

УДК 628.16:577.16:66.095.5
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/29>

Павловський Д.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Левандовський І.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА СТРУКТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ВИРОБІВ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ І ПОЛІКАРБОНАТУ ПІД ДІЄЮ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі проведено комплексне дослідження процесів первинної деградації полімерних матеріалів, що застосовуються у виробництві споживчої тари, зокрема поліпропілену (PP) та полікарбонату (PC). Основною метою дослідження було визначення стабільності цих полімерів під впливом водного середовища та зовнішніх факторів, які моделюють умови їх зберігання і використання. Такі дослідження є актуальними з огляду на зростаючу увагу до екологічної безпеки матеріалів та необхідність оцінки потенційних ризиків, пов'язаних із деградацією полімерних упаковок у побутових і промислових умовах. Важливою частиною дослідження стало вивчення вивільнення мікро- та наночастинок з поверхні полімерів, оскільки такі фрагменти можуть становити значну екологічну загрозу та впливати на здоров'я людини. Для оцінки кількісних і якісних характеристик вивільнених частинок був застосований метод динамічного світлорозсіювання (DLS). Результати аналізу засвідчили наявність частинок у широкому діапазоні розмірів – від 3,6 до 3000 нанометрів, із високим показником полідисперсності ($PDI > 0,7$), що вказує на суттєву гетерогенність продуктів деградації. Така полідисперсність свідчить про складний характер руйнування полімерів і наявність як дрібних наночастинок, так і більших мікрочастинок у середовищі. Додатково для морфологічного дослідження поверхні зразків до і після експозиції використовувався метод скануючої електронної мікроскопії (SEM). Отримані зображення підтвердили формування нано- та мікрочастинок пластику, які утворилися в процесі імітації експлуатації тари. Візуалізація поверхні показала значне пошкодження поліпропіленових зразків, з появою тріщин і вибоїн, що свідчить про їхню високу схильність до деструктивних змін у заданих умовах. Натомість полікарбонат демонстрував більш стійку структуру, з менш вираженими ознаками деградації. Разом із тим, полікарбонат має потенційно вищий токсикологічний ризик через можливе вивільнення органічних сполук, які можуть впливати на біохімічні процеси і мати небажані ефекти для організму людини і довкілля. Це підкреслює необхідність не лише оцінки механічної та структурної стабільності полімерних матеріалів, але й хімічних аспектів їх деградації.

Ключові слова: поліпропілен, полікарбонат, деградація, мікропластик, нанопластик, SEM, DLS, стабільність.

Постановка проблеми. Сучасна екологічна ситуація свідчить про стрімке зростання рівня забруднення навколишнього середовища мікро- та нанопластиком, що зумовлює підвищену увагу з боку науковців, медичних експертів, екологів і регуляторних органів. Основну частину таких частинок становить вторинний пластик, що утворюється внаслідок поступової деструкції полімерних матеріалів під впливом фізико-хімічних факторів, зокрема ультрафіолетового випромінювання, термічних коливань та механічних наванта-

жень. Серед найбільш поширених джерел мікропластику є побутові полімерні вироби – зокрема пластикові пляшки, включно з ємностями для дитячого харчування, які широко використовуються у повсякденному житті. Вивільнені в процесі експлуатації частинки можуть проникати в організм людини з питною водою, що викликає обґрунтовані занепокоєння щодо їх токсикологічного впливу [1–2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова спільнота переважно зосереджується на

дослідженнях, пов'язаних із виявленням та кількісною оцінкою мікропластику у водних середовищах або океанічних зразках. Водночас, значно менше уваги приділяється моделюванню умов експлуатації побутових полімерів та аналізу механізмів їх деградації. Також бракує системного підходу до порівняльного вивчення різних типів полімерів з позиції їх стабільності та екологічної безпечності [3–4]. Особливо відчутним є дефіцит міждисциплінарних досліджень, які б поєднували морфологічний аналіз поверхні матеріалів (SEM), нанометричну характеристику частинок, що вивільняються (DLS), та інтегральну оцінку їх екологічного ризику із застосуванням сучасних аналітичних підходів. Технічні складнощі виявлення нанопластикових частинок (особливо тих, що мають розміри <100 нм), відсутність адаптованих до реальних умов стандартів та недостатня інтеграція принципів «зеленої» хімії у дослідження полімерів – усе це гальмує об'єктивну оцінку їх безпечності. Існуючі методи рідко враховують специфіку експлуатаційного навантаження на полімери, як-от механічне очищення, повторне використання чи довготривале зберігання рідин.

У зв'язку з цим виникає необхідність у застосуванні комплексного підходу, який би поєднував мікроскопічну оцінку морфологічних змін полімерної поверхні, визначення розміру та полідисперсності частинок, що вивільняються, а також сучасні інструменти оцінки екологічності (greenness) досліджуваних матеріалів. Такий підхід ґрунтується на концепції зеленої аналітичної хімії, адаптованої до досліджень мікропластику та наноматеріалів.

Постановка завдання. Проведене дослідження має на меті комплексне вивчення пове-

дінки поліпропіленових і полікарбонатних пляшок у змодельованих умовах експлуатації. Отримані результати дозволили встановити, що поліпропілен, попри нижчу механічну стійкість, демонструє більш прийнятний екологічний профіль завдяки менш токсичному складу, що робить його потенційно безпечнішою альтернативою для пакування рідин.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень.

Перед початком експерименту пластикові пляшки піддавалися стандартній процедурі очищення, яка включала миття внутрішньої поверхні за допомогою води та м'якого йоржика (рис. 1). Після цього зразки ретельно ополіскували дистильованою водою з метою усунення залишків механічних домішок та мийних речовин. Очищені пляшки висушували при кімнатній температурі у чистих умовах. Після висушування пляшки наповнювали дистильованою водою та залишали у закритому стані на зберігання протягом 15 діб. Усі зразки зберігалися за контрольованих лабораторних умов: при кімнатній температурі, з обмеженим доступом світла, без впливу зовнішніх джерел тепла або механічного навантаження. Для фільтрування використовували фільтр із порами 0.2 мкм. Фільтр із осадом висушували. Далі проводили дослідження сканувальної електронної мікроскопії. Морфологічні особливості поверхні полімерних зразків після циклів експлуатації та миття були досліджені методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM). Зразки полімерів (полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP)) попередньо висушували в ексікаторі при кімнатній температурі, а далі фрагменти розміром 5×5 мм фіксували на алюмінієвих стубах з використанням

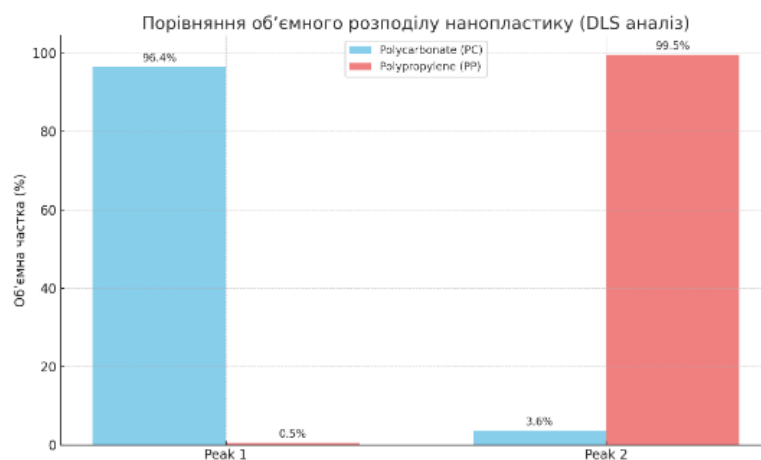


Рис. 1. Порівняння об'ємного розподілу нанопластикових частинок, вивільнених із пляшок з полікарбонату (PC) та поліпропілену (PP), за результатами DLS-аналізу

струмопровідної вуглецевої стрічки. Для покращення провідності поверхні зразки були напылені тонким шаром золота (~10 нм) у вакуумному напылювачі методом катодного розпылення. SEM-зображення отримували за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510LV при прискорювальній напрузі 10–20 кВ. Аналіз морфології дозволив виявити характерні дефекти, тріщини, ерозійні утворення та фрагментацію поверхні, що свідчить про процеси деградації матеріалу.

Для аналізу розподілу за розміром мікро- та нанопластикових часток, які вивільнялися з полімерної тари, застосовували метод динамічного розсіювання світла (DLS). Зразки води, що зберігалася у полімерних пляшках (PC і PP) протягом 15 діб після імітованого побутового миття, центрифугували (за потреби) при 4000 об/хв протягом 10 хв для осадження грубих домішок. Вимірювання проводили без попередньої фільтрації, щоб зберегти повний профіль частинок. DLS-аналіз проводили на приладі Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments) з довжиною хвилі лазера 633 нм при температурі 25 °С.

Отримані експериментальні результати.

Згідно з отриманими експериментальними даними, встановлено, що поліпропілен (PP) за умов моделювання побутової експлуатації демонструє вищу схильність до деградаційних процесів порівняно з полікарбонатом (PC). Результати аналізу вказують на те, що поліпропіленові пляшки вивільняють мікро- та нанопластикові частинки швидше та в більших кількостях, що підтверджується значною інтенсивністю сигналів при DLS-аналізі водних екстрактів. Такий ефект може бути зумовлений меншою хімічною інертністю PP, а також його нижчою термостабільністю, що сприяє руйнуванню полімерних ланцюгів під дією механічних навантажень та температурних коливань (Рис. 1). При багаторазовій механічній обробці (миття, стирання) поліпропілен виявив вищий рівень деструкції, ніж PC, що узгоджується з відомими фізико-хімічними властивостями цих матеріалів. Динамічне світлорозсіювання (DLS) екстрактів води, що зберігалась у дослідних зразках, виявило високі значення індексу полідисперсності ($PDI > 0.7$) як для PP-, так і для PC-пляшок, що вказує на широкий спектр розмірів частинок, які були вивільнені в рідину.

Це свідчить про наявність у системі як нанорозмірних (3,6–120 нм), так і мікророзмірних частинок (до 994–3777 нм), що можуть формувати агрегати або кластери (рис. 2). Такий двомодальний розподіл є характерною ознакою прогресу-

ючого процесу фрагментації полімеру, внаслідок якого утворюються як первинні наночастинки, так і вторинні укрупнені структури. Особливу увагу заслуговує наявність частинок у нанорозмірному діапазоні, які, ймовірно, утворюються на ранніх стадіях руйнування полімерної матриці. Цей процес передбачає поступовий розрив ковалентних зв'язків у полімерному ланцюгу з утворенням стабільних низькомолекулярних фрагментів, що зберігають здатність до тривалого зваженого перебування у водному середовищі. Отримані результати DLS були додатково підтверджені за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), яка дозволила візуалізувати наночастинки та мікрочастинки, що вивільнилися в процесі чищення та осіли на фільтрі (рис. 2). Скануюча електронна мікроскопія залишкового сухого осаду після випаровування водного розчину, утвореного внаслідок інтенсивного очищення пластикових пляшок з поліпропілену (PP), виявила різноманітні за формою та розміром частинки мікропластику (рис. 3 та рис. 4). Зображення свідчать про наявність фрагментів із нерівною, шорсткою поверхнею, які мають гострі краї та численні тріщини, що характерно для матеріалів, зазнали механічного і хімічного руйнування. Частинки переважно неправильних, асиметричних форм із вираженими ребрами та вигинами, що вказує на їх фрагментовану природу. Розмірний діапазон частинок варіювався від кількох мікрометрів до кількох сотень мікрометрів. Спостерігалися як великі уламки, так і дрібніші частинки, що можуть бути початковими ланками для утворення нанофрагментів. Отримані морфологічні характеристики підтверджують складність та неоднорідність мікропластикових частинок, які вивільняються в навколишнє середовище з поліпропіленових виробів у результаті їх інтенсивного очищення та експлуатації. Отримані результати свідчать, що морфологічні відмінності частинок пластику, а саме для PP характерна ламкість, наявність грубих країв та слідів механічного зносу. PC-пляшки демонстрували гладші частинки з ознаками термічної ерозії, утворені ймовірно внаслідок деструкції бісфенолу-А в структурі. Частинки з PC проявляли тенденцію до агломерації, що може вказувати на можливу наявність електростатичного заряду або хімічну реактивність їх поверхні. Отже, поєднання даних DLS-аналізу з морфологічним SEM-дослідженням дозволило комплексно охарактеризувати ступінь деградації полімерів, кількісно оцінити вивільнення нанопластикових частинок та визначити потенційні

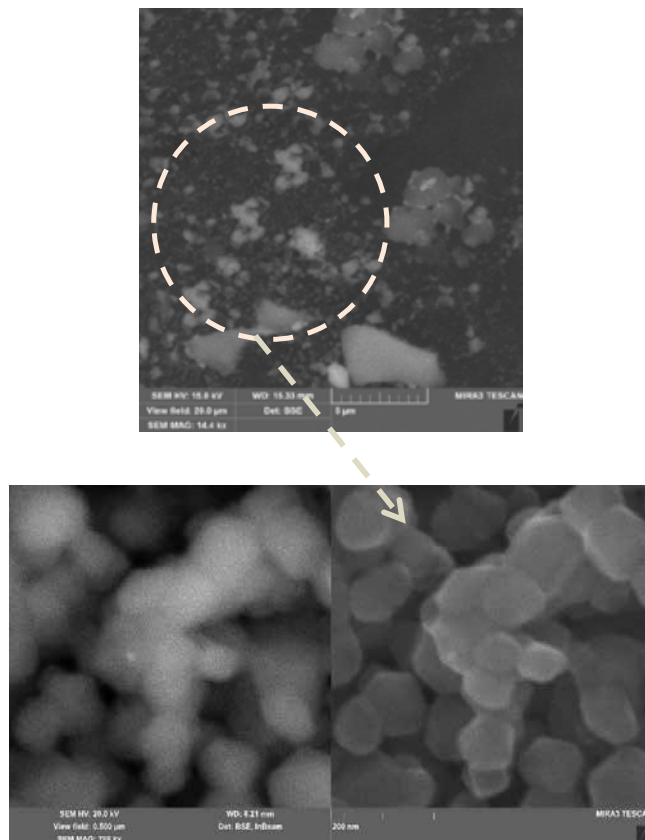


Рис. 2. СЕМ-аналіз мікропластику, виявлених у залишковому сухому осаді після випаровування водного розчину, що утворився внаслідок інтенсивного очищення двох пластикових пляшок з поліпропілену (PP)

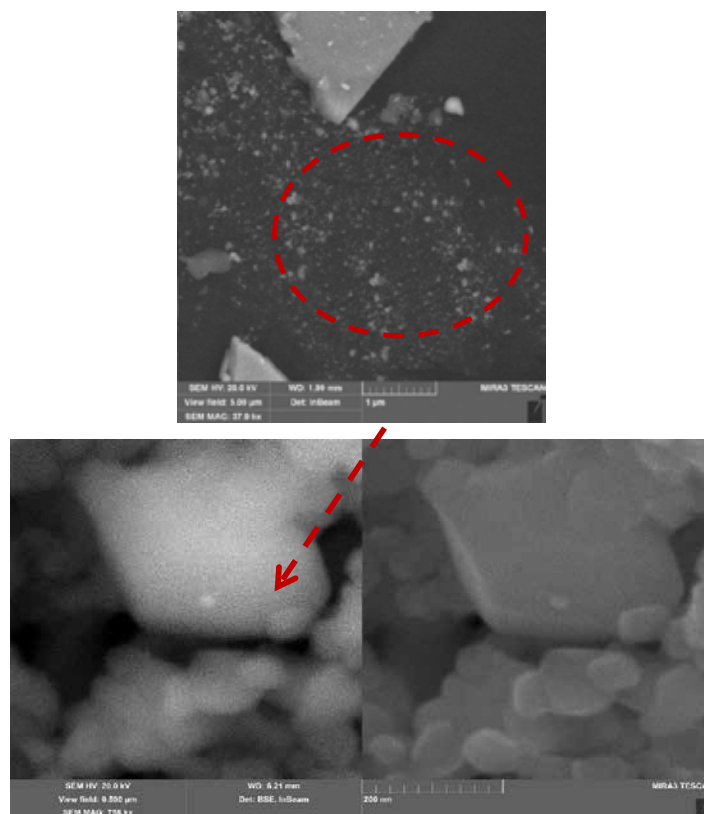


Рис. 3. СЕМ-аналіз мікропластику, виявлених у залишковому сухому осаді після випаровування водного розчину, що утворився внаслідок інтенсивного очищення пластикових пляшок з полікарбонату

Таблиця 1

Морфологічна характеристика вивільнених частинок за даними СЕМ

Тип пластику	Переважаюча форма частинок	Поверхнева структура	Ознаки деградації	Агрегація
Поліпропілен (PP)	Уламки, фрагменти	Шорстка, нерівна	Механічна абразія	Слабка
Полікарбонат (PC)	Зерна, пластівці	Гладка, з тріщинами	Термічна ерозія	Схильність до агрегації

ризики, пов'язані з експлуатацією різних типів пластикових пляшок у побуті (рис. 3). Аналіз частинок, вивільнених у воду з полімерних ємностей, показав наявність як мікрометрових (до 3–4 мкм), так і нанометрових часток. Частинки розміром понад 1 мкм можуть утворюватися внаслідок подальшої фрагментації більших фрагментів або агрегації дрібніших наночастинок.

Утворення таких агрегатів, ймовірно, зумовлено гідрофобними взаємодіями, водневим зв'язуванням або залишковими поверхневими зарядами. DLS-аналіз не завжди дозволяє чітко диференціювати окремі частки від агрегатованих структур, що ускладнює інтерпретацію розмірного розподілу. Високі значення полідисперсного індексу ($PDI > 0.7$) та присутність фракцій великого розміру свідчать про формування вторинних кластеризованих структур. Наявність кластерів має значний токсикологічний потенціал, оскільки такі структури можуть сорбувати на своїй поверхні інші забрудники – зокрема, іони важких металів, пер- та поліфторалкільовані сполуки (PFAS), залишки мономерів тощо – підвищуючи ризики їх біоаккумуляції і трансмісії в екосистемах. Механічна очистка ємностей, яка моделює побутові умови повторного використання (миття з йоршиком), виявилася критичним фактором інтенсифікації вивільнення часток, особливо у випадку поліпропіленових зразків.

Це пов'язано з нижчою хімічною стійкістю та механічною стабільністю поліпропілену в порівнянні з полікарбонатом. Попри кращу термічну та структурну стабільність, поверхня полікарбонату також зазнає деградації в умовах зберігання, що супроводжується утворенням нанофрагментів. Окрім цього, полікарбонат здатен вивільняти низькомолекулярні сполуки, зокрема бісфенол-А, що мають відомий ендокринно-деструктивний ефект. Фіксація часток розміром менше 100 нм є особливо важливою з точки зору оцінки біологічного впливу, оскільки такі наноструктури

здатні проникати крізь біологічні бар'єри, зокрема клітинні мембрани та гематоенцефалічний бар'єр. Це свідчить про потенційну цитотоксичність та потребу в подальшому токсикологічному дослідженні. Отже, широкий розподіл часток за розміром, підтверджений даними DLS, свідчить про безперервний процес вивільнення полімерного матеріалу у воду в умовах звичайної експлуатації. Це ставить під сумнів безпечність багаторазового використання таких ємностей без належного контролю фізико-хімічного стану матеріалу. Отримані результати необхідно враховувати при розробці технічних регламентів щодо безпечного використання харчової упаковки, а також при оцінці впливу полімерів на довкілля та здоров'я людини.

Висновки. Полікарбонатні пляшки генерують більше нанопластику, особливо при багаторазовому використанні з гарячою водою при митті із щіткою. Поліпропіленові пляшки мають нижчий рівень вивільнення частинок, однак створюють більші уламки. Пляшки з полікарбонату вивільняють переважно наночастинки, з більш вузьким розподілом розмірів. Натомість поліпропіленові пляшки генерують переважно мікропластик значно більшого розміру, з високим ступенем полідисперсності. Це свідчить про відмінні механізми деструкції полімерів: переважно термодеструкція для PC і механічна деградація для PP. Метод динамічного світлорозсіювання (DLS) підтвердив формування мікро- та наночастинок у широкому діапазоні розмірів (3,6–3000 нм) із високою полідисперсністю, що вказує на гетерогенність продуктів деградації. Морфологічний аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії зафіксував наявність частинок мікро- та нанопластику. Порівняльний аналіз показав, що поліпропілен має більшу схильність до деструктивних змін в умовах, що моделюють процес чищення, тоді як полікарбонат зберігає більш високу структурну стабільність.

Список літератури:

1. Huang Z., Wang H. Study on the impact of photoaging on the generation of very small microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) and the wettability of plastic surface. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 92963-92982.

2. Liu Y., Han J., Wang Y., Li A., Zhao J., Su Y., Shen L., Xing B. Suspected sources of microplastics and nanoplastics: Contamination from experimental reagents and solvents. *Water Research*. 2024. Vol. 249. P. 120925-120935.
3. He Y. Y., Weston K., Suratman S. The effect of storage conditions and washing on microplastic release from food and drink containers. *Food Packaging and Shelf Life*. 2022. Vol. 32(100826). P. 1-9.
4. Süß M., Fischer J. Microplastic occurrence during the pre-treatment of polypropylene in a simulated washing process for mechanical recycling. *Monatshefte für Chemie Chemical Monthly*. 2023. P. 1-4.
5. He H., Liu K., Guo Z., Li F., Liao Z., Yang X., Ren X., Huang H., Huang B., Pan X. Photoaging mechanisms of microplastics mediated by dissolved organic matter in an iron-rich aquatic environment. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 860 (160488). P. 1-11.
6. Павловський Д.О., Левандовський І.А., Воробйова В.І. Оцінка деградації полімерної тари та вивільнення мікро- і наночастинок у рідинне середовище. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи*: матеріали Х Всеукраїнської науково-методичної конференції. (м. Шостка, 24 квітня 2025 р.). Суми, 2025. С. 51-54.

Pavlovsky D.O., Levandovsky I.A. ASSESSMENT OF STRUCTURAL STABILITY OF PRODUCTS MADE OF POLYPROPYLENE AND POLYCARBONATE UNDER THE ACTION OF AQUEOUS ENVIRONMENT

The work conducted a comprehensive study of the processes of primary degradation of polymeric materials used in the production of consumer packaging, in particular polypropylene (PP) and polycarbonate (PC). The main goal of the study was to determine the stability of these polymers under the influence of the aquatic environment and external factors that simulate the conditions of their storage and use. Such studies are relevant in view of the growing attention to the environmental safety of materials and the need to assess the potential risks associated with the degradation of polymeric packaging in domestic and industrial conditions. An important part of the study was the study of the release of micro- and nanoparticles from the surface of polymers, since such fragments can pose a significant environmental threat and affect human health. To assess the quantitative and qualitative characteristics of the released particles, the dynamic light scattering (DLS) method was used. The analysis results showed the presence of particles in a wide range of sizes – from 3.6 to 3000 nanometers, with a high polydispersity index ($PDI > 0.7$), which indicates significant heterogeneity of degradation products. Such polydispersity indicates the complex nature of polymer destruction and the presence of both small nanoparticles and larger microparticles in the environment. Additionally, the scanning electron microscopy (SEM) method was used to morphologically study the surface of the samples before and after exposure. The obtained images confirmed the formation of nano- and microparticles of plastic, which were formed during the process of simulating the operation of the container. Surface visualization showed significant damage to polypropylene samples, with the appearance of cracks and potholes, which indicates their high susceptibility to destructive changes under given conditions. In contrast, polycarbonate demonstrated a more stable structure, with less pronounced signs of degradation. However, polycarbonate has a potentially higher toxicological risk due to the possible release of biophenols, compounds that can affect biochemical processes and have undesirable effects on the human body and the environment. This emphasizes the need to assess not only the mechanical and structural stability of polymeric materials, but also the chemical aspects of their degradation.

Key words: polypropylene, polycarbonate, degradation, microplastic, nanoplastic, SEM, DLS, stability.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 11.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025