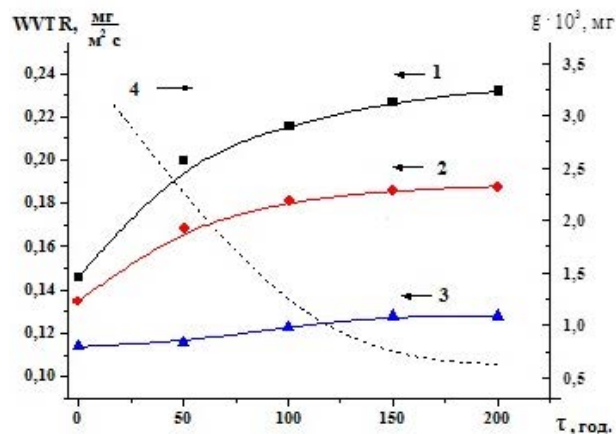


Рис. 3. Зміна показника паропроникності WVTR полімерних плівок (кінцеві вимірювання на 30 день стабілізації) та зміни: кількості g інгібітора за час УФ-опромінювання: 1 – ПЕНГ; 2 – ПЕНГ + 0,5 ваг. % НДА; 3 – ПЕНГ + 0,5 ваг. % Г-2); 4 – зниження кількості g інгібітора Г-2 у плівці складу ПЕНГ + 0,5 ваг. % Г-2 (полярографічне визначення) [13, 16, 19]

Для збереження бар'єрних та інгібуючих властивостей пакування у матеріал вводять додаткові компоненти – пластифікатори, стабілізатори, термо- та екранні стабілізатори та інші технологічні додатки. Пластифіковані поліетиленові плівки мали збільшену початкову паропроникність внаслідок підвищення рухливості полімерних ланок. Проте у них стабілізувалися дифузійні властивості навіть в умовах дії УФ-опромінювання чи за значних часових термінів досліджень, причому окремі механічні характеристики (відносне видовження при розриванні σ_{pp}) зростали. Плівки, пластифіковані незначними додатками трансформаторного масла, втрачали прозорість за відкритого складування та були маслянистими і втрачали естетичні властивості за закритого довготривалого складування. Електронно-мікроскопічними дослідженнями таких плівок було зафіксовано вихід пластифікатора на поверхню плівок, часткове закриття наскрізних дефектів матеріалу, що, можливо, стало причиною зниження показників паропроникності [23, 24].

Матеріали з комплексним наповненням різнофункціональними речовинами отримали назву модифікованих. За певного підбору модифікуючих речовин можна було отримати поліетиленові плівки, які містили легкий інгібітор атмосферної корозії і в яких не виявлялися тенденційні для інгібованих плівок прояви до зниження дифузійних та механічних характеристик на початкових етапах досліджень (у свіжовиготовлених). При дослідженнях у весняний період відкритого скла-

дування (рис. 1), а також за тривалих досліджень закритого складування (рис. 2) у модифікованих плівок виявлявся ефект несумісності компонент (між собою) та з матрицею, що приводить до посилення дефектності покриття. Винятком були модифіковані поліетиленові плівки, які містили незначну кількість порошкового алюмінію, що слугував як укріплювач структури, наповнювач та екрануючий стабілізатор.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Шляхом використання незначної кількості додатків – інгібіторів атмосферної корозії до матеріалу пакувальних плівок, призначених для захисту та консервації металовиробів, – можна змінювати умови та терміни їх гарантованого зберігання. Введення у склад плівки речовин, які змінюють структуру, фізико-механічні та хімічні характеристики полімерної матриці, вимагає ретельного вивчення, визначення напрямків змін та встановлення відповідності певних модифікованих плівок умовам та часу складування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Feller R. L. Accelerated aging: photochemical and thermal aspects. 1994. Edwards Bros., Ann Arbor, Michigan. 292 p. URL: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/accelerated_aging.
2. Yang R. Status and challenge in aging research of polymer composites. *Polym. Mater. Sci. Eng.* 2015. № 31. P. 181-184. URL: https://www.researchgate.net/publication/281996441_Status_and_challenge_in_aging_research_of_polymer_composites.
3. Hodge I. M. Physical aging in polymer glasses. *Science: New Series.* 1995. 267 (5206). P. 1945–1947. URL: <http://www.jstor.org/stable/2886443>.
4. *Plastics for Corrosion Inhibition* / V. A. Goldade, L. S. Pinchuk, A. V. Makarevich, V. N. Kestelman. Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 2005. 393 p.
5. Roger P. Brown, John H. Greenwood Practical guide to the assessment of the useful life of plastics. Shropshire : Rapra Technology Limited, 2002. 194 p.
6. Harvey J. A. Chemical and physical aging of plastics. In “Handbook of Environmental Degradation of Materials” (ed. Myer Kutz) N.Y. : William Andrew Publishing, 2005. 612 p. P. 153-163.
7. Rabek J. F. Photostabilization of Polymers: Springer, 2011. 608 p.
8. Rabek J. F. Photodegradation of polymers: physical characteristics and applications. Springer, 1996. 209 p. DOI: 10.1007/978-3-642-80090-0.
9. Wypych G. Handbook of UV degradation and stabilization. Second edition. Toronto : ChemTec Publishing, 2015. 412 p.
10. Chin J. W. Durability of composites exposed to ultraviolet radiation. In “Durability of composites for civil structural applications” (ed. V. M. Karbhari). Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2007. P. 80-97. URL: www.woodheadpublishing.com.
11. Robert L. Gray, Robert E. Lee, Brent M. Sanders Aging conditions' effect on UV durability. In “Weathering of plastics: Testing to mirror real life performance” ed. by G Wypych. N.Y. : Plastics Design Library, 1999. 331 p. P. 69-76.
12. A review of accelerated durability tests / R. P. Brown, D. Kockott, P. Trubiroha, W. Ketola, J. Shorthouse (Ed. R. P. Brown). VAMAS Report No. 18 (September 1995). Middlesex : National Physical Laboratory, 1995. P. 44. URL: http://www.vamas.org/documents/twa12/vamas_twa12_report_18.pdf
13. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Старіння полімерних матеріалів: фактори впливу, методи дослідження, моделювання та прогнозування процесів : монографія. Львів : Видавництво Львівського торговельно-економічного університету, 2023. 184 с.
14. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Зміна механічних властивостей поліетиленових плівкових матеріалів при їх модифікації технологічними додатками та під час старіння. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2020. 21 (3). С. 510-518. DOI: 10.15330/pcss.21.3.510-518
15. Доманцевич Н. І. Інгібіторний захист промислової продукції : монографія. Львів : Видавництво Львівської комерційної академії, 2003. 160 с.
16. Аксіментьєва О. І., Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Дифузійні характеристики тонкоплівкових полімерних матеріалів та методи їх вимірювання : монографія. Львів : Видавництво Львівського торговельно-економічного університету, 2018. 156 с.
17. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Паропроникність тонкоплівкових композитних матеріалів на основі поліетилену. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2019. 20 (3). С. 291-299.
18. Доманцевич Н. І. Вплив ультра-фіолетового опромінення на структуру та властивості модифікованих плівкових покриттів. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2000. 1 (2). С. 273-277.
19. Аксіментьєва О. І., Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Вплив УФ-випромінювання та атмосферних факторів на паропроникність тонкоплівкових модифікованих поліетиленових матеріалів. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2022. Т. 23, № 2. С. 216-221. DOI: 10.15330/pcss.23.2.216-221.
20. Скоробогатий Я. П., Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Старіння полімерних модифікованих матеріалів в умовах закритого складування і в природних кліматичних умовах. *Хімічна промисловість України.* 2002. № 1. С. 32-34.
21. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Структурно-та дефектоутворення при довготривалому старінні інгібованих полімерних плівок. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2003. Т. 4, № 2. С. 323-328.
22. Stuart B. H. Infrared spectroscopy : fundamentals and applications. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. 244 p.

23. Domantsevich N., Aksimentyeva O., Yatsyshyn B. Structura and properties of the modified polyethylene films. *Current trends in commodity science. Packaging: Zeszyty naukowe*. 186. Poznan : Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego. 2012. P. 67-75.

24. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П., Криль М. М. Полімерні пакувальні плівки спеціального призначення. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2018. № 20. С. 5–20.

REFERENCES:

1. Feller, R. L. (1994), Accelerated aging: photochemical and thermal aspects. Edwards Bros., Ann Arbor, Michigan. 292 p., available at: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/accelerated_aging.

2. Yang R. (2015), Status and challenge in aging research of polymer composites. *Polym. Mater. Sci. Eng.*, № 31, p. 181-184, available at: https://www.researchgate.net/publication/281996441_Status_and_challenge_in_aging_research_of_polymer_composites.

3. Hodge, I. M. (1995), Physical aging in polymer glasses. *Science: New Series*, 267 (5206), r. 1945-1947, available at: <http://www.jstor.org/stable/2886443>.

4. *Plastics for Corrosion Inhibition* / V. A. Goldade, L. S. Pinchuk, A. V. Makarevich, V. N. Kestelman (2005), Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 393 p.

5. Roger P. Brown, John H. (2002), Greenwood Practical guide to the assessment of the useful life of plastics. Shropshire : Rapra Technology Limited, 194 p.

6. Harvey, J. A. (2005), Chemical and physical aging of plastics. In "Handbook of Environmental Degradation of Materials" (ed. Myer Kutz) N.Y. : William Andrew Publishing, 612 p. P. 153-163.

7. Rabek, J. F. (2011), Photostabilization of Polymers: Springer, 608 p.

8. Rabek, J. F. (1996), Photodegradation of polymers : physical characteristics and applications. Springer, 209 p. DOI: 10.1007/978-3-642-80090-0.

9. Wypych G. (2015), Handbook of UV degradation and stabilization. Second edition. Toronto : ChemTec Publishing, 412 p.

10. Chin, J. W. (2007), Durability of composites exposed to ultraviolet radiation. In "Durability of composites for civil structural applications" (ed. V. M. Karbhari). Cambridge : Woodhead Publishing Limited, P. 80-97, available at: www.woodheadpublishing.com.

11. Robert L. Gray, Robert E. Lee, Brent M. (1999), Sanders Aging conditions' effect on UV durability. In "Weathering of plastics: Testing to mirror real life performance" ed. by G Wypych. N.Y. : Plastics Design Library, 331 p. P. 69-76.

12. A review of accelerated durability tests / R. P. Brown, D. Kockott, P. Trubiroha, W. Ketola, J. Shorthouse (Ed. R. P. Brown) (1995), v VAMAS Report No. 18 (September 1995). Middlesex : National Physical Laboratory, P. 44, available at: http://www.vamas.org/documents/twa12/vamas_twa12_report_18.pdf

13. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2023), Starinnia polimernykh materialiv: faktory vplyvu, metody doslidzhennia, modeliuвання ta prohnozuvannia protsesiv : monohrafiia. L'viv : Vydavnytstvo L'vivs'koho torhovel'no-ekonomichnoho universytetu, 184 s.

14. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2020), Zmina mekhanichnykh vlastyvostrykh polietylenovykh plivkovykh materialiv pry ikh modyfikatsii tekhnolohichnymy dodatkamy ta pid chas starinnia, *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, 21 (3), s. 510–518. DOI: 10.15330/pccs.21.3.510-518

15. Domantsevych, N. I. (2003), Inhibitornyy zakhyst promyslovoi produktsii : monohrafiia. L'viv : Vydavnytstvo L'vivs'koi komertsijnoi akademii, 160 s.

16. Aksiment'ieva, O. I. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2018), Dyfuzijni kharakterystyky tonkoplivkovykh polimernykh materialiv ta metody ikh vymiriuvannia : monohrafiia. L'viv : Vydavnytstvo L'vivs'koho torhovel'no-ekonomichnoho universytetu, 156 s.

17. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2019), Paropronyknist' tonkoplivkovykh kompozytnykh materialiv na osnovi polietylenu, *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, 20 (3), s. 291-299.

18. Domantsevych, N. I. (2000), Vplyv ul'tra-fioletovoho oprominennia na strukturu ta vlastyvostry modyfikovanykh plivkovykh pokryt'. *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, 1 (2), s. 273-277.

19. Aksiment'ieva, O. I. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2022), Vplyv UF-vyprominiuvannia ta atmosferynykh faktoriv na paropronyknist' tonkoplivkovykh modyfikovanykh polietylenovykh materialiv. *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, T. 23, № 2, s. 216-221. DOI: 10.15330/pccs.23.2.216-221.

20. Skorobohatyj, Ya. P. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2002), Starinnia polimernykh modyfikovanykh materialiv v umovakh zakrytoho skladuvannia i v pryrodnykh klimatychnykh umovakh. *Khimichna promyslovist' Ukrainy*, № 1, s. 32-34.

21. Domantsevych, N. I. and Yatsyshyn, B. P. (2003), Strukturo- ta defektoutvorennia pry dovhotryvalomu starinni inhibovanykh polimernykh plivok. *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, T. 4, № 2, s. 323-328.

22. Stuart, B. H. (2004), Infrared spectroscopy : fundamentals and applications. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 244 p.

23. Domantsevich N., Aksimentyeva O. and Yatsyshyn B. (2012), Structura and properties of the modified polyethylene films. *Current trends in commodity science. Packaging: Zeszyty naukowe*. 186. Poznan : Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego. P. 67-75.

24. Domantsevych, N. I. Yatsyshyn, B. P. and Kril', M. M. (2018), Polimerni pakuval'ni plivky spetsial'noho pryznachennia. *Visnyk L'vivs'koho torhovel'no-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, № 20, s. 5-20.

*Стаття надійшла до редакції
11 грудня 2023 року*