

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК ВІННИЦЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО ІНСТИТУТУ

Науковий журнал

Засновник і видавець: Вінницький національний технічний університет

Виходить 6 разів на рік

Заснований у грудні 1993 року

№ 6 (165) 2022

Схвалено Вченою радою
Вінницького національного технічного університету,
протокол № 5 від 29.12.2022 р.

© Вінницький національний технічний університет, 2022

Вінниця • ВНТУ • 2022

Журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту» є виданням, яке входить до Переліку наукових фахових видань України у галузі технічних наук (**категорія Б**) за спеціальностями: 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 141, 144, 151, 152, 163, 172, 183, 275, а також 01.05.00, 05.02.02, 05.02.10, 05.03.05, 05.09.03, 05.11.00, 05.13.05, 05.13.06, 05.12.13, 05.12.20, 05.14.02, 05.14.06, 05.22.20, 05.23.02, 05.23.05 (накази Міністерства освіти і науки України: від 11.07.2019 р. та № 975, від 15.10.2019, № 1301);

Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Index Copernicus International та Google Scholar і реферується в Українському реферативному журналі «Джерело».

Журнал публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, економічних, природничих та гуманітарних наук. Публікуються також огляди сучасного стану розв'язання важливих наукових проблем, огляди наукових та методичних конференцій, які відбулися у ВНТУ, статті з педагогіки вищої освіти.

Розділи журналу:

- ☒ автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка;
- ☒ будівництво;
- ☒ гуманізація і гуманітаризація технічної освіти;
- ☒ застосування результатів досліджень;
- ☒ екологія та екологічна безпека;
- ☒ економіка та менеджмент;
- ☒ енергетика, електротехніка та електромеханіка;
- ☒ інформаційні технології та комп'ютерна техніка;
- ☒ машинобудування і транспорт;
- ☒ радіоелектроніка та радіоелектронне апаратобудування;
- ☒ стратегія, зміст та нові технології підготовки спеціалістів з вищою технічною освітою;
- ☒ рецензії;
- ☒ ювілеї і ювіляри.

Сайт журналу <https://visnyk.vntu.edu.ua/>

DOI журналу <https://doi.org/10.31649/1997-9266>

Адреса редакції:
ВНТУ, к. 204 ГНК,
вул. Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, Україна, 21021

Контакти:
Тел.: (0432) 65-18-06
E-mail: visnykvpi@gmail.com

Головний редактор

Мокін Б. І., академік НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

Заступники головного редактора

Грабко В. В., д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Васілевський О. М.**, д-р техн. наук, професор.

Відповідальний секретар редколегії

Дерібо О. В., канд. техн. наук, доцент (ВНТУ).

Члени редакційної колегії

Технічні науки:

Азаров О. Д., д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Багацький В. О.**, д-р техн. наук, професор (ІК); **Білинський Й. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Біліченко В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Бісікало О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Боровська Т. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Василенко В. Б.**, д-р філософії, професор (Новий університет Лісабона, Португалія); **Войцек В.**, д-р техн. наук, професор (Державний університет «Люблінська Політехніка», Польща); **Григорова К.**, д-р філософії (Русенський університет «Ангел Кинчев», Болгарія); **Грушко О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Губінський М. В.**, д-р техн. наук, професор (НМетАУ); **Данилов В. Я.** д-р техн. наук, професор (НТУУ «КПІ»); **Дінь Тхань Вьєт**, д-р філософії, доцент, (Університет м. Дананг, В'єтнам); **Друкований М. Ф.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Дубовой В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Іскович-Лотоцький Р. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кветний Р. Н.**, член-кор. НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кичак В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Козлов Л. Г.** д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кулик В. В.**, д-р техн. наук, доцент (ВНТУ); **Кучерук В. Ю.**, д-р техн. наук, професор (УНУС); **Кухарчук В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лежнюк П. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лужецький В. А.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Майєр Г.**, д-р наук хабілітований, професор, (Інститут Макса Планка (структури і динаміки матерії), Гамбург, Німеччина); **Мартинюк Т. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Михалевич В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін В. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін О. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Моргун А. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук В. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Павлов С. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Петрук В. Г.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Поліщук Л. К.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Поляков А. П.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Постолатій В. М.**, академік АН Молдови, д-р техн. наук (Інститут енергетики АН Молдови, Молдова); **Ранський А. П.**, д-р хім. наук, професор (ВНТУ); **Романюк О. Н.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Русу Іоан**, д-р інженерії, професор (Технічний університет ім. Георге Асакі, м. Ясси, Румунія); **Савуляк В. І.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Семенов А. О.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Стратан Іон**, д-р техн. наук, професор (Технічний університет Молдови, Молдова); **Ткаченко С. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Трофимчук О. М.**, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор (ІТГП); **Штовба С. Д.**, д-р техн. наук, професор (ДНУ), **Яремчук Ю. Є.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

Педагогічні науки:

Денисюк С. Г., д-р політ. наук, професор; **Джеджула О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВНАУ); **Клочко В. І.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Корнієнко В. О.**, д-р політ. наук, професор (ВНТУ); **Куцевол О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВДПУ); **Петрук В. А.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Рагніков В. С.**, д-р, філос. наук, професор (ВНТУ); **Хома О. І.**, д-р філос. наук, професор (ВНТУ); **Хом'юк І. В.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ).

Економічні науки:

Карачина Н. П., д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. В.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. О.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ).

Використані скорочення:

ВДПУ — Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Україна;

ВНАУ — Вінницький національний аграрний університет, Україна;

ВНТУ — Вінницький національний технічний університет, Україна;

ДНУ — Донецький національний університет ім. В. Стуса, Вінниця, Україна;

ІК — Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ, Україна;

ІТГП — Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна.

НМетАУ — Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна.

НТУУ «КПІ» — Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ, Україна;

УНУС — Уманський національний університет садівництва

Відповідальний за випуск Дерібо О. В.

Відповідальна за присвоєння індексів DOI Войцеховська О. О.

ЗМІСТ

DOI випуску <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6>

ЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Коріненко Б. В. Мікропластик як глобальне джерело забруднення навколишнього середовища.....	6
Березюк О. В., Лемешев М. С. Динаміка кількості перевантажених полігонів твердих побутових відходів в Україні.....	13
Шибанов В. В., Репета В. Б., Слободяник В. Г., Кукура Ю. А. Регенерація розчину для вимивання фотополімерних друкарських форм як вирішення екологічної проблеми.....	18

ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Ткаченко С. Й., Власенко О. В. Вимушена конвекція — дослідження регулярного теплового режиму в різних шарах по висоті рідини.....	23
Разінков В. О., Суворов В. О. Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса.....	29
Лесько В. О., Покровський К. Б., Ференсович Р. Я. Оцінка ефективності вітрогенераторів в реальних умовах з додатковими експлуатаційними витратами.....	37
Паланюк О. В. Пристрій для оцінювання витрачання робочого ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.....	42

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

Маленчик Т. В., Мирончук О. Ю., Неуймін О. С. Аналіз алгоритмів виявлення та супроводження точкових об'єктів у відеопотоці.....	48
--	----

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТ

Івахнік В. С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту.....	57
Соларьов О. О., Герасименко В. О., Таценко О. В. Методика розподілу навантаження на осі вантажного транспортного засобу.....	65
Дерібо О. В., Репінський С. В., Коваленко К. С. Порівняльний аналіз результатів визначення припусків за нормативами та за розрахунково-аналітичним методом з використанням розмірного аналізу технологічних процесів.....	69
Двірничук К. В. Комп'ютерне рішення для знаходження поперечних динамічних зміщень товстих пружних плит в умовах невизначеності.....	75
Перелік статей журналу «Вісник вінницького політехнічного інституту» за 2022 рік.....	82

CONTENTS

Issue DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6>

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY

Korinenko B. Microplastic as a Global Source of Environmental Pollution	6
Bereziuk O., Lemeshev M. Number Dynamics of Overloaded MSW Landfills in Ukraine	13
Shybanov V., Repeta V., Kukura Yu., Slobodianyuk V. Regeneration of Solvents for Washout Photopolymer Printing Plates as a Solution to Environmental Problem.....	18

ENERGY GENERATION, ELECTRIC ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Tkachenko S., Vlasenko O. Forced Convection — Study of the Regular Thermal Regime in Different Layers at the Liquid Height	23
Razinkov V., Suvorov V. Prospects for the Use of Solar Energy for Energy Supply in the City of Odesa	29
Lesko V., Pokrovskiy K., Ferensovych R. Assessment of the Efficiency of Wind Generators in Real Conditions with Additional Operational Costs.....	37
Palaniuk O. Device for Assessing Working Resource Consumption of Power Oil Transformer Windings	42

INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER ENGINEERING

Malenchuk T., Myronchuk O., Neuimin O. Analysis of Detection and Tracking Algorithms of Dot Objects in Video Stream	48
--	----

MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

Ivakhnik V. A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modeling	57
Solariov O., Herasymenko V., Tatsenko O. Load Distribution Method on the Axle of a Truck Vehicle.....	65
Deribo O., Repinskyi S., Kovalenko K. Comparative Analysis of the Results of the Determination of Allowances According to Standards and the Calculation and Analytical Method Using the Dimensional Analysis of Technological Processes.....	69
Dvirnychuk K. Computer Solution for Determining Transverse Dynamic Displacements of Thick Elastic Plates Under Uncertainty Conditions	75

МІКРОПЛАСТИК ЯК ГЛОБАЛЬНЕ ДЖЕРЕЛО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

¹Вінницький національний технічний університет;

²Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, Київ

Проведено всебічний аналіз накопичення мікропластику в природних та технічних об'єктах: світовому океані, поверхневих водах, ґрунтах, агрохімікатах, продуктах харчування, відмічено прямий та опосередкований негативний його вплив на здоров'я людини та біоту, руйнування ґрунтів та порушення нормального функціонування екологічних систем. Встановлено, що неконтрольоване виробництво пластмас призводить до масового забруднення не лише акваторії світового океану, а і утворенню мікропластикового осаду на дні океану. При цьому зазначено, що інертні в хімічному відношенні полімери мають у своєму складі токсичні хімічні речовини/добавки: антипірени, пластифікатори, УФ-стабілізатори, антимікробні добавки та розчинники. Їх токсична дія відносно певних організмів детально не досліджена, становить потенційну загрозу здоров'ю людини та морській фауні. Відмічається широке застосування останнім часом у країнах Європейської економічної зони в сільському господарстві мікропластику, яким покривають токсичні пестицидні препарати та добрива. Таке використання складає 65 % від загального забруднення мікропластиком в цих країнах, що в 4—23 рази більше забруднення світового океану. Мікропластик становить потенційну загрозу здоров'ю фермерів, негативно впливає на структуру ґрунтів, клімат, якість продуктів харчування та існуючі екосистеми. Враховуючи розміри мікропластику від 1мм до 1мк, його визначення традиційними методами неможливе. Для цього ефективно використовують метод динамічного лазерного розсіювання, (Dynamic Laser Scattering — DLS) який дає змогу визначити дисперсність, розмір частинок та їх розподіл в розчині за окремими фракціями. Розглянуто метод термічного та каталітичного низькотемпературного піролізу утилізації пластикових/мікропластикових відходів, що дозволяє ефективно їх переробляти у екологічно безпечні та відновлювальні енергетичні ресурси.

Ключові слова: мікропластик, глобальне забруднення, світовий океан, ґрунти, низькотемпературний піроліз.

Вступ

В огляді Товариства ендокринологів (Endocrine Society) та Міжнародної мережі з ліквідації забруднювачів (IPEN) «Пластик, РВЕС і здоров'я: керуючі принципи по хімічним речовинам, що вражають ендокринну систему для громадських організацій і політичних керівників» представлені результати багаторічних досліджень про негативні наслідки впливу РВЕС (речовин, що вражають ендокринну систему), які містяться в пластмасах на здоров'я людини. РВЕС, що входять до складу пластмас, блокують, імітують або іншим чином втручаються в дію гормонів організму, створюють ризик для здоров'я людини в ключові моменти життєвого циклу, включно з вагітністю, дитинством та статевим дозріванням, та можуть таким чином негативно впливати на декілька поколінь [1]. Багаторічна робота та дослідження багатьох міжнародних громадських організацій завершилась тим, що 30 травня 2022 року в Дакарі (Сенегал), відбулося засідання Робочої групи відкритого складу (РГВС) з підготовки міжурядових переговорів щодо нової глобальної угоди з пластику. В доповідях РГВС озвучені тези стосовно того, що [2]:

– «морське сміття», включно з мікропластиком, є глобальним забруднювачем усього технологічного циклу: видобування нафти — переробка нафти — синтез мономерів — виробництво полімерів — використання полімерів та їх утилізація;

– зменшуючи об'єми виробництва пластмас та удосконалюючи управління пластиковими від-

ходами, можна суттєво покращити ситуацію з глобальним забрудненням мікропластиком;

– ключові питання нових технологій та інновацій лежать в основі скорочення виробництва пластмас та їх ефективної утилізації.

Важливим і логічним виглядають також рішення потрійної Конференції Сторін (КС), а саме Стокгольмської, Роттердамської та Базельської конвенцій, яка відбулася 6—17 червня 2022 року та розглянула питання про стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) [3]:

– Стокгольмська конвенція ухвалила рішення про ліквідацію ПХБ та бромованих дифенілових етерів;

– Базельська конвенція розглянула технічні вказівки щодо поводження з пластиковими відходами;

– Роттердамська конвенція, розглянула питання щодо включення таких речовин до Додатку III до Конвенції: Ацетохлор, Карбосульфат, Хризотилловий азбест, Декабромідфеніловий етер. Зазначені рішення (КС) обмежують використання СОЗ, які входять або можуть входити до складу пластмас, що суттєво зменшує екологічне навантаження на довкілля за рахунок потенційного зменшення токсичності у разі глобального та неконтрольованого розповсюдження мікропластику у світі.

Таким чином, можна стверджувати, що забруднення природного середовища мікропластиком залежить не лише від його життєвого циклу, а й від життєвого циклу хімічних речовин, що наповнюють його та забезпечують важливі функціональні властивості. Такі хімічні речовини виконують ключові функції практичного на всіх виробничих, технологічних та споживчих етапах життєвого циклу пластмас. Вони відповідальні за прямий потенційний негативний вплив на здоров'я людини та біоту, включно з токсичною дією. Непрямий потенційний вплив зумовлений руйнуванням довкілля та екосистем в процесі виробництва сировини, полімерної продукції, продуктів харчування та косметичних засобів, а також зміною клімату внаслідок руйнування ґрунтів, відкритого їх перебування на звалищах та спалювання відходів пластику з метою звільнення територій або отримання тепла та електроенергії. При цьому необхідно зазначити, що переважна більшість виробництва хімічних речовин ґрунтується на викопних природних ресурсах: нафті, газу, кам'яному вугіллі, металевих рудах різного призначення та широкій номенклатурі мінеральних ресурсів.

Мета роботи полягає в системному аналізі накопичення мікропластику в природних та технічних об'єктах, його негативного впливу на здоров'я людей та біоту, а також можливого екологічно прийняттого шляху переробки пластичних відходів, як джерела мікропластику, методом низькотемпературного піролізу.

Накопичення мікропластику в природних та технічних об'єктах і виробах

Виробництво пластмас та знаходження пластикових відходів у морському середовищі

Виробництво пластмас має стійку динаміку зростання, збільшення річного обсягу складає 8,4 %, що приблизно в 2,5 рази більше середньорічного обсягу світового валового внутрішнього продукту за період 1950—2015 років [4]. Якщо динаміка росту та темпи виробництва пластмас залишаться такими ж, то до кінця 2050 р. в світі буде вироблено 26000 млн т полімерів та 6000 млн т поліпропіленових і акрилових волокон. Прогнозовано, що з цієї кількості пластикових відходів 12000 млн т ($\approx 37\%$) буде спалено, 900 млн т ($\approx 26\%$) перероблено, а 12000 млн т ($\approx 37\%$) викинуто на звалища або в навколишнє середовище [5]. Тобто, наведені дані свідчать про глобальну світову пластикову кризу, за яку повинні нести юридичну і фінансову відповідальність провідні світові компанії DOW, Exxon Mobil, Imperial Oil (США), Sinopec (Китай), NOVA Chemicals (Канада): за зростання обсягів виробництва пластмас, їх накопичення та відсутність належного їх перероблення в продукцію з меншим вмістом у їх складі токсичних добавок. Так, у пластику використовуються понад 140 хімічних речовин, відомих як небезпечні для здоров'я людини. Вони виконують різні функції: антипіренів, пластифікаторів, розчинників, УФ-стабілізаторів та антимікробних добавок. Однак, лише невелика кількість із зазначених хімічних сполук була детально досліджена на токсичність відносно живих організмів (бісфенол А, фталати). Порівняльний аналіз споживчих товарів із пластмас, що охоплював вісім основних типів полімерів, проведений німецькими вченими [6]. Більшість (74 %) з 34 досліджених екстрактів пластмас містили небезпечні хімічні сполуки, що спричиняли гостру токсичність, окислювальний стрес і призводили до порушення роботи ендокринної системи. Загалом виявлено 1411 хімічних сполук, включно з мономерами, добавками та несанкціонованими забруднювачами. Висока токсичність виявлена у всіх «біопластиках», виготовлених з полілактичної кислоти. Тобто, в межах глобальної пластикової кризи можна говорити, що мікропластик виконує ідеальну функцію транспортної форми для масового розповсюдження

небезпечних для людини хімічних речовин. Фізичні особливості мікропластику та свідоме замовчування існуючих загроз виробниками не дозволяють на сьогодні ефективно вирішити проблему масового його розповсюдження або, принаймні, ізоляції. При цьому біля 8 млн т пластикових відходів кожного року потрапляє в океани. Основна маса пластикових відходів припадає на Атлантичний, Тихий, Індійський океани та коралові рифи Азіатсько-Тихоокеанського регіону. Пластик не лише дрейфує на поверхні, утворюючи «сміттєві острови», а і опускається у вигляді осаджень мікропластику на дно океанських глибин. У звіті [7] зазначено, що понад 690 видів морських істот, від мікроскопічного зоопланктону до великих морських ссавців, споживають мікропластик. Останній знайдений і у представників багатьох видів, що мають комерційне значення. Основною характеристикою мікропластику є розмір його частинок, який варіює від 1 мм до 1 мікрона. З хімічної точки зору мікропластик є інертним, однак, з накопиченням у значних кількостях в живих організмах негативно впливає на фізичний стан морської фауни: риб, раків, морських кільчастих червів, коралів та ін.

Мікропластик в агрохімікатах та сільськогосподарському виробництві

Центром міжнародного екологічного права (CIEL) встановлено, що мікропластик, яким покривають добрива, робить ще токсичнішими і так токсичні пестициди при використанні їх в сільському господарстві. Такий комбінований вплив хімікатів негативно впливає на структуру ґрунтів, клімат, якість продуктів харчування та екологічні системи загалом. Швидкість накопичення мікропластику в ґрунтах складає 50 кг/га за рік, погіршуючи при цьому ґрунтові екосистеми, бактеріальний склад та склад мікроорганізмів, що створюють необхідні умови для здорового зростання рослин. Необхідно зазначити, що країни Європейської економічної зони через ядохімікати вносять в ґрунти 36000 т мікропластику щорічно, що складає понад 65 % мікропластику, яким забруднюється навколишнє середовище цього регіону. При цьому забруднення мікропластиком наземних ґрунтів від 4 до 23 разів більше ніж у морському середовищі. Агрохімікати, що вкриті мікропластиком, несуть потенційну загрозу здоров'ю фермерів, що призводить до підвищеної нейротоксичності, раку та інших видів захворювання. Крім того, існує загроза потрапляння мікропластику в організм людини під час вживання забрудненої сільськогосподарської продукції [8], [9].

Мікропластик в питній воді, продуктах харчування та його визначення

У роботі [10] встановлено наявність частинок мікропластику в усіх досліджених зразках питної води, а також той факт, що наявні на сьогодні найдосконаліші методи очищають воду від мікропластику лише на 90 %. Забрудненими мікропластиком виявились і більшість проаналізованих зразків бутильованої води, придбаних у різних країнах на різних континентах [11]. Авторами роботи [10] також встановлена наявність частинок мікропластику і в рослинних оліях [12]. Частинки мікропластику знайдено в океанічному планктоні [13], рибах [14] та птахів [15]. Враховуючи те, що продукти тваринного та рослинного походження складають харчові ланцюги людини, логічним було виявлення частинок мікропластику в організмі людини. Такі дослідження проведені з продуктами виділення восьми людей з різних континентів світу вченими Віденського університету та встановлена наявність частинок мікропластику, який за хімічним складом переважно відповідав поліпропілену та поліетилентерефталату [16]. З урахуванням того, що учасники досліджень представляли дуже широку географію, можна стверджувати, що на Землі, мабуть, не залишилося місця, де людина не споживала б воду та їжу з мікропластиком.

Необхідно зазначити, що традиційні фізико-хімічні методи дослідження рідин, як то визначення рН, густини або показника заломлення не дають змогу визначити мікро- або наночастинки пластику. Тобто, традиційні методи дослідження не дозволяють визначити дисперсність, розміри та розподіл мікро- або наночастинок пластику в розчині за окремими фракціями. Для вирішення цих завдань використовують метод динамічного лазерного світлорозсіювання (Dynamic Light Scattering — DLS). Метод DLS є швидким, інформативним, що дозволяє оптично вимірювати розмір частинок. В цьому методі лазерний промінь проходить через розчин і розсіюється частинками, що знаходяться в русі [17]. Після визначення характеру розсіювання променю визначається розмір мікро- або наночастинок пластику. Крім того, як один з ключових параметрів, що характеризують колоїдні системи, є дзета-потенціал частинок, який також можна ефективно визначити методом DLS. Визначена величина дзета-потенціалу дає можливість визначити стійкість колоїдних систем, включно з тими, що мають у своєму складі частинки мікропластику.

Переробка пластикових відходів методом низькотемпературного піролізу

Згідно з рекомендаціями робочої групи відкритого складу (РГВС) з підготовки міжурядових переговорів щодо нової глобальної угоди з пластику (м. Дакар, Сенегал, 30.05.2022 р.) зменшення об'ємів виробництва пластмас може послідовно призвести до зменшення відходів пластику/мікропластику та суттєвого поліпшення екологічного стану довкілля. Інший шлях — переробка пластикових відходів методом низькотемпературного піролізу. Цей термічний метод (360...590 °C) вигідно відрізняється від інших термічних методів, які детально розглянуті в роботі [18]. При цьому особливо перспективним виглядає каталітичний піроліз пластикових відходів, який має незаперечні переваги у порівнянні з термічним [19]. Перш за все, це використання нижчих температур, меншого терміну проходження повного процесу термодеструкції пластикових відходів та отримання рідкого палива з меншою кількістю домішок у випадку використання поліетилену низького тиску (ПЕНТ) і поліетилену високого тиску (ПЕВТ) [20], поліпропілену (ПП) [21] і полістиролу (ПС) [22], що забезпечує утворення вуглеводнів з коротким ланцюгом, зокрема і вуглеводнів бензинового ряду [23]. Необхідно зазначити, що фракційний склад отриманих рідких вуглеводнів значною мірою залежить від вихідної сировини [24] і умов, за яких проходить процес термічної деструкції: температури [25], часу та тиску [26] а також конструкції реактора [27]. Таким чином, в термічному піролізі кінцевий результат процесу залежить, як уже зазначалося раніше, від складу вихідної сировини, температури, тиску, часу процесу та конструктивних особливостей реактора. Однак, головною тенденцією є отримання рідких продуктів, які мають вуглеводні з довшим вуглецевим ланцюгом ніж у випадку каталітичного піролізу, низьку якість та низьке октанове число.

Гомогенні та гетерогенні каталізатори полімерних відходів, є, як правило, сильними кислотами Льюїса ($AlCl_3$, $FeCl_3$, $TiCl_3$, $TiCl_4$), які діють як акцептори вільних електронних пар. Вони можуть розчинятись в розплавленому полімері та змінювати розподіл заряду полімерного ланцюга з утворенням карбокатиону. Так, з використанням $AlCl_3$ як гомогенного каталізатора відбувається не лише зниження температури процесу і більший вихід газоподібних продуктів, а і нижча селективність щодо мономеру у порівнянні з некаталітичними процесами [28]. У таблиці подані узагальнені дані щодо виходу різних продуктів під час термічного та каталітичного піролізу пластикових відходів.

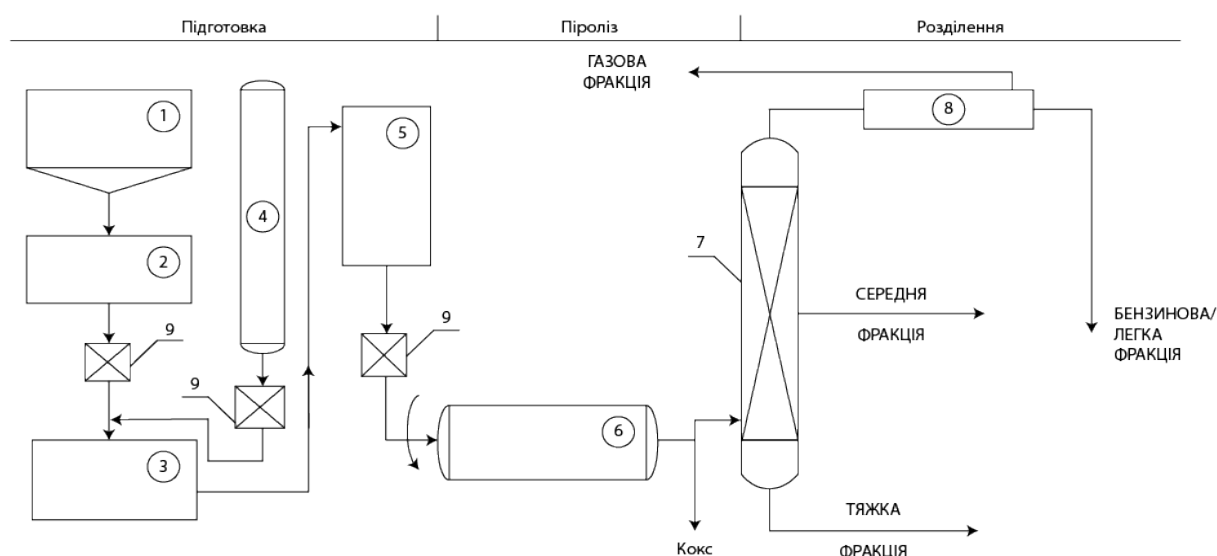
Вихід продуктів при термічному та каталітичному піролізі полімерних відходів

Сировина	T, °C	Термічний піроліз, вихід, %			Каталізатор	Кількість каталізатора, % мас.	Каталітичний термоліз, вихід, %			Посилання
		рідина	газ	кокс			рідина	газ	кокс	
ПЕ, ПП, ПС, ПЕТФ, ПВХ	440	79,3	17,7	3,0	Червоний шлам	10,0	76,2	21,6	2,2	[29]
ПЕ, ПП, ПС, ПЕТФ, ПВХ	500	65,2	34,0	0,8	Червоний шлам	10,0	57,0	41,3	1,7	[29]
ПЕ, ПП, ПС, ПЕТФ, ПВХ	500	65,2	34,0	0,8	ZSM-5	10,0	39,8	58,4	1,8	[29]
Побутові пластикові відходи	450	58,0	28,0	14,0	Ү-цеоліти	50,0	52,0	36,0	12,0	[30]
Побутові пластикові відходи	450	58,0	28,0	14,0	Природний цеоліт	50,0	50,0	34,0	16,0	[30]
Побутові пластикові відходи	500	—	—	—	ZSM-5	10,0	41,5	8,6	49,9	[31]

Примітки: ПЕ — поліетилен; ПП — поліпропілен; ПС — полістирол; ПЕТФ — поліетилентерефталат; ПВХ — полівінілхлорид.

Дані з таблиці свідчать про те, що у випадку каталітичного піролізу полімерних відходів для всіх видів каталізаторів у різних кількостях збільшується вихід синтез-газу, а також зменшується вихід рідкої вуглеводневої фракції. Закономірним виглядає також і зменшення виходу коксу/пірокарбону з підвищенням температури процесу піролізу. Наведені дані також вказують на перспективність використання в процесі піролізу полімерних відходів природних цеолітів або чер-

воного шламу, адже вони значно дешевше синтетичних каталізаторів. Принципова технологічна схема процесу каталітичного піролізу полімерних відходів показана на рисунку.



Принципова технологічна схема процесу каталітичного піролізу полімерних відходів:

- 1 — ємність для селективного збору полімерних відходів; 2 — подрібнювач; 3 — екструдер; 4 — ємність для каталізатора; 5 — ємність для підготовлених полімерних відходів; 6 — роторний реактор-піролізер; 7 — розподільча колона; 8 — конденсатор; 9 — дозатори

Повний технологічний цикл переробки пластикових відходів складається з таких стадій: підготовки вихідної сировини; процесу піролізу та розділення утвореної газорідинної суміші (рис.). В залежності від вихідної сировини та заданого співвідношення кінцевих продуктів піролізу ці стадії можуть зазнавати суттєвих змін. Так, у випадку каталітичного піролізу стадія підготовки полімерної сировини може включати селективне сортування пластику (ПЕВТ + ПЕНТ + ПП + ПС), його подрібнення та сумісну екструзію з каталізатором природного походження. Температурно-часові параметри процесу піролізу визначає, вочевидь, природа каталізатора, що використовується. Розділення утвореної газо-рідинної суміші за фракціями проводять з використанням розподільчої колони та конденсатора з водяним охолодженням.

Таким чином, можна стверджувати, що переробка пластикових відходів методом низькотемпературного піролізу дозволяє одночасно розв'язати дві важливі задачі:

- скорочення загального обсягу пластикових відходів та відповідно обсягу мікропластику;
- часткової заміни викопних природних ресурсів: нафти, газу та кам'яного вугілля та отримання при цьому відновлювальних енергетичних складових: газової фракції, синтез-нафти та пірокарбону.

Висновки

Порівняльний аналіз вказує на серйозну екологічну загрозу навколишньому середовищу неконтрольованим розповсюдженням мікропластику у світі. Пряма та потенційна загроза визначається не лише «життєвим» циклом пластику/мікропластику а і «життєвим» циклом хімічних речовин, що входять до його складу. Фактично мікропластик виконує ідеальну функцію транспортної форми для масового розповсюдження небезпечних для людини хімічних речовин, їх проникнення в живі організми, масового забруднення води та порушення нормального функціонування екологічних систем.

Частковим вирішенням проблеми глобальної пластикової кризи у світі може бути суттєве скорочення виробництва пластмас та покращення управління пластиковими відходами. В цьому контексті метод низькотемпературного піролізу вигідно відрізняється від інших термічних методів переробки і має значні перспективи його практичного використання. З урахуванням світових темпів виробництва пластмас та обсягів накопичення пластикових відходів, останні переходять у категорію відновлювальних джерел енергії, що за їхнього раціонального використання дозволяє зменшити частку викопної енергетичної сировини у світі (нафти, газу, кам'яного вугілля) та поліпшити загальний екологічний стан навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дж. Флос и др., *Пластик, ВПЭС и здоровье: руководство по химическим веществам, поражающим эндокринную систему, и пластмассам для общественных организаций и политических руководителей*, International Pollutants Elimination Network (IPEN). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ipen.org/sites/default/files/documents/edc_guide_2020_v1_6c-ru.pdf
- [2] Dakar OEWG, *International Pollutants Elimination Network (IPEN)*. [Electronic resource]. Available: <https://ipen.org/conferences/dakar-oewg>.
- [3] *Важные решения Конференции Сторон Базельской, Роттердамской и Стокгольмской конвенций 2022 года, «ЭКОИС-Бишкек»: Экологический Информационный Сервис*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ekois.net/vazhnye-resheniya-konferentsii-storon-bazelskoj-rotterdamskoj-i-stokgolmskoj-konventsij-2022-goda/>.
- [4] “Plastics — the Facts 2016,” *An analysis of European plastics production, demand and waste data, Plastics Europe*. [Electronic resource]. Available: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2016-Plastic-the-facts.pdf>.
- [5] R Geyer, et al., “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Science Advances*, vol. 3, no. 7, July, 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- [6] L. Zimmermann, et al., “Benchmarking the in vitro toxicity and chemical composition of plastic consumer products,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 19, pp. 11467-11477, August, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02293>.
- [7] *Plastic & health. The hidden costs of a plastic planet*, Center for International Environmental Law (CIEL). [Electronic resource]. Available: <https://www.ciel.org/reports/plastic-health-the-hidden-costs-of-a-plastic-planet-february-2019/>.
- [8] Center for International Environmental Law (CIEL), *Sowing a plastic planet: how microplastics in agrochemicals are affecting our soils, our food, and our future*. [Electronic resource]. Available: <https://www.ciel.org/reports/microplastics-in-agrochemicals/>.
- [9] R. Ullah, et al., “Microplastics interaction with terrestrial plants and their impacts on agriculture,” *J. Environ. Qual.*, vol. 50, no. 5, pp. 1024-1041, 2021. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20264>.
- [10] К. Н. Корнилов, и др., «Определение содержания различных наночастиц в питьевой воде и жидких пищевых продуктах», *Health, Food & Biotechnology*, vol. 1, no. 2, pp. 77-85, 2019.
- [11] S. A. Mason, et al., “Synthetic polymer contamination in bottled water,” *Frontiers in Chemistry*, vol. 6, 2018. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>.
- [12] Н. Корнилов и др., «Обнаружение частиц микропластика в растительных маслах», *Health, Food & Biotechnology*, vol. 2, no. 2, pp. 62-68, 2020.
- [13] M. Cole, et al., “Microplastic ingestion by zooplankton,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 12, pp. 6646-6655, 2013. <https://doi.org/10.1021/es400663f>.
- [14] A. Lusher, P. Hollman, and J. Mendoza-Hill, *Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety*. Rome, Italy: FAO, 2017. <https://www.fao.org/fishery/en/publications?page=1&q=615#search>.
- [15] L. Wang, et al., “Birds and plastic pollution: recent advances,” *Avian Research*, vol. 12, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40657-021-00293-2>.
- [16] B. Liebmann, et al., “Assessment of microplastic concentrations in human stool — Preliminary results of a prospective study,” in *6th Int. Conference on Emerging Contaminants (EmCon)*, Oslo, Norway, 2018.
- [17] E. R. Pike, J. B. Abbiss, Ed., *Light Scattering and Photon Correlation Spectroscopy*. NATO ASI Series, vol. 40, Springer-er. <https://www.springer.com/gp/book/9780792347361>.
- [18] Б. В. Кориненко, та ін., «Циркулярна економіка та термохімічна конверсія твердих відходів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 7-19, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-7-19>.
- [19] Б. В. Кориненко, та ін., «Каталіз низькотемпературного піролізу полімерних відходів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 27-37, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-27-37>.
- [20] J. J. Park, et al., «Characteristics of LDPE pyrolysis», *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 658-662, 2002. <https://doi.org/10.1007/BF02699313>.
- [21] E.-Y. Hwang, et al., “Performance of acid treated natural zeolites in catalytic degradation of polypropylene,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 62, no. 2, pp. 351-364, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00134-6).
- [22] D. Oh, et al., “Catalytic pyrolysis of polystyrene and polyethylene terephthalate over Al-MSU-F,” *Energy Procedia*, vol. 144, pp. 111-117, July, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.egypro.2018.06.015>.
- [23] M. Rehan, et al., “Determination of wax content in crude oil,” *Petroleum Science and Technology*, vol. 34, no. 9, pp. 799-804, 2016. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1169287>.
- [24] B. L. Fui Chin, et al., “Kinetic studies of co-pyrolysis of rubber seed shell with high density polyethylene,” *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 746-753, November, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.043>.
- [25] A. Marcilla, et al., “Evolution of products during the degradation of polyethylene in a batch reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 86, no. 1, pp. 14-21, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.03.004>.
- [26] K. Murata, et al., “Effect of pressure on thermal degradation of polyethylene,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71, no. 2, pp. 569-589, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.08.010>.
- [27] A. F. Anene, et al., “Experimental study of thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste components,” *Sustainability*, vol. 10, no. 10, pp. 1-12, October, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10113979>.
- [28] S. R. Ivanova, et al., “Selective catalytic degradation of polyolefins,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 193-215, 1990. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(90\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0079-6700(90)90028-Y).
- [29] A. Lopez, et al., “Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalytic : ZSM-5 zeolite and Red Mud,” *Applied Catalysis B: Environment*, vol. 104, no. 3-4, pp. 211-219, May, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.030>.
- [30] M. Syamsiro, et al., “Fuel oil production from Municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors,” *Energy Process*, vol. 47, pp. 180-188, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>.
- [31] A. Lopez, et al., “Pyrolysis of municipal plastic waste II: influence of raw material composition under catalytic conditions,” *Waste Management*, vol. 31, no. 9-10, pp. 1973-1983, September – October, 2011. <https://doi.org/10.1016/J.Wasman.2011.05.021>.

Коріненко Богдан Валерійович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету; інженер першої категорії відділу № 8, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com .

Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, Київ

B. V. Korinenko^{1,2}

Microplastic as a Global Source of Environmental Pollution

¹Vinnytsia National Technical University;

²V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

In the work, a comprehensive analysis of the accumulation of microplastic in natural and technical objects: World Ocean, surface waters, soils, agrochemicals, food products has been carried out, its direct and indirect negative impact on human health and biota, soil destruction and disruption of the normal functioning of ecological systems are noted. It has been established that the uncontrolled production of plastics leads to mass pollution not only of the equator of the World Ocean, but also to the formation of microplastics sediment on the bottom of the ocean. It is noted that chemically inert polymers contain toxic chemicals/additives: flame retardants, plasticizers, UV stabilizers, antimicrobial additives and solvents. Their toxic effect on certain organisms has not been studied in detail and poses a potential threat to human health and marine fauna. Recently, the widespread use of microplastic in the countries of the European Economic Area in agriculture, which is used to cover toxic pesticides and fertilizers, has been noted. Such use accounts for 65 % of the total microplastic pollution in these countries, which is 4–23 times more than the pollution of the world's oceans. Microplastic poses a potential threat to the health of farmers, has a negative impact on soil structure, climate, food quality, and existing ecosystems. Taking into account the size of microplastic from 1 mm to 1 μm, its determination by traditional methods is impossible. For this, the method of Dynamic Laser Scattering (DLS) is effectively used, which makes it possible to determine the dispersion, size of particles and their distribution in the solution by individual fractions. The method of thermal and catalytic low-temperature pyrolysis of plastic/microplastic waste disposal is considered, which allows them to be effectively processed into environmentally safe and renewable energy resources.

Keywords: microplastic, global pollution, World Ocean, soils, low-temperature pyrolysis.

Korinenko Bohdan V. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University; Engineer of the I category of the Department no. 8 of the V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com