

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ННІ холоду, кріотехнології та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського

Кафедра екології, води та природоохоронних технологій.

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітня програма Технології захисту навколишнього середовища



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему **Оцінка ефективності технологій виявлення та видалення
мікропластику в харчових продуктах**

Здобувача Карелі Є.К.

2 курсу ТЗЗ-777 групи

Керівник доцент Гаркович О.Л.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2024 р., протокол № _____

Завідувач кафедри ЕВтаПТ _____ **Олексій ГАРКОВИЧ**

Одеса - 2024 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ННІ холоду, кріотехнології та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського
Кафедра екології, води та природоохоронних технологій.

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітня програма Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри

к-т біол. наук, доц.

_____ **О.Л. Гаркович**

“ ____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Карелі Єлизавети Костянтинівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка ефективності технологій виявлення та видалення мікропластику в харчових продуктах»

Затверджена наказом ОНТУ від “28” 03 2024 року, наказ № 139-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 29.11.24.

3. Вихідні дані до роботи накопичення мікропластику у харчових ланцюгах, продуктах харчування та продовольчих товарах; матеріали переддипломної практики; механізми потрапляння мікропластику в харчові продукти _____

4. Перелік питань, які потрібно розробити здійснити аналіз джерел забруднення, зокрема харчової упаковки, води, ґрунтів та харчових продуктів мікропластиком; проаналізувати існуючі технології відбору проб, оцінити ефективність аналізу та ідентифікації мікропластику з різних матриць; експериментально перевірити міграцію мікропластику в харчові продукти з різних типів упаковки _____

5. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових креслень) таблиці та схеми, що відображають хід виконання випускної кваліфікаційної роботи _____

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Мікропластмаси у харчових ланцюгах та продовольчих товарах	Гаркович О.Л., к.б.н, доц.	02.09	30.09
2. Відбір проб та аналіз мікропластику з різних матриць	Гаркович О.Л., к.б.н, доц.	30.09	16.10
3. Забруднення мікропластику у харчових продуктах та напоях	Гаркович О.Л., к.б.н, доц.	16.10	18.11
4. Охорона праці та ЦЗ	Гаркович О.Л., к.б.н, доц.	18.11	26.11

7. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Керівник Олексій ГАРКОВИЧ

Завдання прийняв до виконання Єлизавета КАРЕЛІ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Мікропластмаси у харчових ланцюгах та продовольчих товарах	30.09.24	
2	2. Відбір проб та аналіз мікропластику з різних матриць	16.10.24	
3	3. Забруднення мікропластику у харчових продуктах та напоях	18.11.24	
4	Охорона праці та ЦЗ	26.11.24	
5	Оформлення результатів виконаної роботи	29.11.24	

Здобувач вищої освіти Єлизавета КАРЕЛІ

Керівник роботи Олексій ГАРКОВИЧ

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач вищої освіти Єлизавета КАРЕЛІ

АНОТАЦІЯ

Випускна кваліфікаційна робота магістра: сторінок – 85, рис. – 5 табл. – 9, література – 98.

Перелік ключових слів: мікропластик, харчові продукти, технології виділення та ідентифікації мікропластику.

Мета роботи – здійснити оцінку ефективності сучасних технологій виявлення та видалення мікропластику з харчових продуктів з метою підвищення їхньої безпеки для споживачів та екологічної чистоти виробничих процесів.

Для досягнення мети роботи доцільно визначити такі **завдання:** проаналізувати накопичення мікропластику у харчових ланцюгах та продовольчих товарах; вивчити механізми потрапляння мікропластику в харчові продукти; здійснити аналіз джерел забруднення, зокрема харчової упаковки, води та ґрунтів; проаналізувати існуючі технології відбору проб, оцінити ефективність аналізу та ідентифікації мікропластику з різних матриць; експериментально перевірити міграцію мікропластику в харчові продукти з різних типів упаковки.

Об’єкт дослідження – мікропластик.

Предмет дослідження – технологій виявлення та видалення мікропластику в харчових продуктах.

Кваліфікаційна робота магістра складається з таких розділів:

Розділ 1. Схарактеризовано вплив пластикових відходів на здоров’я населення та довкілля, описано технології утилізації пластику та шляхи транслокації мікропластику у харчових продуктах та супутніх матеріалах.

Розділ 2. Здійснено аналіз існуючих технік відбору проб та оцінено ефективність аналізу та ідентифікації мікропластику з різних матриць.

Розділ 3. Описано концентраційне забруднення харчових продуктів полімерними речовинами та експериментально перевірено можливість виявлення мікропластику, що виділяється з харчової упаковки.

Розділ 4. Наведено правила безпеки та обов’язкові вимоги для роботи в лабораторії. Здійснено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів.

Розділ 5. Розкрито поняття захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій (НС).

ЗМІСТ

	Сторінки
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. МІКРОПЛАСТМАСИ У ХАРЧОВИХ ЛАНЦЮГАХ ТА ПРОДОВОЛЬЧИХ ТОВАРАХ.....	8
1.1. Вплив пластикових відходів на здоров'я населення та довкілля.....	8
1.2. Технології утилізації пластику.....	24
1.3. Мікропластик у харчових продуктах та супутніх матеріалах..	31
РОЗДІЛ 2. ВІДБІР ПРОБ ТА АНАЛІЗ МІКРОПЛАСТИКУ З РІЗНИХ МАТРИЦЬ.....	37
РОЗДІЛ 3. ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ У ХАРЧОВИХ ПРОДУКТАХ ТА НАПОЯХ.....	52
3.1. Забруднення харчових продуктів полімерними речовинами....	52
3.2. Виявлення мікропластику, що виділяється з харчової упаковки.....	57
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
4.1. Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів.....	64
4.2. Вимоги до території, робочих місць, організації безпечного руху працівників і транспорту.....	65
4.3. Забезпечення нормативних значень показників мікроклімату і чистоти повітря.....	66
4.4. Освітлення, заходи і засоби для забезпечення нормованих показників освітлення.....	67
4.5. Заходи і засоби для захисту працюючих від ураження електричним струмом.....	68
4.6. Забезпечення пожежо-вибухобезпеки.....	68
РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ.....	71
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ВСТУП

Актуальність теми. Мікропластик з полімерних матеріалів на нафтовій основі є зростаючою загрозою для продовольчої та сільськогосподарської систем. Полімерні матеріали є одними з найважливіших інновацій за останні 75 років, які дозволяють значно вдосконалити багато галузей промисловості (біомедицина, харчування, транспорт, електроніка) завдяки їхній легкій вазі, низькій вартості та регульованим властивостям. Їх токсичність, адсорбційні властивості та стійкість до деградації є руйнівними для екосистем. Річний обсяг виробництва зараз перевищив 360 мільйонів метричних тонн, з яких близько 40% використовується для пакування. І значна частина виробленого пластику потрапляє в навколишнє середовище.

Полімерна упаковка, найбільш поширене застосування пластикових матеріалів (за вагою), зробила революцію в галузі споживчих товарів завдяки своїй низькій вартості, бар'єрним властивостям і високому відношенню міцності до ваги. У харчовій та сільськогосподарській галузях, зокрема, спостерігається прогрес у технологіях полімерної упаковки. Крім того, одноразові пластикові вироби, чашки та інші ємності для сервірування широко поширені в секторі громадського харчування системи харчування. У багатьох галузях полімерні матеріали широко використовуються через їхню міцність, гідрофобність і стійкість до розкладання. Хоча ці властивості є вирішальними під час використання матеріалу, вони запобігають біодеградації, що призвело до накопичення в навколишньому середовищі понад 6,3 мільярдів тонн викинутого пластику, отриманого з нафти.

Викид мікро- та нанопластику є актуальною проблемою, оскільки ці частинки є всюдисущим забруднювачем, який не лише загрожує навколишньому середовищу, але й може мати потенційні наслідки для здоров'я людини. Мікропластики легко поглинаються рослинами та

тваринами через їхній малий розмір і викликають проблеми з пристосованістю, починаючи від зміни експресії генів і поведінки до зниження репродуктивної ефективності. Враховуючи встановлений несприятливий вплив забруднення мікропластиком як на рослинне (зниження якості ґрунту), так і на тваринне (біоаккумуляцію) співтовариства продовольча та сільськогосподарська системи повинні зробити розробку технологій, які підвищують ефективність виявлення та ідентифікації, обмежують накопичення, модернізують переробку та утилізацію пріоритетним напрямом.

Мета роботи – здійснити оцінку ефективності сучасних технологій виявлення та видалення мікропластику з харчових продуктів з метою підвищення їхньої безпеки для споживачів та екологічної чистоти виробничих процесів.

Для досягнення мети роботи доцільно визначити такі **завдання**:

- проаналізувати накопичення мікропластику у харчових ланцюгах та продовольчих товарах;
- вивчити механізми потрапляння мікропластику в харчові продукти;
- здійснити аналіз джерел забруднення, зокрема харчової упаковки, води та ґрунтів;
- проаналізувати існуючі технології відбору проб, оцінити ефективність аналізу та ідентифікації мікропластику з різних матриць;
- експериментально перевірити міграцію мікропластику в харчові продукти з різних типів упаковки.

Такі завдання забезпечують комплексний підхід до дослідження і дозволяють отримати практичні результати для вирішення проблеми мікропластику в харчових продуктах.

Об’єкт дослідження – мікропластик.

Предмет дослідження – технологій виявлення та видалення мікропластику в харчових продуктах.

РОЗДІЛ 1

МІКРОПЛАСТМАСИ У ХАРЧОВИХ ЛАНЦЮГАХ ТА ПРОДОВОЛЬЧИХ ТОВАРАХ

1.1. Вплив пластикових відходів на здоров'я населення та довкілля

За період з 1950 по 2023 рік загальне виробництво сягнуло 9,5 мільярдів тонн пластику – більше однієї тони пластику на кожну людину, яка живе сьогодні (рис. 1) [1]. Збільшення населення та постійний попит на пластмасу та пластикові вироби спричиняють безперервне зростання виробництва пластмас, утворення пластикових відходів і супутнє забруднення навколишнього середовища. У 1950 році у світі вироблялося лише 2 мільйони тонн на рік. До 2023 року річний видобуток зріс майже в 230 разів і досяг майже 420 мільйонів тонн (рис. 2) [2].

Global plastic production with projections, 1950 to 2060

Annual production of polymer resin and fibers. Projections are based on the "business-as-usual" scenario which assumes that current policies remain unchanged in the foreseeable future.

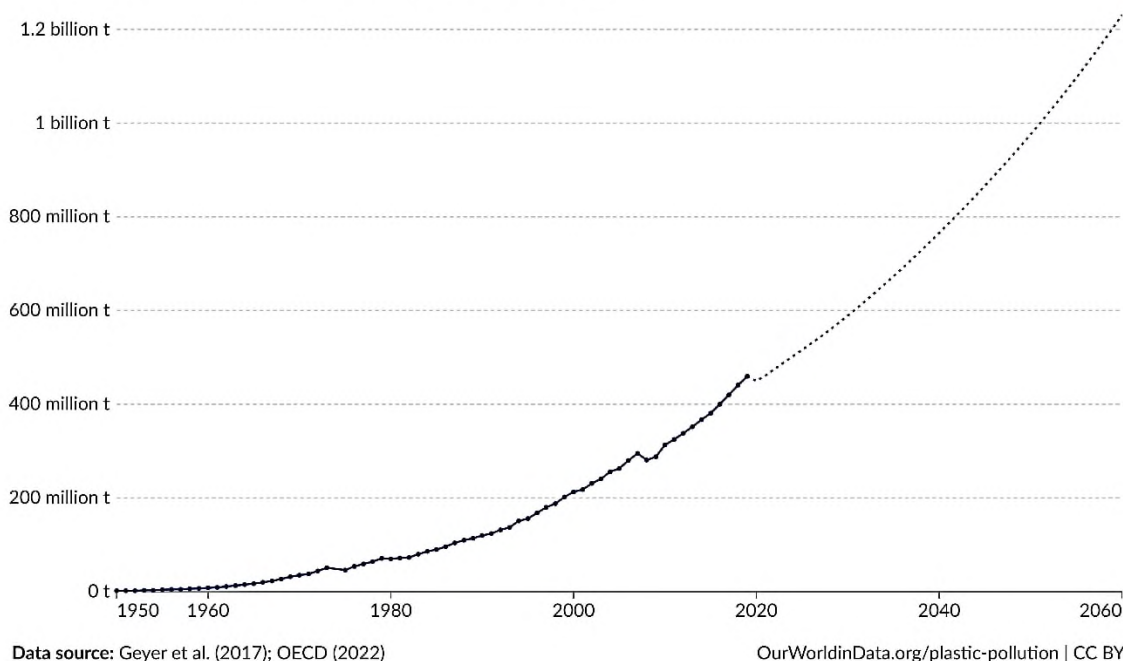


Рис. 1 – Глобальне виробництво пластику з прогнозами з 1950 по 2060 рік [1]

У 2023 році світове виробництво пластику досягло 413,8 мільйонів метричних тонн. Універсальність цієї групи матеріалів пояснює постійне

зростання виробництва з року в рік. Паралельно з цим зростанням ринкова вартість пластику також продовжує зростати. З появою спалаху COVID-19 світ спостерігав значне збільшення домашнього пластикового сміття, що призвело до глобальної катастрофи у сфері поводження з відходами [3].

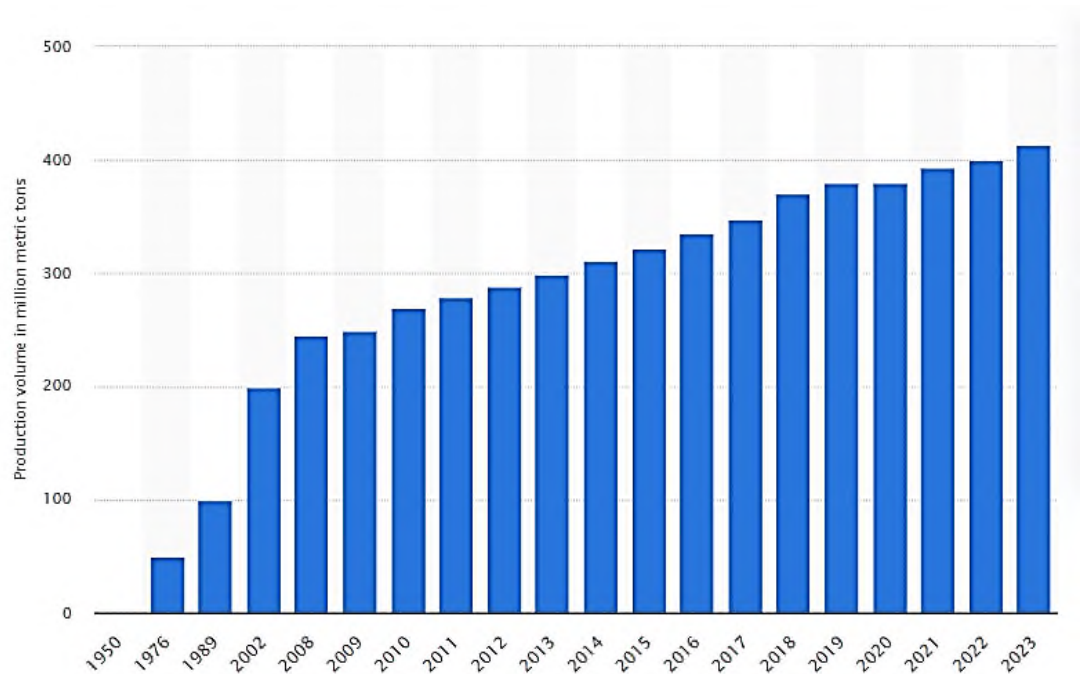


Рис. 2 – Річне виробництво пластмас у всьому світі з 1950 по 2023 рік [2]

Пластмаси складаються з синтетичних органічних полімерів, які широко використовуються в різних цілях, починаючи від пляшок для води, одягу, харчової упаковки, медичних товарів, електронних товарів, будівельних матеріалів тощо [4]. За останні шість десятиліть пластик став незамінним і універсальним продуктом із широким спектром властивостей, хімічного складу та застосувань. Хоча спочатку вважалося, що пластик нешкідливий та інертний, однак багаторічна утилізація пластику в навколишнє середовище призвела до різноманітних пов'язаних між собою проблем. Зараз загально визнано, що забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами є серйозним екологічним тягарем [5, 6], особливо у водному середовищі, де відбувається тривалий біофізичний розпад пластмас [6, 7], згубний негативний вплив на дику природу [8, 9] і обмежені можливості видалення пластику [9, 10].

Пластмаси – це полімери, виготовлені хімічним шляхом [3], який може бути термореактивним або термопластичним. Термореактивні полімери – це нафтохімічні продукти, які називаються незворотними полімерами, затверділими, які не можна переробляти. У той же час термопласт – це нафтохімічна речовина, яка в розм'якшеному стані може набувати різної форми для різних застосувань. Їх можна переробляти та повторно використовувати як сировину для розробки інших продуктів із доданою вартістю [9].

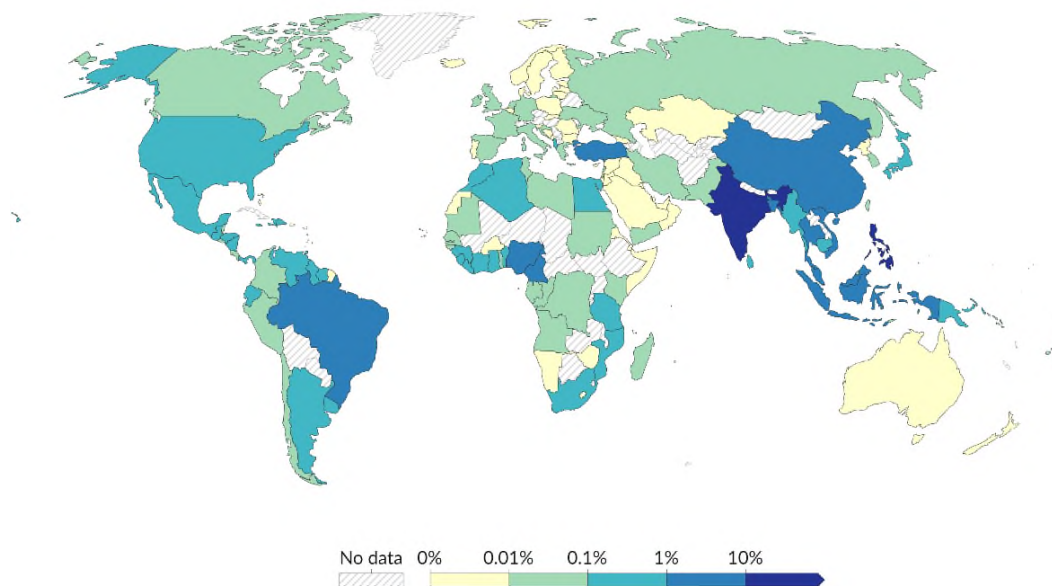
Переваги пластику в нашому повсякденному житті, виробництві, одязі, взутті, упаковці харчових продуктів, медичних приладдях, телекомунікаціях, логістиці, будівельних матеріалах, сільському господарстві, електричних об'єктах та виробництво має до його широкого застосування. Вони мають надзвичайні властивості, такі як низька вартість, довговічність, стабільність і легкість [10, 11]. Ці властивості розширили їх використання включаючи, але не обмежуючись упаковками для продуктів харчування та ліків. З 2021 по 2028 рік попит на пластикові матеріали для різних застосувань зріс із загальним річним зростанням на 4,2% [1]. Через такий попит у навколишнє середовище викидається більша кількість одноразового пластику, такого як мішки для сміття, пластикові пакети для покупок, пластикові ланч-бокси та посуд.

«Біле забруднення» – це символічний термін для забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами. Він позначає забруднення навколишнього середовища, спричинене викиданням промислових пластикових виробів [10]. Міцність і довговічність пластику становлять екологічну небезпеку для навколишнього середовища, знищуючи мешканців істот через їх стійкість до природних сил, таких як біодеградація, ультрафіолетове (УФ) розкладання, механічне стирання та окислення. Ці процеси послаблюють якість цілісності полімеру, який розпадається на фрагменти менші за 5 мм, які називаються «первинним мікропластиком» [12].

Різновиди пластмас, які використовуються у виробництві багатьох витратних матеріалів, включаючи медичні прилади, упаковку для харчових продуктів і пляшки для води, містять токсичні хімікати, такі як фталати, важкі метали, бісфенол А, бромовані антипірени, нонілфенол, поліхлоровані біфенілетери, дихлордифенілдіхлоретилен, фенантрен тощо. Після закінчення терміну експлуатації ці пластики зазвичай вивозяться на звалище разом із твердими побутовими відходами. У багатьох випадках плівки та пакувальні пластики після використання утилізуються, однак через їхню довговічність такі пластики знаходяться скрізь і стійкі в навколишньому середовищі. Пластмаси в електронних відходах (електронні відходи) стали серйозною глобальною проблемою для навколишнього середовища та громадського здоров'я через великий обсяг виробництва та наявність неадекватної політики управління в кількох країнах [10]. Дослідження щодо моніторингу та впливу пластикових відходів нині активно розробляється і звіти викликають занепокоєння. Зокрема на рисунку 3 наведено, як пластик, що викидається в океани, розподіляється за регіонами світу [1].

Share of global plastic waste emitted to the ocean, 2019

Annual estimate of plastic emissions. A country's total does not include waste that is exported overseas, which may be at higher risk of entering the ocean.



Data source: Meijer et al. (2021)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Рис. 3 – Частка світових пластикових відходів, викинутих в океан, 2019 рік [1]

Наразі одноразова упаковка є найбільшим сектором, на який припадає майже 40% загального використання пластику в Європі [13], далі йдуть споживчі товари, матеріали для будівництва, автомобілів, електротехніки та сільського господарства на 22%, 20%, 9%, 6% і 3% відповідно (рис. 4) [14]. У 2015 році було підраховано, що найвищий рівень виробництва в Азії (49% від загального світового виробництва, при цьому Китай є найбільшим світовим виробником (28%), за ним йдуть Північна Америка та Європа з 19% кожна. З точки зору виробництва, решта регіонів менш важливі, хоча і не обов'язково з точки зору споживання пластику [14].

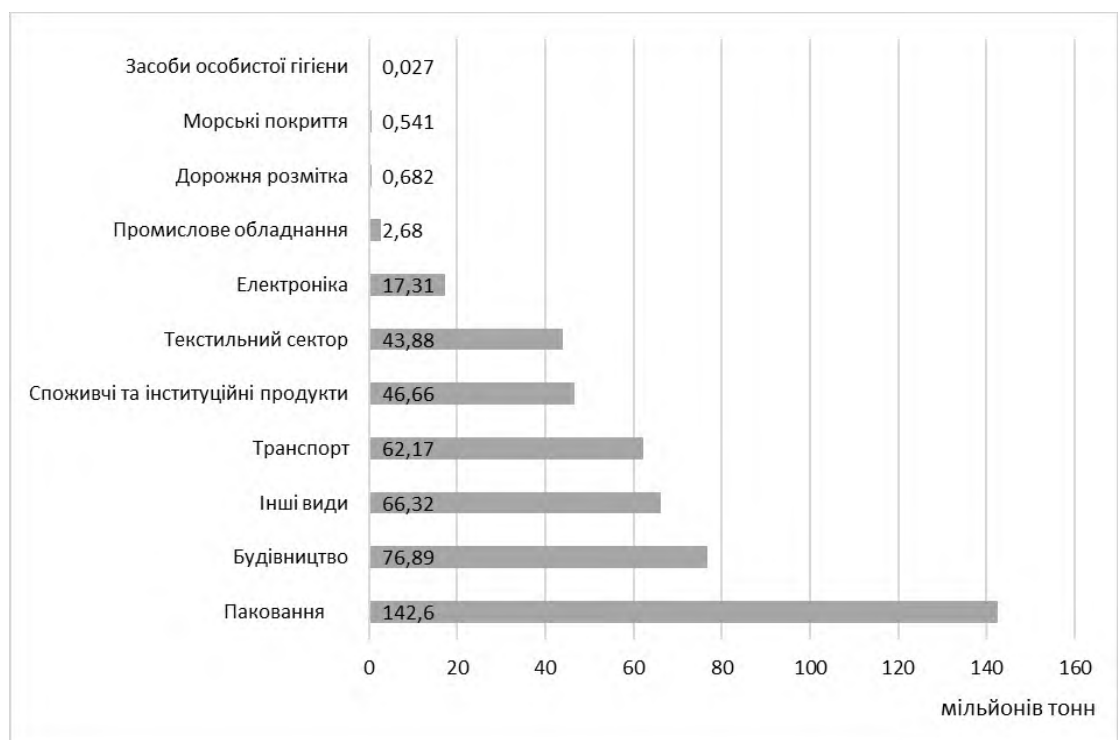







Рис. 4 – Щорічне глобальне використання пластику

Існують різні види пластмас на основі їхні складові та тип матеріалів, використаних при їх виробництві.

Таблиця 1 показує різні види пластмас, їхні властивості та загальне використання [15].

Таблиця 1 – Види пластмас, їх властивості та застосування [15].

Символи	Види пластмас	Загальне використання	Властивості	Перероблено в
 ПЕТЕ	Поліетилен терефталат	Безалкогольні напої, пляшки для води, контейнери, заправки для	Прозорий, міцний, стійкий до розчинників, пропускає газ і	Подушки і наповнення спальних мішків, одяг, пляшки

		салатів, підноси для печива та куполи для салатів.	вологу, розм'якшується при 80 °С.	безалкогольних напоїв, килимове покриття, будівельна ізоляція
	Поліетилен високої щільності (HDPE)	Сумки для покупок, пакети для заморозки, відра, шампунь, молоко пляшки, контейнери для морозива, пляшки для соку, пляшки для хімікатів і миючих засобів, жорсткі сільськогосподарська труба, ящики.	Жорсткий, стійкий до хімічних речовин і вологи, воскова поверхня, непрозорий, розм'якшується при 75 °С, легко забарвлюється, обробляється і формується	Сміттеві баки, компостні баки,
	Полівінілхлорид (ПВХ) Пластифікований полівінілхлорид ПВХ-П	Контейнер для косметики, сантехнічні труби та фітинги, електропроводка, блістерні упаковки, облицювання стін, покриття даху, пляшки, садовий шланг, підошви для взуття, оболонка кабелю, мішки для крові та трубки.	Міцний, жорсткий, розм'якшується при 80 °С, може бути прозорим, може бути зварений розчинником. Гнучкий, прозорий, еластичний, можна зварювати розчинником.	Бункери для компосту
	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Пакети для сміття, зрошувальні труби, плівка для мульчі, харчова плівка, пакети для сміття, віджимні пляшки.	М'який, гнучкий, воскова поверхня, напівпрозорий, розм'якшується при 70°С, легко дряпається.	Вкладиші для контейнерів, листи піддонів
	Поліпропілен (PP)	Посуд для мікрохвильової печі, ланч-бокси, пакувальна стрічка, садові меблі, чайники, пляшки та ванночки для морозива, мішки для картопляних чіпсів, соломинки	Твердий і напівпрозорий, розм'якшується при 140 °С, напівпрозорий, стійкий до розчинників, універсальний.	Кілки, урни, труби, палетні листи.

використовуваним пластиком є поліетилен. Поліетилен високої щільності – це термостійкий пластик, який виготовляють з нафти. Він є основною складовою холодильників, пляшок із миючими засобами, іграшок, контейнерів для молока, різновидів пластикових пакетів для продуктів тощо. У поліетилені високої щільності немає фталатів або бісфенолу А. Контейнер з поліетилену високої щільності зазвичай вважається безпечним для напоїв і їжі, оскільки він не становить жодної небезпеки для здоров'я, навіть незважаючи на те, що деякі дослідження показали, що тривалий вплив сонячного світла на пластик може бути шкідливим [1].

Полівінілхлорид (ПВХ). Полівінілхлорид (ПВХ), тип термостійкого полімеру, використовується для пакування фруктових соків, кулінарної олії тощо. ПВХ вважається дуже токсичним через наявність хімічних складових, таких як важкі метали, діоксини, бісфенол А та фталати. Залежно від пластифікації ПВХ є еластичним завдяки наявності фталатів. Фталати шкідливі для людини. Весь життєвий цикл ПВХ, який включає виробництво, використання та утилізацію, може спричинити серйозні ризики для навколишнього середовища та здоров'я людей, отже, його використання значно скоротилося. Однак завдяки економічності та універсальності ПВХ залишається дуже популярним у виробництві товарів народного споживання. Повідомлялося, що ПВХ викликає хронічний бронхіт, вроджені дефекти, генетичні зміни, рак, шкірні захворювання, глухоту, погіршення зору, виразки, дисфункцію печінки та розлад травлення [4].

Поліетилен низької щільності. Поліетилен низької щільності термостійкий, крихкий, гнучкий і жорсткий. Зазвичай використовується для упаковки молока, заморожених продуктів і соків. Оскільки пластик не містить компонентів, шкідливих для організму людини, його використання вважається безпечним для напоїв і їжі [4].

Поліпропілен. Поліпропілен, різновид пластику, міцний і напівпрозорий. Він важчий і міцніший за поліетилен. Використовується для

упаковки ліків, йогуртів, кетчупів, напоїв тощо. Пластмаси з поліпропілену не містять шкідливих речовин і, як і поліетилен, поліпропіленові контейнери вважаються безпечними для людини як упаковки для харчових продуктів і напоїв [4].

Полістирол. Полістирол, тип пластику на основі нафти, містить бензол, який є канцерогенним для людини [4].

Полістирол широко використовується у виробництві ізоляторів і пакувальних матеріалів. Вироби зі стиролу небезпечні для здоров'я. Дослідження Дауті та ін. [16] показали, що тривалий вплив невеликої кількості стиролу може бути нейротоксичним і спричиняти цитогенетичні, канцерогенні та гематологічні ефекти. Міжнародне агентство з дослідження раку (IARC) класифікувало стирол як канцероген для людини [4].

Полікарбонат. Полікарбонати використовуються для упаковки споживчих товарів, таких як багаторазові пляшки. Він містить ВРА. Через вплив високої температури ВРА може вимиватися з полікарбонатної ємності в напої або їжу, що в них зберігається. Оскільки в кількох дослідженнях повідомлялося про ризик ВРА для здоров'я, використання полікарбонатного пластику значно зменшилося [4].

Розмір пластику: Макро та мікропластик. Розміри пластмас можна використовувати для їх класифікації, крім типів пластмас і їх хімічного складу.

Існує дві основні класифікації пластмас за розміром:

- 1) Макропластик (це пластмаси більше 20 мм у діаметрі);
- 2) Мікропластик (МП) (пластик діаметром менше 5 мм). Цей мікропластик або утворюється при виробництві виробів і називається первинним мікропластиком, або утворюється в результаті деградації макропластику, і називається вторинним мікропластиком [17, 18].

Мікропластик (МП) повсюдно поширений у твердій формі в навколишньому середовищі з різними розмірами, структурою, щільністю, кольорами, типами полімерів та включенням частинок пластику з іншими

забруднювачами. Явища транспортування МР в екосистемі пов'язані виключно з цими характеристиками [19].

На основі морфологічного аналізу МП можна розділити на шість категорій: волокно, сфера, піна, лист, фрагмент і плівка (табл. 2) [20].

Таблиця 2 – Атрибути мікропластику у водному середовищі

Форма	Розмір в мм	Тип полімерів	Колір
Піна, плівка, волокно, фрагмент	0,5–5,0	ПВХ, ПК, ПЕ, ПС, ПП	Червоний, безбарвний, синій, білий
Глобула, нитка, фрагмент	0,1–5,0	ПС, ПЕС, ПЕТ	Білий, прозорий, червоний, чорний, жовтий, синій
Лист, нитка, фрагмент, плівка	2,0 – 5,0	ПЕС, ПЕТ, КП	Білий, безбарвний, рожевий, коричневий, чорний, синій
Довільний	> 5,0	ПП, ПП	–
Волокно, пінопласт, лист, фрагмент	0,5 – 5,0	ПЕТ, ПЕ, ПС, ПВХ	–
Нитка, глобула, плівка, фрагмент	0,05 – 0,3 і 0,3 – 5,0	PS, PET, PE, CP, PA, PP	–
Лінійний, плівка, глобула, зернистість	0,5 – 5,0	ПВХ, ПП, ПЕ	Білий, безбарвний, чорний
Лист, нитка, піна, фрагмент	0,1–5,0	ПЕТ, ПЕ, ПС, ПЕ	–
Лінійний, плівка, глобула, фрагмент	0,02 – 5,0	ПВХ, ПЕ, ПУ, ПА, ПП, ПЕТ	Синій, білий, червоний, чорний, жовтий, безбарвний
Гранули, зерниста	0,5 – 5,0	ПС, ПЕТ, ПЕ	Фіолетовий, прозорий, червоний, синій
Лінійний, лист, фрагмент, піна	0,1 – 5,0	ПС, ПП, ПЕ	–

де, РС –полістирол, ПВХ– полівінілхлорид, РА – поліамід, ПЕТ – поліетилентерефталат, ПК – полікарбонат, ПП – поліпропілен, ПЕС – поліестер, РЕ – поліетилен

У першу чергу розповсюдження пластикових відходів пов'язують з населенням. Збільшення населення призвело до зростання попиту на пластик і пластикові вироби. Неправильна утилізація відходів із пластмаси та пластмасових виробів призвела до забруднення навколишнього середовища, що проявляється кількома способами, включаючи погіршення природної краси навколишнього середовища, заплутування та загибель

організмів, блокування каналізаційної системи в містах, що призводить до створення сприятливого середовища для розмноження комарів та інших збудників хвороб і створення неприємного запаху, зменшення просочування води та нормальної аерації сільськогосподарських ґрунтів, що спричиняє зниження продуктивності на таких землях [21, 22,].

У робочому та житловому середовищі людини пластикові вироби присутні у великих обсягах. Забруднення пластиком і пластиковими виробами може завдати шкоди та забруднити наземне середовище, а згодом може потрапити у водне середовище. Існує дефіцит даних про обсяг пластикових відходів на суші порівняно з великою кількістю даних про пластикове сміття в морському середовищі існування, незважаючи на те, що близько 80% пластикових відходів у морі походить із наземних джерел. Викидання пластику на землю або захоронення пластику призводить до абіотичного та біотичного розкладання пластику, де пластикові добавки (наприклад, стабілізатори, шкідливі барвники, пластифікатори та важкі метали) можуть вимиватися та зрештою просочуватися в різні аспекти навколишнього середовища, тим самим спричиняючи ґрунт та забруднення води. Мікропластик, а також синтетичні полімерні волокна все ще можна виявити через п'ять років після того, як вони потрапили в навколишнє середовище. Хлорований пластик здатний вимивати токсичні хімікати в ґрунт і згодом просочуватися в підземні води або навколишню водну систему, тим самим забруднюючи екосистему [10, 11, 23].

За оцінками в океанах світу вже знаходиться близько 165 мільйонів тонн пластикових відходів, і щорічно викидається в середньому 8 мільйонів тонн. Як правило, пластик в океанах може розкладатися протягом року, але не повністю. Під час цього процесу розкладання пластику токсичні хімікати, такі як полістирол і бісфенол А, можуть вивільнитися у воду спричиняє забруднення води [23]. Відходи, знайдені в океанах, приблизно на 80% складаються з пластику. Пластикове сміття, яке плаває в океані, може бути швидко колонізовано морськими організмами.

Забруднювачі з мікропластику є біодоступними для багатьох морських мешканців через їх присутність у бентосних і пелагічних екосистемах і їхні малі розміри [24]. Повідомлялося, що в морській екосистемі пластик концентрує на собі та поглинає забруднення, присутні в морській воді з інших джерел. Прикладами таких забруднювачів є стійкі органічні забруднювачі, такі як нонілфенол, поліхлоровані дифеніли, дихлордифенілдіхлоретилен (ДДЕ) і фенантрен. Понад 260 видів морських організмів, таких як черепахи, безхребетні, морські птахи, риби та ссавці, проковтнули або заплуталися в пластиковому смітті, що призводить до обмеження руху, голодування, порушення репродукції, появи виразок, рваних ран та навіть загибелі [23, 24, 25].

Приблизно 10% побутових відходів – це пластик, який здебільшого потрапляє на звалище. Незважаючи на те, що захоронення є найпоширенішим традиційним підходом до управління відходами в багатьох країнах, дефіцит місця для звалищ стає серйозною проблемою.

Коли пластикові відходи, які були захоронені, остаточно розкладаються в повітря виділяється вуглекислий газ і метан. Орієнтовний обсяг викидів в атмосферу складає 20 мільйонів тонн. CO₂ також викидається в атмосферу під час спалювання пластику та пластмасових виробів, і цей газ здатний затримувати тепло та перешкоджати його виходу з землі, що спричиняє глобальне потепління. Забруднення повітря є однією з головних екологічних загроз здоров'ю населення, і воно є причиною понад 6 мільйонів смертей, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища. Відкрите спалювання пластику та пластикових виробів вивільняє такі забруднюючі речовини, як важкі метали, діоксини, поліхлоровані дифеніли та фурани, які при вдиханні можуть спричинити ризики для здоров'я, особливо респіраторні розлади. Роль пластику в забрудненні повітря важко переоцінити, і такий вплив на майбутні покоління може бути величезним [26, 27].

Мікропластик може накопичуватися в ґрунті різними механізмами.

Одним із основних джерел мікропластику в ґрунті є застосування мульчі та плівок на основі пластику в сільському господарстві. Ці матеріали, які зазвичай використовуються для боротьби з бур'янами та утримання вологи, можуть з часом розкладатися, вивільняючи частинки мікропластику в ґрунт. Крім того, розкладання великого пластикового сміття, такого як пляшки та пакети, також може сприяти забрудненню ґрунту мікропластиком. Ці фрагменти пластику можуть переноситися вітром або водою і зрештою осісти в наземному середовищі [28].

Коли мікропластик потрапляє в ґрунтове середовище, він може накопичуватися різними шляхами. Одним із шляхів є застосування продуктів, що містять мікропластик, коли частинки безпосередньо вводяться в ґрунтову матрицю.

Іншим шляхом є осадження мікропластику з атмосфери, куди він переноситься вітром або дощем і осідає на поверхні ґрунту. Мікропластик також може накопичуватися в ґрунті через розкладання більших пластикових виробів, коли частинки руйнуються та потрапляють у ґрунт.

На транспортування мікропластику в ґрунті впливає кілька факторів. Текстура ґрунту відіграє важливу роль, оскільки мікропластик має тенденцію до більшого накопичення в ґрунтах із вищим вмістом глини та мулу, які мають менші розміри пор та більший потенціал для утримання частинок [29]. Наявність органічних речовин у ґрунті також може впливати на транспорт мікропластику, до прикладу, органічні речовини зв'язуються з мікропластиком і полегшують його рух через профіль ґрунту. Крім того, наявність дощових черв'яків та інших організмів, що живуть у ґрунті, може сприяти транспортуванню мікропластику, оскільки вони створюють нори та канали, які забезпечують рух частинок. Мікропластик може змінювати фізичні властивості ґрунту, впливаючи на його структуру, пористість і здатність утримувати воду. Наявність мікропластику може призвести до збільшення ущільнення ґрунту, зменшуючи проникнення води та повітря в ґрунт. Це може призвести до поганого росту коренів і зниження доступності

поживних речовин для рослин. Крім того, мікропластик може сприяти утворенню ґрунтових агрегатів, що може додатково впливати на структуру та стабільність ґрунту. Мікропластик також може впливати на кругообіг поживних речовин у ґрунтових екосистемах. Ці частинки можуть адсорбувати та накопичувати поживні речовини, такі як азот і фосфор, на своїх поверхнях. Це може призвести до зниження доступності поживних речовин для рослин і мікроорганізмів, впливаючи на їхній ріст і загальну продуктивність. Крім того, мікропластик може змінювати мікробні спільноти в ґрунті, потенційно порушуючи важливі процеси кругообігу поживних речовин, такі як фіксація азоту та розкладання органічних речовин [30].

Фундаментальним кроком у управлінні забрудненням мікропластиком наземних екосистем є створення комплексних програм моніторингу та оцінки. Ці програми мають бути спрямовані на визначення джерел, розподілу та надлишку мікропластику в різних наземних середовищах.

Тварини піддаються впливу пластикових відходів переважно через ковтання та заплутування, однак більшість з них сприймають пластикові відходи, за їжу, тому ковтають їх. Крім того, заплутування в пластикових виробках, таких як сітки, може завдати шкоди ушкодження та навіть смерті морських тварин. Як доводять дослідження понад 260 різних видів хребетних і безхребетних тварин ковтають пластик або обплутані пластиком або пластиковими виробами, з більш ніж 400 000 смертей морських ссавців [31].

Забруднення моря пластиковими відходами найбільше впливає на морських черепах та інші види, основною їжею яких є медузи, оскільки вони часто плутають викинуті пластикові пакети з медузами. Подібна ситуація типова для морських птахів, які можуть сплутати мікропластик з каракатицями або з рибою, яка може сприйняти пластикові відходи за свою природну здобич.

Поглинання пластикових відходів може спричинити обструкцію та

фізичне пошкодження травної системи птахів, зменшити травну здатність системи, що призведе до голодування, недоїдання та, зрештою, смерті.

Багато птахів, черепах, риби, тюленів та інших морських тварин загинули від утоплення або задухи в результаті заплутування в пластикових уламках. Було виявлено, що заплутування становить ризик для здоров'я приблизно 243 видів морських мешканців, часто закінчуючись летальним результатом. Заплутування тварин пластиковим сміттям також сприяє смерті від хижаків, оскільки тварини не можуть самостійно розплутатися та втекти. Коралові рифи були пошкоджені через перетягування сіток та інших пластикових виробів уздовж морського дна. Часто викинуті рибальські сіті, які також називають «сітками-привидами», захоплюють морських тварин, що призводить до голоду та смерті. У таблиці 3 наведений вплив різних видів пластику на тварин і механізм(и) дії [14].

Таблиця 3 – Вплив пластику на тварин та механізм(и) їх дії.

Види	Видовий варіант	Тип пластику	Ефекти
Морські птахи	Буревісник великий	Кришки від пластикових пляшок	Голодування внаслідок непрохідності шлунково-кишкового тракту
	Пінгвін магеланський	Фрагменти, соломинки	Перфорація шлунку
Морські черепахи	Зелені морські черепахи	Поліетиленові пакети та інше сміття	Ускладнення руху дитинчат у бік моря, контакт з хижаками
	Шкіряста черепаха	Поліетиленові пакети та сміття	Блокує і травмує клоаку, перешкоджає відкладанню яєць
Риби	Великоокий тунець	Лінійні фрагменти	Проковтування осколків пластику
	Медака японська	Фрагментований пластик	Печінковий стрес від впливу пластику
	Псевдохроміс	Поліетиленові пакети	Загибель
	Личинки окуня	Частинки мікропластику	Пригнічення вилуплення, зниження швидкості росту та зміна поведінки
Ссавці	Морський котик	Частинки пластику	Біонакопичення твердих частинок пластику здобиччю
	Кашалот	Поліетиленові пакети та сміття	Розрив шлунку і голодування
	Австралійський морський лев	Сітки	Заплутування призвело до смерті
Безхребетні	Мідії	Частинки	Накопичення мікропластику

		мікропластику	в кровоносній системі
	Устриця	Частинки мікропластику	Порушення розмноження
	Норвезький омар	Пластикові нитки та частинки	Проковтування і накопичення пластику в кишечнику

Загально-прийнято вважати, що пластикові полімери не дуже загрожують людині, однак різні типи добавок і залишкові мономері, які, можливо, зберігаються в цих полімерах, можуть викликати ризики для здоров'я. Більшість добавок, присутніх у пластмасі, є потенційними канцерогенами та руйнівниками ендокринної системи [32]. Ковтання, контакт зі шкірою та вдихання є основними шляхами впливу цих добавок на людей. У таблиці 4 наведено основні види добавок, які використовуються в виробництві пластикових виробів та мають різний шкідливий вплив на людину.

Таблиця 4 – Добавки, що використовуються при виробництві пластику, їх вплив і види пластику.

Токсичні добавки	Використання	Вплив	Види пластику
Бісфенол А	Пластифікатори, вкладиш для банок	Імітує естроген, розлад яєчників	Полівінілхлорид (ПВХ), Полікарбонат (ПК)
Фталати	Пластифікатори, штучні ароматизатори	Порушується обмін і активність тестостерону, рухливість сперматозоїдів	полістирол (РС), Полівінілхлорид (ПВХ)
Стойкі органічні забруднювачі (СОЗ)	Пестициди, антипірени тощо.	Можливі неврологічні та репродуктивні розлади	Всі пластики
Діоксини	Утворюється при низькотемпературному горінні ПВХ	Канцероген, перешкоджає виробленню тестостерону	Всі пластики
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ)	Використання для виготовлення пестицидів	Токсичність, розвиток репродуктивної дисфункції	Всі пластики
Поліхлоровані біфеніли (ПХБ)	Діелектрики в електрообладнанні	Порушується обмін і активність гормонів щитовидної залози	Всі пластики
Мономері стиролу	Продукти розпаду	Канцероген, може утворювати аддукти ДНК	полістирол

Нонілфенол	Антистатична, протитуманна, ПАР (у миючих засобах)	Імітує естроген	ПВХ
------------	--	-----------------	-----

Як приклад наведемо вплив бісфенолу А (ВРА). Пластик до складу якого входить ця речовина використовується для обробки внутрішньої оболонки харчових банок, багаторазових пляшок для води та дитячих пляшечок. У результаті багаторазового використання контейнерів для напоїв і їжі протягом тривалого періоду часу молекули бісфенолу А можуть вимиватися. Процес вимивання бісфенолу А з пластику прискорюється за рахунок зберігання кислих або лужних продуктів, які можуть розщепити пластикові полімери, або ж високої температури. ВРА змінює експресію генів гормонів щитовидної залози, змінюючи її біологічні функції, такі як метаболізм і розвиток. Крім того, ВРА підвищує транскрипційну корепресорну активність рецепторів гормонів щитовидної залози, спричиняючи зниження активності рецепторів гормонів щитовидної залози. Це викликає гіпотиреоз. Повідомлялося також про нервово-поведінкові розлади, пов'язані з ВРА (наприклад, аутизм), аномальний розвиток уретри/статевого члена у чоловіків, раннє статеве дозрівання жінок і збільшення гормонально-опосередкованих онкологічних захворювань (наприклад, молочної залози та простати) [33].

Розуміючи ступінь забруднення пластиком навколишнього середовища, політики та дослідники повинні розробити цілеспрямовані стратегії для ефективного пом'якшення проблеми. Програми моніторингу можуть включати регулярний відбір проб і аналіз ґрунту, опадів і рослинності для відстеження присутності та концентрації мікропластику з часом.

1.2. Технології утилізації пластику

Одним із основних джерел мікропластику в наземних екосистемах є неправильна утилізація пластикових відходів. Щоб пом'якшити цю проблему, важливо вдосконалити практику поводження з відходами та сприяти їх переробці. Уряди та місцеві органи влади повинні впроваджувати

суворі правила та політику для заохочення належної утилізації та переробки відходів. Це може включати такі ініціативи, як сприяння використанню біорозкладаних або компостованих матеріалів, впровадження програм розширеної відповідальності виробника та створення підприємств з переробки пластикових відходів. Підвищення обізнаності громадськості про вплив мікропластику на наземні екосистеми має вирішальне значення для сприяння змінам поведінки та відповідальному споживанню. Можна проводити просвітницькі кампанії для інформування людей про джерела та наслідки забруднення мікропластиком. Це може включати освітні програми в школах, громадські семінари та інформаційні кампанії через різні засоби масової інформації. Наділяючи людей знаннями, вони можуть робити усвідомлений вибір і застосовувати стійкі практики, які мінімізують викид мікропластику в навколишнє середовище.

За оцінками, до 2050 року світове виробництво пластику становитиме приблизно 1,1 мільярда тонн [2]. Агентство з охорони навколишнього середовища повідомило, що з тонни пластикових відходів, які утворюються, лише 7% щорічно переробляється, 8% пластику спалюється, а решта відправляється на звалища. Висока енергоємність і вартість процесу захоронення призводять до того, що ці відходи потрапляють у водойми [34]. Термореактивні, термопластичні та еластомерні пластикові відходи не розкладаються та можуть призвести до первинного забруднення навколишнього середовища [35]. Тому правильне поводження з пластиковими відходами є ключем до вирішення проблем навколишнього середовища та сталого розвитку. Традиційна модель використовує ресурси на основі стратегії «бери, споживай, витрачай». Необхідно перейти від лінійної моделі до генеративної та відновлювальної моделі, заснованої на ідеї циклічної економіки. Тому пластикові відходи зазвичай викидають на сміттєзвалища та утилізують у навколишнє середовище.

На сьогоднішній день у всьому світі вироблено понад 9200 мільйонів метричних тонн (Мт) пластику. З них близько 6900 Мт не піддалися

жодному виду переробки, що призвело до накопичення на звалищах або розсіювання в навколишньому середовищі. Це означає втрачену економічну можливість і завдає значної шкоди здоров'ю навколишнього середовища. Щоб зберегти життєздатність цього багатомільярдного матеріалу, вкрай важливо вирішити проблему складності пластикових відходів і вжити трансформаційних заходів для переробки пластикових виробів, зосереджуючись на стійкості та закінченні терміну служби [36]. Серед нещодавно найбільш доступних варіантів поводження з пластиковими відходами були:

- захоронення (відходів до сміттєзвалища), з їх обмеженою місткістю, що створює ризик вимивання токсичних хімікатів у навколишнє середовище;

- перетворення відходів в енергію через спалювання з потенціалом вивільнення небезпечних хімічних речовин і газів (наприклад, діоксинів і фуранів)

- переробка пластикових відходів у нові продукти.

Пластикові відходи на звалищах є відображенням нереалізованого економічного потенціалу та шкоди, завданої навколишньому середовищу. Хоча рекуперація енергії з пластику забезпечує зручність без трудомісткого сортування, необхідного для переробки, вона обмежує рекуперацію матеріалу низьким рівнем конверсії енергії та посилює забруднення атмосфери та глобальне потепління.

Стандартні методи управління відходами для пластикових матеріалів включають термічне розкладання, захоронення, механічне подрібнення, спалювання, переробку та мікробіологічне розкладання. Основною проблемою, яка залишається в управлінні пластиковими відходами, є швидка та ефективна ідентифікація та сортування пластикових відходів [11].

Пластикові матеріали менше переробляються порівняно з іншими матеріалами, які споживаються у великих кількостях, такими як скло, папір, кераміка та алюміній. Повна переробка пластику – це складна технологія

через його багатоступеневу обробку, утилізацію та сортування, розповсюдження та використання [11, 12].

Пластикові відходи можуть бути перероблені хімічним, механічним або термічним шляхом (табл. 5). На початковому етапі їх потрібно відсортувати, що зазвичай виконується автоматично за допомогою різних технологій, таких як флуоресценція, електростатика, інфрачервоне випромінювання, флотація та спектроскопія [36].

Таблиця 5 – Переваги та недоліки різних методів переробки пластикових відходів

Методи	Переваги	Обмеження
Механічний	Це найпростіший процес переробки метало-матричних композитів, і він особливо добре підходить для армованих волокнами полімерів (АВП), де руйнування волокон здійснюється шляхом подрібнення. Об'єкти переробки прості та економічні, споживають менше енергії та ресурсів, ніж процеси хімічної або фізичної переробки.	Утворення циклічних і лінійних олігомерів впливає на придатність для друку та фарбування кінцевого продукту. Зменшення в'язкості розплаву пояснюється гідролітичною та термічною деполімеризацією.
Хімічний	Більші швидкості утворення мономеру з меншим часом реакції. Вищий потенціал рентабельності завдяки застосуванню нових матеріалів. Найбільш економічно ефективні підходи до вискоефективних композитів для переробки.	Дорогі інвестиції в розвиток технічної інфраструктури/процесів. Доцільність промислового масштабу ще не повністю встановлена. Потрібні високі температури та багато енергії.

Слід звернути увагу, порівняно з процесом спалювання, механічна переробка описується як неефективна через складність суміші пластикових відходів; і отже більшість пластикових відходів спалюється [35, 36]. Але, виходячи з літератури, техніка механічної переробки є найбільш використовуваною технікою переробки пластику завдяки швидкому процесу та ефективності. Енергетична переробка пластикових відходів зазвичай

здійснюється через спалювання, в якому значна кількість енергії може бути регенерована та використана в різних сферах. Серед усіх цих методів переробка пластикових відходів може водночас забезпечити екологічний і прийнятний підхід.

Альтернативою захороненню пластикових відходів є спалювання, але зростає занепокоєння щодо можливого викиду в атмосферу небезпечних хімікатів під час цього процесу. Наприклад, випари пластикових відходів вивільняють галогеновані добавки, а фурані, діоксини та поліхлоровані біфеніли виділяються в навколишнє середовище під час спалювання пластику [36].

Газоподібні виділення в процесі спалювання пластику та пластикових композитних виробів дуже небезпечні. У таблиці 6 наведені сполуки, що виділяються під час спалювання ПВХ, і вплив цих сполук на здоров'я. У процесі спалювання пластику утворюється сажа, зола та різні порошки, які згодом осідають на рослинах і ґрунті з можливістю міграції у водне середовище. Оподи можуть призвести до того, що деякі з цих токсичних сполук потрапляють у ґрунт, забруднюють ґрунтові води або поглинаються рослинами, що ростуть на цьому ґрунті, таким чином включаючись у харчовий ланцюг. Деякі з цих продуктів спалювання пластику можуть вступати в хімічну реакцію з водою, і отримані сполуки можуть змінювати рН, тим самим змінюючи функціонування водних екосистем [26, 35, 36].

Таблиця 6 – Сполуки, що утворюються при спалюванні полівінілхлориду, та їх шкідливий вплив.

Сполука	Вплив(и) на здоров'я
Оцтовий альдегід	Ушкоджує нервову систему.
Ацетон	Подразнює очі, дихальні шляхи.
Бензальдегід	Подразнює очі, шкіру, дихальну систему, обмежує роботу мозку.
Бензол	Канцерогенний, негативно впливає на кістковий мозок, печінку, імунну систему.
Формальдегід	Серйозне пошкодження очей, канцероген, може викликати набряк легень.
Фосген	Газ, який використовувався в Першій світовій війні. Шкідливий для очей, шкіри та органів дихання.

Поліхлорований дибензодіоксин	Канцероген, подразнює шкіру, очі та дихальну систему. Пошкоджує кровоносну, травну та нервову систему, печінку, кістковий мозок.
Поліхлорований дибензофуран	Подразнює очі та дихальну систему, викликає астму.
Соляна кислота	Очі, шкіра та дихальні шляхи.
Саліциловий альдегід	Подразнює очі, шкіру та дихальні шляхи. Може впливати на центральну нервову систему.
Толуол	Подразнює очі та дихальні шляхи, може викликати депресію.
Ксилол	Подразнює очі. Він також може впливати на центральну нервову систему, знижувати рівень свідомості та погіршувати здатність до навчання.
Пропілен	Ураження центральної нервової системи шляхом зниження свідомості.
Вінілхлорид	Канцероген, подразнює очі, шкіру та дихальну систему. Впливає на центральну нервову систему, печінку, селезінку, органи кровотворення.

Через потенційний вплив забруднення на навколишнє середовище спалювання пластику менше використовується для поводження з відходами, ніж захоронення та переробка. Помітними винятками є такі європейські країни, як Швеція та Данія, а також Японія з величезними сміттєспалювальними установками для поводження з твердими побутовими відходами, включаючи пластик.

Переробка пластику є головним аспектом світових зусиль щодо мінімізації щорічних мільйонів тонн пластику в потоці відходів. Існує чотири основні категорії вторинної переробки [37]:

- первинна (передбачає механічну переробку пластику в новий продукт з еквівалентними властивостями);
- вторинна (передбачає механічну переробку пластику в продукт із нижчими властивостями);
- третинна (передбачає рекуперацію хімічних складових пластмас);
- четвертинна (передбачає рекуперацію енергії з пластмас).

Порівняно з прибутковою переробкою металу, або схожою за вартістю переробкою скла, переробка пластику є значно складнішою через кілька технічних проблем, які необхідно вирішити. Головною з них є та, що

розплавлення різних типів пластику часто викликає розділення фаз, подібне до нафти та води, і вони застигають у цих шарах. Отримані межі фаз відповідають за структурну слабкість кінцевого продукту, що обмежує застосування цих полімерних сумішей. В першу чергу це стосується поліетилену та поліпропілену. Можна збільшити відсоток пластику з можливістю повної переробки, якщо виробники пакування зменшать змішування вихідних матеріалів і перестануть використовувати різноманітні добавки. З огляду на це, Асоціація переробників пластмаси випустила керівництво з проектування щодо переробки пластмас [38].

Щоб боротися зі постійним забрудненням навколишнього середовища пластиком і приборкати його, потрібна реалістична політика, якої слід належним чином дотримуватися та застосовувати. Це має включати потребу в глобальній конвенції про забруднення навколишнього середовища пластмасами, яка зобов'язує виробників пластику декларувати всі інгредієнти своїх пластикових виробів і розмішувати на продуктах попередження для споживачів про потенційний вплив таких складових на здоров'я.

Через неналежну утилізацію та вплив людської діяльності пластик може розпадатися на більш дрібні частинки, які зазвичай класифікуються за розміром як макро- (> 25 мм), мезо- (25 мм– 5 мм), мікро- (5 мм– $0,1$ мкм) та нанопластики ($< 0,1$ мкм). З цих категорій розмірів мікропластику та меншою мірою нанопластику приділено значну увагу в дискусіях про безпеку харчових продуктів: це пов'язано з його потенційним переміщенням по харчовому ланцюгу та подальшим ймовірним впливом на здоров'я людини. Деякі з яких можуть бути присутніми у формі, що не прореагувала, і, таким чином, можуть взаємодіяти з біологічними молекулами при прийомі всередину.

Біопластик – це пластик, виготовлений із целюлози, виготовленої з деревної маси британським хіміком у 1850-х роках. Зараз біопластик можна виробляти з різних біорозкладаних і небіорозкладаних матеріалів,

включаючи бур'яни, коноплі, рослинну олію, картопляний крохмаль, целюлозу, кукурудзяний крохмаль тощо. Біопластик на основі цукру може біологічно розкладатися за нормальних умов компостування. Біопластик є екологічно чистим, оскільки для його виробництва потрібно менше викопного палива порівняно з іншими видами пластику [39].

Хоча біопластик комерційно використовувався лише в кількох цілях, він широко використовується в споживчих товарах для предметів одноразового використання, таких як столові прилади, миски, каструлі, посуд, соломинки та упаковка [40]. В принципі, біопластик може замінити пластик, отриманий з нафти, у багатьох сферах застосування, однак проблема полягає у вартості та продуктивності біопластику. Біорозкладаність з невеликою кількістю або без залишку токсичних продуктів значною мірою допоможе захистити природне середовище від загрози звичайних пластикових відходів.

1.3. Мікропластик у харчових продуктах та супутніх матеріалах

Було виявлено, що забруднення мікропластиком впливає на всі компоненти навколишнього середовища, але найбільш широко досліджена гідросфера. Загалом же, кінцеві точки транслокації мікропластику знаходиться в наземному, прісноводному та морському середовищах. З цього моменту він може бути потрапити в харчовий ланцюг через антропогенну діяльність (наприклад, виробництво харчових продуктів) і біотурбацію (порушення відкладень живими організмами, що спричиняє мікропластичне переміщення).

У виробництві харчових продуктів мікропластик може потрапляти у харчовий ланцюг на всіх різних етапах, від первинного виробництва до обробки, транспортування/розповсюдження, пакування, споживання та навіть утилізації [41, 42].

Мікропластик був виявлений у сільськогосподарських продуктах, таких як фрукти та овочі. У продуктах тваринного походження, зараження

пов'язане з використанням зараженого корму – неодноразово повідомлялося, що рибне борошно, виготовлене із сирової риби, забруднене синтетичними частинками, які затримуються в шлунково-кишковому тракті. Виявлено також позитивну кореляцію між мікропластиком у ґрунті та шлунково-кишковому тракті риби в системах спільного вирощування на рисі, що свідчить про можливе забруднення навіть у цих системах. Більш високі концентрації спостерігалися в періоди посіву рису, можливо, як наслідок використання органічних добрив і корму для риби. Є дані про поглинання мікропластику наземними рослинами. Дослідження свідчать про те, що мікропластик може накопичуватися в коренях рослин та транспортується до надземних частин, таких як листя, квіти та фрукти. Також повідомлялося про наявність його на поверхнях рослинної їжі [43-45].

Органічні добрива можуть стати важливим шляхом проникнення мікропластику в сільськогосподарські екосистеми, оскільки осад стічних вод часто використовується як добриво, оскільки він недорогий. Використання забруднених твердих біологічних речовин і мулу може призвести до приблизного щорічного викиду в ґрунті до 850 тонн мікропластику на мільйон жителів [46].

Крім того, близькість агроекосистем до міських центрів може вплинути на збільшення мікропластику у ґрунті. Культивовані поля біля приміських доріг містили майже вдвічі більше мікропластику порівняно з тими, що знаходяться в житлових районах, розташованих далі від доріг. Основними джерелами були визначені дорожній рух (наприклад, міграція через сліди шин на дорозі), побутові викиди, органічні добрива та пластикові сітки та пакети, що використовуються в сільськогосподарській діяльності [47].

Використання пластикових матеріалів у сільському господарстві є прямим джерелом забруднення, особливо на поверхнях рослин. Пластикові мульчі, наприклад, використовуються для захисту розсади та посівів, але

вони також можуть викликати певні зміни в ґрунтовому співтоваристві та хімічному складі шляхом зміни мікрокліматичних умов – це на додаток до очевидного накопичення пластику. У Китаї концентрація фталатів в овочах в результаті використання поліетиленової плівки в теплицях була вищою, ніж у ґрунті (2,38 мг/кг): 5,84 мг/кг у гірчиці, 3,62 мг/кг у селері та 3,49 мг/кг у салаті. Рівні дибутилфталату та 2-етилфталату були вищими за межі Європейського Союзу для овочів, і було припущено, що ризик для людини виникає в основному через споживання овочів [48].

Забруднення харчових продуктів з виробничих вод. Очисні споруди (ОСВ), залежно від їх ефективності, можуть видалити понад 90 відсотків мікропластику зі стічних вод. Однак, особливо у випадку неефективних систем, певний рівень мікро- та наночастинок можна легко знайти у стічних водах очисних споруд, які згодом будуть використовуватися як джерела води для таких цілей, як зрошення полів (культури, квіти, овочі, кормові культури) і для худоби питної води. Крім того, коли мікропластик потрапляє в поверхневі та підземні води, він може згодом потрапити в ланцюг постачання питної води та бути знайденим у домашніх кранах. Вміст пластику в питній воді може ще більше збільшуватися через стирання та деградацію пластикових матеріалів, з яких складається система водопостачання. Забруднення водопровідної води може виникнути внаслідок стирання та після вимивання хімічних речовин і полімерних частинок із труб (наприклад, ПВХ, ПЕ) і резервуарів у мережі водопостачання: вони можуть бути покриті пластиковими плівками, такими як епоксидні смоли. Епоксидна смола фактично використовується для зменшення ступеня корозії в резервуарах для води, тоді як ПА можна знайти як фітінговий компонент у трубах [49, 50].

Нарешті, у випадку морської та озерної солі основним джерелом мікропластику може бути джерельна вода, яка містить значну кількість синтетичних частинок. Виробництво морської солі здійснюється шляхом поступової кристалізації з води, яка пропускається через різні випарні

ставки для отримання кінцевого продукту [48]. Забруднення кам'яної солі, швидше за все, пов'язане з її переробкою.

Забруднення харчових продуктів від переробного середовища.

Використання обладнання та технологій, виготовлених із пластикових матеріалів або таких, що містять пластик, може призвести до перенесення частин полімерів на харчові продукти, з якими вони контактують. Наприклад, мембрани, що використовуються для обробки молочних напоїв, були визначені як основне джерело пластикового забруднення, оскільки більшість синтетичних частинок, ідентифікованих у продуктах, були термосульфонами. В іншому дослідженні речовини, які використовувалися у виробничому процесі, були названі однією з можливих причин присутності ксеноестрогенів у мінеральній воді, хоча це також могло бути наслідком використання очищеної підземної води, яка містила деякі хімікати, які важко фільтрувати. Навіть у випадку меду було припущено, що забруднення синтетичними фрагментами та волокнами починається з самого першого етапу природного виробництва: або бджоли переносять його із заражених польових квітів у вулик, або воно походить із пластикових пакетів, які використовуються для постачання цукру до меду. Ренці і Блашковіц пояснили наявність поліпропіленових волокон у солі забрудненням від одягу виробничого персоналу [51-54].

Забруднення харчових продуктів у побутовому середовищі.

Мікропластик у домашньому середовищі може забруднити відкриту їжу. Осадження мікропластику (особливо з текстильних матеріалів) з атмосфери та повітря в приміщенні може бути однією з основних причин забруднення меду та пива. Оцінки атмосферних опадів синтетичних і напівсинтетичних волокон вказують на щоденне осадження від 2 до 355 MP/m² [53, 55].

Окрім потенційного забруднення мікропластиком, занепокоєння викликає міграція хімікатів із пластикової упаковки в харчові продукти [56].

У пластмасі добавки не ковалентно зв'язані з полімером і можуть вільно переміщатися та мігрувати до їжі, з якою вони контактують.

Антиоксиданти з ПЕТ-пляшок багаторазового використання та пігментовані частинки були виявлені в бутильованій мінеральній воді. Хімічні компоненти мікропластику можуть мігрувати у воду до споживання продукту або після, коли споживач їх проковтнув. Діоксид титану та інші неідентифіковані пігменти також були виявлені у бутильованій воді. Пігменти хостаперм синій, хроматний жовтий і фталоціанін – барвники, що широко використовуються при виробництві пластмас – також були виявлені в пробах солі [49, 50].

Було виміряно концентрацію пластифікаторів і антиоксидантів у харчових продуктах, причому найвищі показники виявлені в кукурудзяних і картопляних снеках. Автори виявили найвищі концентрації для пластифікатора АТВС (О-ацетил трибутил цитрат), до 7,09, 0,56 і 2,33 мкг/г у кукурудзяних снеках, печиві та тістечках, тоді як дізобутирил пероксид був найбільш помітним у картопляних снеках (1,51 мкг/г). Найбільш часто виявленими фталатами були дибутилфталат та 2-етилфталат. Важливо зазначити, що ці речовини заборонені для виробництва матеріалів, що контактують з харчовими продуктами. Крім того, у частині зразків дибутилфталат перевищував встановлену межу міграції 0,3 мг/г. Було визначено також кількість мономерів стиролу, які мігрували в їжу, визначивши діапазон концентрації від 2,6 нг/г у сирій курці та 163 нг/г у печиві для сендвічів, концентрація в сирій яловичині (5,6 нг/г), сендвічному печиві та шоколадному печиві (107 нг/г) (макс : 13 нг/г, 165 нг/г і 111 нг/г відповідно). Хімічні сполуки, які використовуються при виготовленні вакуумної упаковки, повинні бути регламентовані, щоб зменшити шкідливий вплив на органолептичні властивості харчових продуктів та на споживача. Міграція дізооктилфталату, поліетиленгліколю, фталевого ангідриду та стеараміду спостерігалася у вакуумно упакованих зразках яловичини. Крім того, виявилось, що міграція мікропластику залежить від часу контакту між пластиком та їжею, температури та вмісту жиру [57].

Отже, більшість полімерів, що використовуються в пакувальних

матеріалах, можуть зазнавати певних змін в результаті зовнішніх умов, і це може призвести до виділення хімічних компонентів.

Специфічні для полімерів фізико-хімічні зміни відбуваються після впливу високих температур, ультрафіолетового світла та зміни рН. Це може призвести до проблем із безпекою харчових продуктів для упакованих товарів і харчових продуктів, особливо тих, що імпортуються з Глобального Півдня, де існують проблеми з доступністю та дотриманням правил щодо лімітів токсичних речовин. Міграція пластикових компонентів залежить не тільки від якості пластику, а й від характеристик їжі та часу контакту [58].

Температурно-залежне вивільнення важких металів також було виявлено в їжі, приготівленій у поліетиленових пакетах, із загальною міграцією 7 %, 16 %, 8 % та 48 % для свинцю (Pb), кадмію (Cd), хрому (Cr) та кобальту (Co) відповідно, що призводить до концентрації їжі до 121, 12, 9,5 та 15 частин на мільйон після 5 годин впливу на 95 °C, особливо на поверхні їжі [59].

Дослідження всесвітнього виробництва пластику та супутнього забруднення навколишнього середовища показали, що пластикові відходи становлять серйозну екологічну проблему. Вплив пластикових відходів на морські організми, людей і навколишнє середовище загалом викликає занепокоєння суспільства та потребує порятунку екосистем і життя в них. Незважаючи на те, що пластик дуже корисний у повсякденному житті, токсичні хімікати, які використовуються у виробництві, потребують ретельного контролю, щоб забезпечити безпеку для навколишнього середовища та здоров'я. Крім того, деякі шкідливі хімічні компоненти, що використовуються у виробництві пластмас (наприклад, фталати, бісфенол А тощо), повинні бути заборонені в споживчих товарах і пластикових виробах, які безпосередньо контактують з їжею, напоями та дітьми.

РОЗДІЛ 2

ВІДБІР ПРОБ ТА АНАЛІЗ МІКРОПЛАСТИКУ З РІЗНИХ МАТРИЦЬ

Як було описано раніше забруднення пластиком є всюдисущим і спричинило сплеск наукового інтересу: щороку нові дослідження документують забруднення в нових і часто несподіваних місцях, наприклад у свіжому снігу в Антарктиді, віддалених незаселених островах, по всьому тілу людини і навіть людському ембріоні [60 – 62]. Океанічні течії та кліматичні системи відіграють ключову роль у транспортуванні та деградації пластмас, включаючи випадкове або навмисно викинуте сміття, погане поводження з відходами в містах, а також скидання або ненавмисна втрата під час транспортування. Все більше досліджень показують, що пластикова криза охоплює всі аспекти природного світу, від здоров'я людини до стабільності екосистем.

Проте багато невідповідностей (тобто нестандартизовані методології) та обмеження (тобто лабораторне забруднення) стають все більш очевидними в дослідженні з пластмас [61, 63]. Враховуючи набір наслідків цього різноманітного забруднювача, відомі дослідницькі групи мікропластику закликали гармонізувати методи для підвищення порівнянності [64]. Без цього наше розуміння масштабів чи тяжкості впливу пластику чи темпів змін буде обмеженим.

Розробка нових і передових аналітичних інструментів, застосовних до різних типів зразків, їх валідація та загальна гармонізація в галузі досліджень мікропластик (МР)/нанопластик (НР) мають першочергове значення для моніторингу та розуміння присутності та поведінки цього нового класу забруднюючих речовин.

Більшість експериментів у лабораторіях використовують одноразовий пластик – це значною мірою пояснюється зручністю одноразових пластикових матеріалів (наприклад, наконечників для піпеток і

центрифужних пробірок) у боротьбі з біологічним забрудненням (тобто зменшується необхідність стерилізації інструментів між експериментами. Проте використання одноразового пластику в поєднанні з синтетичним текстилем у більшості наявних у продажу лабораторних халатів і частинок пластику в повітрі з фільтрів і пил підвищує ризик забруднення зразків навколишнього середовища дуже дрібними частинками. Було доведено, що носіння навіть одного елемента захисного спорядження (наприклад, одноразових рукавичок) у дослідницьких лабораторіях заважає кількісному визначенню та ідентифікації полімерів мікропластику [65].

Однак охарактеризувати MPs/NPs є складним завданням через кілька причин, включаючи забруднення, що походить від витратних матеріалів і захисних пристроїв щоденного використання в аналітичних лабораторіях, труднощі у стабілізації суспензій MPs/NPs, а також загальну складність MPs/NPs як аналітів, які разом із їх шлях, що починається на заводах з виробництва пластику і закінчується харчовим ланцюгом, може збирати добавки, барвники та модифікувати поверхню внаслідок атмосферних впливів і біотичне та абіотичне забруднення. Крім того, термінологія, яка використовується в дослідженнях MP і NP, протягом тривалого часу характеризувалася серйозною неузгодженістю. Раніше МП зазвичай визначалися як фрагменти синтетичних полімерів із верхньою межею розміру 5 мм, але однозначна класифікація МП на основі розміру була досягнута лише в 2020 році з випуском Технічного звіту Міжнародної організації зі стандартизації ISO.21960:2020 [66]. Відповідно до цього документу, макропластик визначається як частинки пластику розміром понад 5 мм. Розміри «великого мікропластику» коливаються від 1 мм до 5 мм, мікропластик варіюється від 1 мм до 1000 мм; нанопластик менше 1 мм.

Багатовимірність даних, необхідних для повної характеристики MP і NP, призводить до довгих і трудомістких протоколів. Отже, для успішного аналізу МП/НЧ у зразках навколишнього середовища та харчових продуктів

необхідна адекватна обробка різних етапів, включаючи [66]:

- відбір проб;
- виділення/екстракцію МП/НЧ;
- розділення/попереднє концентрування;
- визначення розміру;
- хімічна ідентифікація;
- кількісна оцінка.

Схематична блок-схема кроків, необхідних для характеристики МП/НЧ, зображена на рис. 5.

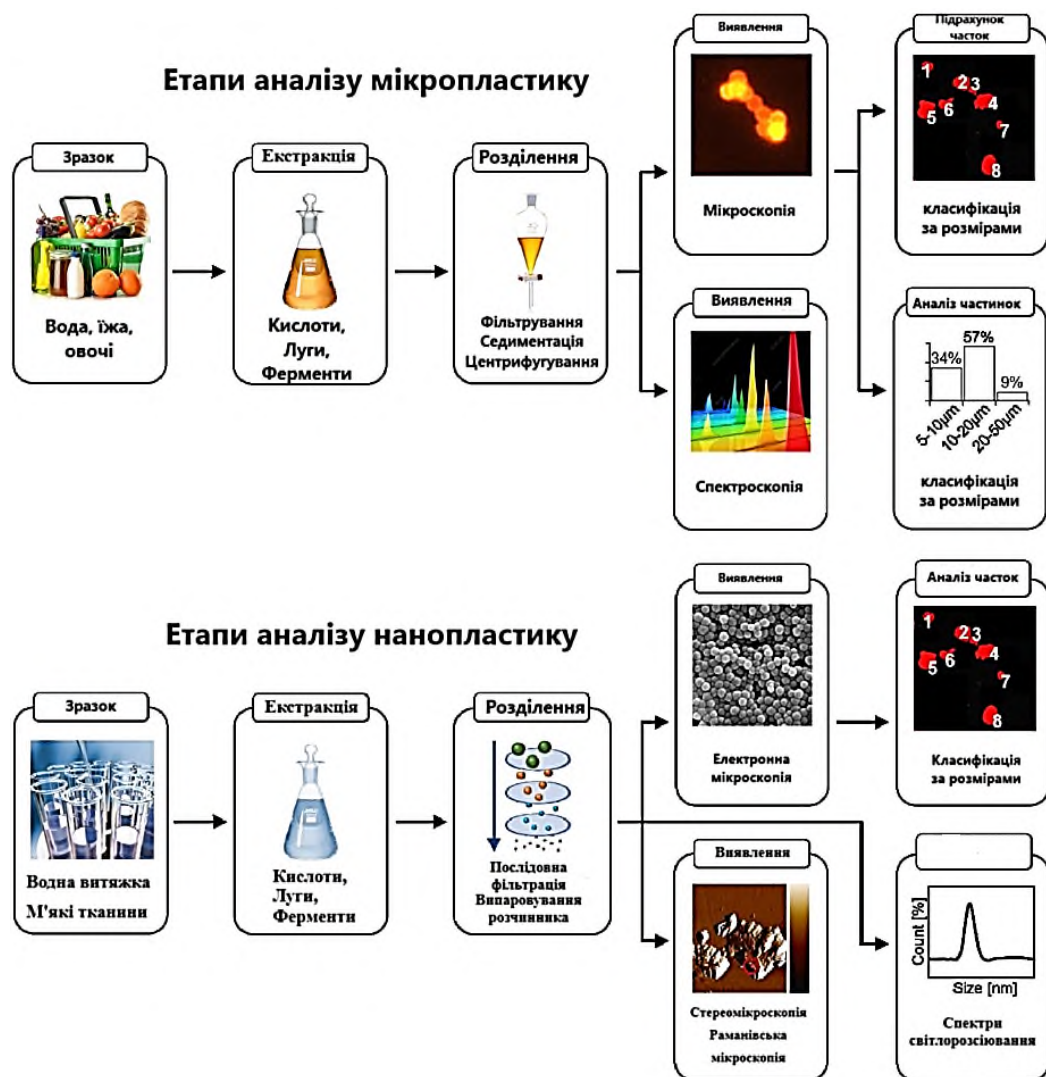


Рис. 5 – Процес аналізу пластику

Пробопідготовка є ключовим елементом у виявленні МП та НП. Доступна література зосереджена на протоколах екстракції МР, тоді як вплив цих процедур на менші наночастинки ще не досліджено. МП не

можна виділити із зразка шляхом застосування хімічних розчинників, полярних чи неполярних. Підготовка проби зосереджена насамперед на руйнуванні та/або видаленні матеріалу матриці зразка та ізоляції частинок, а не на екстракції цільової речовини.

У літературі можна знайти різноманітні способи, починаючи від ферментативного розщеплення (м'яких тканин) до сильніших процесів окислення з використанням перекису водню та використання концентрованих кислот і основ для руйнування твердіших матриць. Крім того, можна знайти різні комбінації цих методів. Жоден метод не виділяється як найбільш відповідний, не кажучи вже про те, що існують стандартизовані методи [67]. Використання кислотного розщеплення добре відоме в аналітичній хімії для аналізу мікроелементів, і також використовувалося для виділення МР. Хоча ряд типів полімерів є стійкими до таких агресивних умов, є повідомлення, які показують, що кислотні та, меншою мірою, основні методи можуть призвести до пошкодження або повного руйнування пластикових часток інших конкретних типів. Такі пошкодження включають сплавлення, а отже, втрату форми та цілісності та злиття у більші та стійкі агрегати полістиролу (PS), поліпропілену (PP), поліетилентерефталату (PET), поліетилену низької щільності (LDPE) і поліетилену високої щільності (HDPE), повна втрата поліаміду (PA) і зміни кольору більшості полімерів.

У таблиці 7 наведено деякі з методів які використовувалися для обробки зразків харчових продуктів. Гідроксид калію в концентрації 10% є найпоширенішим розчином для деградації м'яких тканин. У меншій кількості використовують 30% перекис водню і 69% азотну кислоту. Ряд ферментів також було протестовано на м'яких тканинах, включаючи протеазу К, трипсин, ліпазу та їх суміші. Гідроксид калію і перекис водню також широко використовуються для риби. Перекис водню, азотна кислота і хлористий водень іноді застосовуються для аналізу питної води [67 – 82].

Фільтрація та седиментація часто використовуються як останній етап

ізоляції МП від їхньої матриці. Розмір пор найбільш часто використовуваних фільтрів і сіток становить від 0,2 до 500 мм. Чим менший розмір пор, тим більше частинок виявляється, що не тільки зменшує межу виявлення розміру, але ймовірно має перевагу в тому, що відбирається токсикологічно більш релевантна фракція пластикового матеріалу. Оскільки розмір пір зменшується, фільтри легше забиваються, і для видалення більших частинок і використання мембран, сумісних з ізоляцією наночастинок, необхідні багаторазові послідовні фільтрації особливо для аналізу НЧ у водопровідній воді.

Таблиця 7 – Методи виділення та аналізу мікропластику в їжі, воді та напоях

Сировина (зразок)	Підготовка зразка	Техніка виявлення
Креветки	H ₂ O ₂ 35%; 4% КОН (60°C, 72 г) + 68% HClO ₄ і 65% HNO ₃ (Кілька хвилин)	Оптична мікроскопія; SEM-EDX
Мідії, молюски, устриці	10% КОН (80 об/хв, 65°C, 24 години)	Оптична мікроскопія; FTIR
Консерви (тунець, скумбрія)	10% КОН (40°C, 24 години)	Оптична мікроскопія; SEM-EDX; Раманівська мікроскопія
Сібас, скумбрія	10% КОН (60°C, 24 години)	Оптична мікроскопія; ATR-FTIR
Мідії	30% H ₂ O ₂ (7 днів);	Оптична мікроскопія; м-FTIR
Мідії, устриці	30% H ₂ O ₂ (60°C, 1 год+80 об/хв, до повного розварювання);	Зворотна мікроскопія
Молюски	71% HNO ₃ (90°C, 4 години)	Оптична мікроскопія
Мідії	HNO ₃ :HClO ₄ 4/1 в/в ((80°C, 10 хв+30 хв охолодження)*2)	Оптична мікроскопія
Сардина, скумбрія, сардинелла, анчоус, райдужна сардина	10% КОН (60°C, 24 години)	Оптична мікроскопія; ATR-FTIR
Кальмари, краби, креветки	10% КОН (60°C, 24 години)	Оптична мікроскопія; FTIR
Упаковані курячі грудки, упаковані ескалопи з індички (деко з екструдованого поліестеру)	22,5 М HNO ₃ (60°C, 2 години)	Оптична мікроскопія
Куряче м'ясо	22,5 М HNO ₃ (60°C, 2 години)	Оптична мікроскопія
Сіль	30% H ₂ O ₂ (80 об/хв, 65°C, 24 години), дистильована вода.	Оптична мікроскопія; FTIR; SEM
Мед	30% H ₂ O ₂ (кімнатна температура, 72 години)	Оптична мікроскопія

Водопровідна вода, бутильована вода, пиво	100 мг/мл N-гідроксисукцинімідилловий ефір 1-піренмасляної кислоти (PBN)	Флуоресцентна мікроскопія
Молоко, безалкогольні напої, пиво	дистильована вода 1:1 об./об.; 30% H ₂ O ₂	Оптична мікроскопія; м-FTIR
Вино, чай, безалкогольні напої, енергетики, пиво, бутильована вода	0,01 мг/мл Нільський червоний	Флуоресцентна мікроскопія
Контейнер для їжі, одноразовий контейнер, одноразовий стакан, пакетики для чаю	ультрачиста вода (механічне струшування, 2–3 хв) зворотній осмос (95-С, 10 хв)	Оптична мікроскопія; м-FTIR
Пляшечки для годування немовлят	деіонізована вода (95-С, 5 хв);	Оптична мікроскопія; SEM-EDX; Раманівська мікроскопія
Одноразові паперові стаканчики	0,01 мг/мл Нільський червоний	Флуоресцентна мікроскопія

Рис. 5 та таблиця 7 узагальнюють аналітичні методи, які найбільше застосовуються для аналізу МП у продуктах харчування. ІЧ-перетворення Фур'є (FTIR) є найбільш використовуваною аналітичною технікою для оцінки забруднення МР у харчових продуктах і напоях, за нею слідують раманівська спектроскопія, оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія (SEM) і, меншою мірою, мас-спектрометрією (GC/MS).

Оптична мікроскопія. Оцінка кількості, кольору, розміру та форми МР зазвичай базується на оптичній мікроскопії. Дисекційним мікроскопам, як правило, надають перевагу перед складними мікроскопам, оскільки більша відстань між зразком і об'єктивом дозволяє використовувати такі інструменти, як пінцет, корисний для збирання ймовірних частинок пластику для подальшого аналізу, або зонди, які використовуються для перевірки їхніх фізичних властивостей. Дослідження, що повідомляють про аналіз МП у харчових продуктах за допомогою оптичної мікроскопії, насправді часто посилаються на набір рекомендацій щодо візуальної ідентифікації МП [68, 69] включаючи тест гарячою голкою, що полягає в тиканні МП гарячою голкою для спостереження за його реакцією на високі температури [68, 70]. Тим не менш, точність аналізу характеризується відсутністю належного хімічного розпізнавання і, отже, органічні та

неорганічні частинками, можуть також бути класифіковані як МП. Було вивчено кілька методів вибіркового фарбування матриць для того щоб підвищити розпізнавальну можливість техніки та покращити виявлення синтетичних полімерів Нільський червоний, найпоширеніший фарбувальний агент при аналізі МП. Аналіз МП на основі оптичної мікроскопії проводився на різних зразках їжі та напоїв, включаючи: морепродукти, кухонну сіль, мед і цукор, водопровідну воду і пиво [57, 61, 68].

Найвища бокова роздільна здатність, яку можна досягти за допомогою оптичних інструментів, згідно з теорією Аббе, визначається як $D \approx \lambda / 2NA$. Як правило, роздільна здатність оптичних приладів може бути наближена до половини довжини хвилі світла, яке використовується для опромінення зразка. Незважаючи на теоретичну межу роздільної здатності 200 нм і практичну межу експлуатації в порядку 1мм, дослідження, які покладаються на оптичну мікроскопію для аналізу МП в харчових продуктах, не повідомляють про виявлення ймовірних пластикових частинок розміром менше 20 мкм [70].

Для аналізу субмікрометричних частинок аналіз відстеження наночастинок (NTA) став більш прийнятним варіантом. NTA – це метод мікроскопії для визначення характеристик частинок, який може вимірювати розмір і концентрацію частинок у рідких суспензіях. Рідкі суспензії завантажуються в камеру для зразків, яка освітлюється спеціально сконфігурованим лазерним променем. Світло, розсіяне частинками на шляху променя, збирається цифровою камерою, що дозволяє ідентифікувати окремі частинки та локалізувати їх у полі зору. За допомогою аналізу зображення положення кожної частинки відстежується на наступних кадрах камери, щоб обчислити середньоквадратичне зміщення у 2-х вимірах і визначити коефіцієнт дифузії. Коефіцієнт дифузії потім використовується для розрахунку гідродинамічного діаметра частинки. Використання NTA обмежується НП, оскільки верхня межа розміру техніки становить

приблизно 1мм [71, 72].

Флуоресцентна мікроскопія. Флуоресцентні барвники використовуються в оптичній мікроскопії для збільшення контрасту між аналітом і фоном. Застосовуючи до аналізу МП, комбінація флуоресцентних барвників і мікроскопії дає кількість, розмір і форму частинок. Нільський червоний – це флуоресцентний фарбувальний агент, який часто використовується в аналізі МП [73, 74]. Нільський червоний є сольватохромним індикатором, що призводить до червоного зсуву його спектру флуоресценції, пов'язаного зі збільшенням полярності матеріалу, що оточує молекули нільського червоного. Як наслідок, різні типи МП демонструють різні відповіді при використанні певного набору флуоресцентних фільтрів. Це застосовується для виявлення відмінності між синтетичними полімерами та природними органічними речовинами, що залишаються після перетравлення харчових матриць. Оптимізована та відтворювана процедура фарбування в поєднанні з розщепленням перекисом водню, здатним зменшити спорідненість між нільським червоним і природними полімерами, може дозволити вибрати порогове значення, спрямоване на розрізнення МП від залишків матриці просто на основі інтенсивності флуоресценції. Хоча даний метод є відносно простим та легким у виконанні, кілька факторів можуть значно збільшити його виконання і, отже, вплинути на надійність отриманих даних. Очевидним фактором є те, що інші матеріали, присутні в суспензіях МР, отриманих після розщеплення складних матриць, таких як зразки їжі та напоїв, також можуть бути забарвлені нільським червоним, що призводить до переоцінки кількості частинок.

Інша технологія, твердофазова цитометрія (SPC), дозволяє уникнути цієї проблеми, оскільки вона здатна сканувати, виявляти та підраховувати всі флуоресцентно мічені частинки на всій площі поверхні мембранного фільтра за короткий час. Ця технологія дотепер використовувалася для оцінки чисельності та життєздатності бактерій у воді. SPC поєднує систему

швидкого виявлення з прямою мікроскопічною перевіркою кожної флуоресцентної події, що дозволяє користувачеві визначити, чи справді записана флуоресцентна подія є бактерією. Прилади є високоавтоматизованими і алгоритми використовуються для правильного виявлення бактерій. Таке ж обладнання також можна використовувати для виявлення МР після флуоресцентного фарбування нільським червоним. Однак у літературі немає жодного дослідження про застосування SPC для аналізу МР в продуктах харчування.

Електронна мікроскопія. Електронна мікроскопія (ЕМ) відрізняється від оптичної мікроскопії тим, що вона опромінює зразок за допомогою пучка електронів високої енергії з ангстремною довжиною хвилі замість видимого світла. Оскільки довжина хвилі набагато нижча за довжину хвилі видимого світла (200 – 400 нм), спектральна роздільна здатність значно вища, що робить його чудовим методом для отримання детальної інформації про 2-D морфологію та розмір полімерних частинок аж до нанометрового масштабу [75, 76].

ЕМ-аналіз МП та НЧ зазвичай виконується за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії (ТЕМ), де пропущені електрони забезпечують двовимірне проєкційне зображення електронної хмари частинки та скануюча електронна мікроскопія (SEM), де вторинні та зворотно розсіяні електрони дають детальне зображення поверхні частинки. На відміну від ТЕМ, SEM не обмежений розмірами зразка, а також використовує ширше поле зору, яке вміщує кілька частинок, виміряних одночасно. ЕМ-аналіз визначає кількість і розмір частинок, але не може надати інформацію про їхній хімічний склад, колір і форму. ТЕМ створює 2-D карти проєкцій, які не містять жодної інформації про третій вимір, тоді як SEM є переважно поверхневою технікою, і, навіть якщо дослідження розсіяних електронів може забезпечити 3-D карти, характеристики на не відображають кількісних даних.

Оскільки ЕМ не надає повної кількісної інформації ні про тривимірну

форму, ні про хімічний склад частинок, даним методом важко відрізнити природний органічний матеріал від синтетичного. Деяке уявлення про елементний склад можна отримати, якщо електромагнітні прилади оснащено енергодисперсійним рентгенівським детектором (EDX), таких як харчові продукти та більшість напоїв.

Хоча мікроскопічні методи, такі як ЕМ і NTA, можуть вимірювати розмір NP, вони не є специфічними і не можуть відрізнити NP від інших наноматеріалів, присутніх у зразках. Адаптація цих методів має велике значення для наукового співтовариства в пошуку відповідних методів виявлення НЧ у зразках навколишнього середовища та їжі.

Скануюча зондова мікроскопія. У той час як вищезазначені методи мікроскопії генерують зображення на основі взаємодії між зразком і електромагнітним випромінюванням або електронами, скануюча зондова мікроскопія (СЗМ) досліджує поверхню зразка фізичним наконечником [77]. Зондовий растр сканує поверхню зразка, і сигнал взаємодії наконечника зі зразком отримується на кожному пікселі.

Записані значення сигналу перетворюються на тривимірну теплову карту. Було розроблено кілька методів SPM на основі різних фізичних величин, які можна виміряти під час сканування. Серед них атомно-силова мікроскопія (АСМ) реагує на сили взаємодії, що виникають між зондом і зразком. Ці сили діють на консоль, що утримує зонд, викликаючи модифікацію його руху, яку можна кількісно виміряти.

Аналіз АСМ дозволяє вивчати кількість, розмір і форму частинок. АСМ надає високодеталізовану тривимірну топологічну інформацію окремих частинок без необхідності опромінювати зразок, долаючи обмеження роздільної здатності, накладені межею дифракції світла в оптичній мікроскопії, а також обмеження навколишнього середовища, необхідність металевого покриття та 2-D дозволені карти електронної мікроскопії. АСМ здатний досягати субнанометрової роздільної здатності д в залежності від розміру зонду у рідкому, повітряному та вакуумному

середовищах, що дозволяє отримати тривимірну характеристику поверхні, корисну для вивчення поведінки МП та НЧ щодо адсорбції забруднень та модифікації поверхні внаслідок вивітрювання або хімічної попередня обробка. Ще одна перевага застосування АСМ для топологічних досліджень поверхні пластикових частинок полягає в тому, що, порівняно з ЕМ, зображення на основі зонда запобігає виникненню пошкоджень і артефактів, що є результатом тепла, яке локально генерується електронним променем при великих збільшеннях. АСМ використовували для вивчення топографії та товщини МП, що вивільняються з ПП пляшечок для годування під час приготування дитячої суміші. АСМ-зображення дозволили авторам зробити висновок, що більшість ізольованих частинок походять від деградації пляшечок для годування, оскільки їх форма пластівців і шарувата морфологія можна порівняти з лушенням ПП.

Інфрачервона та комбінаційна спектроскопія. Інфрачервона (ІЧ) та рамановська спектроскопія вже давно використовуються для отримання хімічних вібраційних відбитків при аналізі полімерів, і тому є очевидним вибором для ідентифікації МР [78].

Спектроскопічні методи можуть отримати середні об'ємні коливальні спектри зразка або масштабні карти хімічної інформації. Типовий робочий процес для об'ємного спектроскопічного аналізу МП включає перевірку фільтрів під стереомікроскопом, концентрування пластикових частинок, осадження частинки на столик для зразка та, нарешті, отримання спектру. Мінімальний розмір МП, який можна правильно охарактеризувати, залежить від здатності аналітика попередньо відсортувати частинки. Крім того, прозорі або напівпрозорі частинки, а також дрібні частинки можуть бути пропущені під час процесу попереднього відбору. Спектроскопічне відображення можна виконувати безпосередньо на фільтрі за допомогою одноелементного детектора та високоточного столика, що дозволяє мікроскопу виконувати сканування від точки до точки. Цю трудомістку процедуру можна пришвидшити за допомогою так званої методики «точка і

знімок», коли МП локалізуються на фільтрі за допомогою ручного або автоматичного сканування оптичних зображень, а потім спектроскопічно аналізуються, зменшуючи розмір цікавої області. Хімічне зображення областей без попереднього вибору можна отримати за допомогою лінійних детекторів або детекторів FPA, які складаються з кількох елементів виявлення, які працюють одночасно.

Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є. ІЧ-перетворення Фур'є (FTIR) у режимах пропускання, відбиття та ослабленого повного відбиття (ATR) було розроблено та застосовано для аналізу МП. Вібраційні спектри можна інтерпретувати вручну шляхом візуального аналізу та визначення характерних коливальних смуг. Крім того, процес можна автоматизувати за допомогою алгоритмів пошуку в базі даних, здатних порівнювати отриманий спектр з бібліотекою довідкових матеріалів або за допомогою штучного інтелекту, наприклад багатовимірної класифікації. FTIR і mFTIR широко використовується для виявлення та характеристики МП у воді, у морських організмах і в їжі [79].

Раманівська спектроскопія. У раманівській спектроскопії лазер фокусується на зразку, а спектр отримується шляхом збирання розсіяного світла, як правило, у видимому діапазоні. Завдяки застосуванню субмікронних лазерів із довжиною хвилі як джерела світла спектроскопія комбінаційного розсіювання теоретично здатна досягти бокової роздільної здатності порядку 250 – 300 нм для довжини хвилі збудження 532 нм. Однак часто цитується, що ця техніка має практичну межу дії в порядку 1 мм [61, 80]. Раманівська спектроскопія особливо підходить для внутрішнього аналізу, оскільки вона не чутлива до впливу води. Недоліком є те, що деякі зразки виявляють флуоресценцію під час опромінення лазером, який може знищити корисний аналітичний сигнал Рамана. Однак, оскільки зсув комбінаційного розсіювання завжди залежить від довжини хвилі збудження, коли смуги раманівського розсіювання покриті широким фоном флуоресценції, зміна довжини хвилі лазера збудження може зменшити

спектральні перешкоди. Іншим недоліком є властива низька чутливість техніки через низьку ефективність комбінаційного розсіювання.

Як і FTIR, Раманівська мікроскопія пропонує вибір варіантів автоматизації, від дискретного аналізу частинок за принципом «направляй і знімай».

Піролізна газова хроматографія/мас-спектрометрія. Піролізна газова хроматографія в поєднанні з мас-спектрометрією (Py-GC/MS) була використана для ідентифікації МР у різних матрицях зразків на основі продуктів їх термічної деградації [81]. Основний принцип Py-GC/MS передбачає миттєвий термічний розпад співполімерів на їхні мономери та добавки за високих температур (>500) в інертній атмосфері та їх розділення за допомогою газової хроматографії. Продукти деградації пластикових полімерів додатково ідентифікуються та кількісно визначаються за допомогою електронної іонізації. Py-GC/MS дозволяє аналізувати цілі частинки МП, що робить метод також чутливим до добавок, таких як пігменти та стабілізатори, а також до адсорбованих забруднень. Однак виявлення цих додаткових сполук може заважати інтерпретації пірограми.

Py-GC/MS використовувався для аналізу МП та НЧ в морепродуктах і питна вода, а також для визначення поглинання НЧ рослинами, що свідчить про його придатність для аналізу МП/НЧ у рослинному матеріалі. Однак Py-GC/MS не дає даних про розмір, форму та кількість частинок, і тому його часто використовують як додатковий метод до EM або mFTIR.

Термогравіметричний аналіз/Мас-спектрометрія. Термогравіметричний аналіз (TGA) – це термоаналітичний метод, який базується на вимірюванні зміни маси зразка в часі за контрольованих температурних умов. Термічну деградацію можна проводити на повітрі або в інертній атмосфері, при постійній температурі або за програмою нагрівання. TGA з допомогою мас-спектрометрії може одночасно надавати кількісні та якісні дані. У літературі повідомлялося, що TGA-MS є простим, швидким і дійсним методом скринінгу для виявлення МП. Незважаючи на те, що він

здатний виявляти та характеризувати різні МП, TGA-MS не є конкурентоспроможним кількісним методом з точки зору точності, через те, що капіляри легко забиваються продуктами деградації пластику [81].

Подальшим обмеженням TGA-MS є відсутність системи розділення до МП. Це, у поєднанні з присутністю в тому самому зразку різних полімерів, що мають однакову температуру розкладання, робить інтерпретацію результатів особливо складною, можливо, перешкоджаючи виявленню та ідентифікації частин аналітів.

Термічна екстракція, десорбція, газова хроматографія, мас-спектрометрія. У термічній екстракційній десорбційній газовій хроматографічній мас-спектрометрії (TED-GC/MS) блок TGA поєднується з термоадсорбційним/десорбційним елементом, що містить твердофазний поглинач. Газ, що виділяється, піддається хроматографічному розділенню, а продукти десорбції виявляються за допомогою мас-спектрометрії. Блок TED дозволяє вловлювати гази, що виділяються у вибраних діапазонах температур. Таким чином, можна виключити з аналізу леткі продукти, отримані при температурі, нижчій за температуру деградації більшості синтетичних полімерів. Розділення продуктів розпаду, що утворюються із матриці, і продуктів піролізу, що походять з аналітів, дозволяє ідентифікувати різне пластикове сміття навіть у складних матрицях. Ця техніка здатна обробляти зразки, у двісті разів більші, ніж ті, що використовуються в Py-GC/MS, що робить аналіз більш репрезентативним [82]. TED-GC/MS продемонстрував вищий ступінь точності під час тестування порівняно з іншими термічними аналітичними методами. TED-GC/MS описано як добре відома техніка для аналізу МР у зразках навколишнього середовища, таких як прісна вода, і його можна вважати дуже перспективним методом виявлення частинок пластику в їжі.

Опис та обговорення найсучасніших методів аналізу МП та НЧ підкреслюють дві потреби, які ще мають бути задоволені. По-перше, це розробка високопродуктивних методів ідентифікації МП і, можливо, НЧ,

здатних скоротити загальний час аналізу та забезпечити автоматизацію. По-друге, розробка наноаналітичних методів, здатних виконувати як кількісну, так і якісну характеристику НЧ на рівні окремої частинки. Останнє матиме вирішальне значення для адекватної оцінки небезпеки НЧ у токсикології, а також для оцінки впливу НЧ у харчових ланцюгах.

Отже, жоден із методів, описаних вище, не задовольняє повної аналітичної валідації МП, і лише близько третини з них оцінювали принаймні один параметр якості. Варто зазначити, що валідація методу - це процес доведення того, що аналітичний метод підходить для своєї мети. У регульованих галузях, а саме харчових продуктів і напоїв, фармацевтичних препаратів, агрохімікатів і косметики, вимоги до валідації методу для підтвердження відповідності нормативним актам включають оцінку ряду параметрів якості (або продуктивності методу), таких як специфічність методу, лінійність, точність, прецизійність, діапазон і надійність. Крім оцінки ефективності методу в отриманні кількісних результатів, аналітичні методи, призначені для характеристики МП і НЧ, також повинні перевірятися на їх точність і прецизійність у визначенні розміру частинок і на межі виявлення розміру.

На основі проведеного аналізу не вдалося визначити єдиний унікальний метод, здатний мати справу з багатовимірністю даних, необхідних для повного опису появи МП та НЧ у продуктах харчування. Поєднання мікроскопічних методів з методами аналітичної характеристики є перспективним для виявлення та ідентифікації МП. Однак навіть найпоширеніші методи все ще знаходяться в стадії розробки, а дослідження МП ще далекі від валідації та стандартизації методу. Для НЧ поєднання АСМ з ІЧ є перспективним у майбутньому, оскільки це єдиний метод, здатний забезпечити як стабільну хімічну ідентифікацію, так і фізичну характеристику частинок у нанорозмірі. Однак варіанти розвитку методів аналізу НЧ все ще дуже обмежені.

РОЗДІЛ 3

ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ У ХАРЧОВИХ ПРОДУКТАХ ТА НАПОЯХ

3.1. Забруднення харчових продуктів полімерними речовинами

Забруднення харчових продуктів полімерними речовинами привернуло значну увагу через потенційні проблеми зі здоров'ям. Питна вода та напої можуть бути забруднені МП через забруднення пластиком у джерелах води. Крім того, водні (риби, ракоподібні та двостулкові молюски тощо), наземні організми (такі як вівці та кури) і рослини (фрукти та овочі) можуть бути забруднені МП через забруднену воду, ґрунт або потрапляння забруднених джерел. МП може переходити до кількох типів харчових продуктів, під час процесів виробництва, транспортування та пакування через контакт із пластиковими матеріалами харчової упаковки. Таким чином, люди можуть піддаватися впливу МП, вживаючи заражену їжу та напої.

Кухонна сіль. Деградація пластику в умовах навколишнього середовища призводить до забруднення наших джерел води МП. Кухонна сіль, яку зазвичай отримують переробкою морської води, озерної води або солоних порід, може бути забруднена МП, що викликає серйозне занепокоєння через його широке використання як звичайного інгредієнта в багатьох харчових продуктах. Дослідники досліджували комерційну морську сіль, озерну та кам'яну сіль. Для кількісної оцінки наявності МП використовували оптичну спектроскопію (включає візуальне дослідження зразків під мікроскопом для ідентифікації, підрахунку та вимірювання розміру мікрочастинок пластику на основі їхніх відмінних характеристик) та мікроінфрачервону спектроскопію з перетворенням Фур'є (μ -FTIR), забезпечуючи точну ідентифікацію та підтвердження мікропластикових частинок у зразках солі. Дослідження виявили велику кількість МП у морській солі, озерній солі та кам'яній солі – $615,50 \pm 37,82$, $203,50 \pm 92,66$,

105,50±56,87 МП/кг, відповідно, і 85% частинок ідентифіковано як МП [83].

Забруднення МП спостерігалось в широкому асортименті риби та морепродуктів.

Мідії. Мідії, як організми, що харчуються фільтруючи воду, широко вивчалися, оскільки їх часто використовують як ефективний біологічний індикатор для відстеження забруднення в прибережних водах.

Детектування МП проводили стереомікроскопом і μ -FTIR. 1.8±0,64 МП/г було знайдено в диких мідях, тоді як середня кількість МП становила 0,9 і 1,4 МП/г для вирощених сирих і вирощених на фермах мідій відповідно. Поліестер, ПП та ПЕ є найпоширенішими типами полімерів із розміром частинок зазвичай у діапазоні 5–250 мкм, хоча μ Аналіз FTIR показав, що лише половина частинок були МП. Сирі мідії містили 0,2±0,24 МП/г, у той час як оброблені (попередньо приготовані, очищені від мушлі, заморожені та вакуумно упаковані) зразки містили 0,9±0,1 МП/г. Трьома найпоширенішими типами полімерів були PE, PP та PET. Аналіз FTIR не зміг ідентифікувати 26% частинок як МП. В іншому дослідженні середня кількість МП склала 13,2 МП/г, а 82% МП мали від 10 до 300 мкм за розміром [84].

Незважаючи на зразки з різних видів, місць, підготовки зразків і аналітичних методів, результати деяких досліджень за забрудненням МП у мідій узгоджувалися між собою.

Ракоподібні. Найбільш дослідженим ракоподібним на наявність МП були креветки. У всіх дослідженнях були вжиті необхідні запобіжні заходи, щоб запобігти контамінації МП із середовища аналізу. У цьому огляді проведено всебічний аналіз МП по всьому тілу креветок, включаючи результати чотирьох досліджень. Середня кількість частинок становила 4,31±1,7 МП/г у всьому тілі та 1,02 МП/г у травних тканинах. 13%, 23%, 27% і 36% частинок мали розмір < 100, 100–250, 250–500 і 500–1000 мкм відповідно. Крім того, тип найбільш розповсюджений тип – PET (46%), PP (27%) та PS (27%) [85].

Морські риби. Вчені досліджували шотландську пікшу, морський окунь, ісландську камбалу, атлантичну скумбрію, сібас, ставриду. Для виявлення використовувався стереомікроскоп, а для визначення характеристик полімеру використовувався FTIR-спектр з ослабленим повним відображенням (ATR-FTIR), а найпоширенішими полімерами у зразках були PE (80%) та PS (20%). Кількість МП у сібаса, ставриди та скумбрії становила $0,4 \pm 0,7$, $0,7 \pm 1,3$ і $0,6 \pm 0,8$ МП/г відповідно (жоден із контрольних зразків не містив МП). Розмір МП у ставриді коливався від 150 до 1500 μm , 500–1500 μm для сібаса та скумбрії [86].

Рибні консерви. Консервування є широко використовуваним методом консервування морепродуктів, але дослідження довели наявність накопичення МП навіть у цих продуктах. Хімічна структура частинок аналізувалася за допомогою $\mu\text{-Raman}$ неорганічний склад частинок, визначених як пластик, досліджували за допомогою EDX для подальшого аналізу. Найпоширенішими полімерами були визначені PET і PP (на кожен з них припадає 33,3% виявлених частинок пластику. Консервованій тунець – PET (37%), PS (18%) і PP (14%) відповідно. МП були виявлені в 80% консервованого тунця, а 77,6% частинок, виявлених за допомогою флуоресцентного мікроскопа, були ідентифіковані як пластик. Кількість МП складала від $0,13 \pm 0,2$ МП/г до $6,92 \pm 1,20$ МП/г у м'ясі та $4,42 \pm 0,84$ МП/г розсолі. Найбільш поширені типи полімерів були визначені як PET, PS та нейлон [87].

Мед. Хоча мед є одним із найбільш натуральних і необроблених харчових продуктів на ринку, було виявлено, що він містить мікроелементи металів, пестициди та хлоровані сполуки, можливе забруднення меду МП також викликало інтерес. Зовсім недавно було мед теж забруднений мікропластиком, так було виявлено 20–178 волокон/л і 126–828 фрагментів/л у зразках меду. Середня кількість МП у зразках меду становила $0,52 \pm 0,29$ МП/г. Найпоширенішими полімерами були визначені PET і PP [88].

Пиво. За допомогою методу флуоресцентної спектроскопії було виявлено, що середня кількість МП у пиві складає $55,50 \pm 30,89$ МП/л. Було виявлено, що кількість МП, спостережувана як у зразках пива, так і в водопровідній воді, надзвичайно схожа. Це призвело до гіпотези про те, що основним джерелом забруднення МП у пиві потенційно може бути вода, яка використовується під час виробничого процесу. Результати дослідження довели, що основними полімерами є PS і PP [89].

Фрукти та овочі. Міграція МП до різних частин рослин була досліджена в різних дослідженнях шляхом експериментів. Оцінювалися лише звичайні фрукти та овочі: яблуко, груша, і картопля. МП були виявлені в усіх зразках, із середньою концентрацією $195\ 500 \pm 128,687$, $189,550 \pm 105\ 558$, $85\ 000 \pm 70\ 000$ МП/г для яблука, груші та картоплі відповідно. Розмір МП коливався від 1,56 до 3,19 μm . PE (60%), PP (20%) і PET (20%) були найпоширенішими типами полімерів [90].

Мінеральна вода в пляшках. Мінеральні води в пластикових пляшках широко споживаються населенням виявлено. Середня концентрація МП становила 118 ± 88 МП/л у багаторазовій тарі та $14 \pm 0,14$ МП/л в одноразовій. Найпоширеніший розмір частинок коливався від 5 до 20 μm , а PET і PP були основними виявленими пластиковими полімерами [91].

Контейнери для зберігання їжі. Виробництво та споживання пластикових контейнерів різко зросло через зростання індустрії харчових продуктів. Широке використання цих контейнерів спричиняє збільшення пластикових відходів і потенційно посилює загрозу утворення МП. У результаті дослідження кількість МП, що вивільняються з контейнерів PP, PS, становила $1,07 \pm 0,51$ і $2,24 \pm 0,72$ МП/мл [92].

Одноразовий посуд. Одноразові пластикові стаканчики або паперові стакани з пластиковим покриттям часто використовуються для подачі кави, чаю та інших напоїв, що викликає занепокоєння щодо можливості прямого потрапляння МП через можливу міграцію з цих стаканчиків у напої. Середня кількість МП становила 2718, 2720 і 2629 МП/л для PE, PP і PS

чашок відповідно [93].

Таблиця 8 узагальнює опубліковані дослідження, що повідомляють про забруднення МП у різноманітних продуктах харчування та напоях [83-93].

Таблиця 8 – Кількісне визначення мікропластику (МП) у різних зразках харчових продуктів та продовольчих товарах.

Зразки	Пробопідготовка	Спосіб виявлення	Кількісна оцінка частинок $M \pm m$	Одиниці вимірювання
Кухонна сіль	Ресуспензія	Стереомікроскопія та FTIR	615,50±37,82 у морській солі 203,50±92,66 в озерній солі 05,50±56,87 у кам'яній солі	МП/кг
Мідії	Хімічна екстракція	Стереомікроскопія	0,35±0,15 у вирощуваних 0,38±0,23 у диких 4,46±3,75 у обробленому м'ясі	МП/г
Креветки	Хімічна екстракція	Стереомікроскопія	0,68±0,55	МП/г
Морська риба	Хімічна екстракція	Стереомікроскопія та ATR-FTIR	0,4±0,7 у сібаса 0,7±1,3 у ставриди 0,6±0,8 у головні	МП/г
Консервовані шпроти	Хімічна екстракція	Раманівська спектроскопія та EDX	2,00±0,58	МП/г
Консервований тунець	Хімічна екстракція	Флуоресцентний мікроскоп	6,92±1,20 солений 4,42±0,84 в олії	МП/г
Мед	Хімічна екстракція	Флуоресцентна мікроскопія	166±47	МП/кг
Пиво	–	Флуоресцентна мікроскопія	55,50±30,89	МП/л
Фрукти і овочі	Хімічна екстракція	Стереомікроскопія та ATR-FTIR	195500±128687 яблука 189550±105558 груші 85000±70000 картопля	МП/г
Бутильована мінеральна вода	–	Стереомікроскопія (з фарбуванням) та FTIR	118±88 багаторазовий 14±14 одноразовий	МП/л
Одноразовий	Гаряча вода	Стереомікроскопія	2,24±0,72 млн.	МП/контейн

посуд	(90-100°C)	та FTIR		ер
Паперові стакани з ламінуванням полімерами	Гаряча вода (90-100°C)	Флуоресцентна мікроскопія (з фарбуванням) та SEM	2,72 з поліетиленовим 3,12 з поліпропіленовим	МП/стакан
Пакети для заварювання чаю	Гаряча вода (90-100°C)	FTIR	106,3±14,6	МП/пакет чаю

3.2. Виявлення мікропластику, що виділяється з харчової упаковки

Використання пластику в харчовій упаковці, безсумнівно, мало величезний позитивний вплив на життя людини, допомагаючи зберігати продукти, а його низька щільність і вага забезпечують переваги для транспорту та логістики. Полімери в харчових пакувальних матеріалах, як правило, вважаються хімічно інертними, а законодавчий контроль над міграцією матеріалу в харчові продукти враховує переважно низькомолекулярні сполуки (<1 кД), такі як мономери, що не прореагували або частково не прореагували, технологічні добавки та барвники.

Для такого контролю були розроблені стандартизовані методи для імітації типових сценаріїв контакту з харчовими продуктами та компонентами [94]. Однак більшість методів, спрямованих на виділення добавок і олігомерів, базуються на хроматографії та/або мас-спектрометрії та включають етап фільтрації в процесі аналізу. Ця фільтрація, навіть ненавмисна, як у випадку захисту колонки ВЕРХ, служить головним чином для захисту інструменту, але по суті запобігає виявленню частинок пластикового матеріалу в експериментах, що контактують з харчовими продуктами [95].

З різних публікацій, які повідомляють про вивільнення МП і НП з упаковки харчових продуктів, випливає, що все ще відсутні будь-які загальні чи систематичні аналітичні стратегії, і автори досліджували різні підходи до виявлення та характеристики частинок. У деяких випадках використовувалися хімічно специфічні методи, такі як інфрачервона

мікроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR) і піролізна газова хроматографія/мас-спектрометрія, тоді як інші повідомляють про неспецифічні методи, такі як скануюча електронна мікроскопія (SEM), відстеження наночастинок. аналіз, флуоресцентна мікроскопія.

Об'єктом нашого дослідження були поліетиленові мішки для приготування круп та вакуумні мішки для заморожування харчових продуктів – засобів повсякденного пакування харчових продуктів, які піддаються дуже різним умовам використання.

Щоб оцінити, чи може та як, харчова упаковка вивільняти МП у звичайних умовах щоденного використання, ми зосередилися на виборі двох типів харчової упаковки: поліетиленові пакети для приготування круп та вакуумні пакети для заморожування харчових продуктів. Ці контейнери для харчових продуктів були обрані на основі їх широкого використання, а також тому, що їх звичне їх застосування відповідає умовам, що значно перевищує звичайну температуру навколишнього середовища.

Сценарії повсякденного використання харчової упаковки включають застосування прямого нагрівання, мікрохвильового опромінення, циклічного заморожування-розморожування або замочування безпосередньо в киплячій воді. У цьому дослідженні, враховуючи передбачуване використання вибраних матеріалів, вода була обрана як найбільш відповідний імітатор їжі, як зазначено в Директиві Ради 85/572/ЄЕС [96]. Упаковка харчових продуктів була оброблена водою в гарячих умовах (окріп) пакетиками для приготування круп або з процесом заморожування-розморожування у випадку з поліетиленовими пакетами для заморожування харчових продуктів.

Для проведення аналізу використовували воду очищену у системі для отримання надчистої води Milli-Q® Direct Merck Millipore (вода тип 1, 3). Ця вода (вода MilliQ) використовувався в усіх експериментах. Щоб зменшити забруднення зразків із лабораторного середовища, де це можливо, уникали використання пластикового лабораторного посуду. Весь

скляний посуд і металеві предмети були очищені із миючим засобом, потім промиті водою MilliQ. Використовувалися бавовняні лабораторні халати, рушники.

Мішки для заморожування харчових продуктів. Комерційно доступні мішки заповнювали 300 мл води MilliQ і клали в морозильну камеру (-23°C) протягом 24 год. Потім лід вручну виймали з мішка і переносили в чистий скляний стакан. Після відтавання при кімнатній температурі воду фільтрували через фільтр з розміром пор 25 мм. Паралельно проводили контрольний експеримент шляхом заморожування такої ж кількості води MilliQ протягом того самого часу у скляному стакані та фільтрували рідину з використанням фільтру того самого типу. Фільтри поміщали на скляну підставку та аналізували. Експеримент проводили у 3 разовій повторності.

Поліетиленові мішки для приготування круп. Комерційно доступні пакети поміщали в 300 мл киплячої води MilliQ в скляному стакані на 500 мл. Дотримуючись інструкцій щодо часу приготування, зазначеного на упаковці гречки, пакет витримали під поверхнею рідини при 100°C протягом 12 хв скляною паличкою. Потім мішок вийняли зі склянки, а рідину, що залишилася, відфільтрували через фільтр з розміром пор 25 мм. Паралельно проводили контрольний експеримент шляхом кип'ятіння тієї ж кількості води MilliQ протягом того самого часу та фільтрування рідини на фільтрі того самого типу. Фільтри поміщали на скляну підставку та аналізували. Експеримент проводили у 3 разовій повторності.

Для аналізу зразків використовували металографічний мікроскоп Optika B-500MET. Він є ефективним інструментом для попереднього аналізу мікропластику. Дозволяє визначати форму, розмір та текстуру часток, однак для точного визначення типу полімеру доцільно доповнювати цей метод спектроскопічними техніками. Завдяки здатності працювати з відбитим світлом, цей мікроскоп дозволяє досліджувати структуру, форму та поверхневі характеристики часток.

Дослідження починали із загального огляду зразка з низьким

збільшенням для оцінки розподілу часток, після чого переходили до детального аналізу окремих об'єктів. Мікропластикові частки ідентифікували за формою (волокна, плівки), поверхневими характеристиками. Поверхневу текстуру аналізували за допомогою оцінки відбиття світла, визначаючи гладкість або шорсткість часток.

Аналіз отриманих даних включав підрахунок кількості часток у полі зору мікроскопа та вимірювання їхніх розмірів за допомогою калібрувальних міток. Результати аналізів наведено у таблиці 9.

Таблиця 9 – Виявлення мікропластику, що виділяється з харчової упаковки

Вид матриці	Наявність	Кількість	Розмір, мкм	Поверхня	Форма
Контроль	–	–	–	–	–
Мішки для заморожування харчових продуктів	Так	48 ± 23 $p \leq 0,55$	$12,2 \pm 0,8$	Гладка	Волокна
Контроль	Так	$3 \pm 0,01$	$3,1 \pm 0,02$	Гладка	Волокно
Поліетиленові мішки для приготування круп	Так	36 ± 13 $p \leq 0,55$	$7,5 \pm 0,6$	Шорстка	Волокна

Виходячи з наведених даних у таблиці, можна зробити висновок щодо присутності мікропластику у досліджуваних зразках. Спостереження показують, що мікропластик є поширеним у матеріалах, які використовуються для упаковки харчових продуктів, зокрема у мішках для заморожування харчових продуктів і поліетиленових мішках для приготування круп. Це вказує на потенційне забруднення продуктів і навколишнього середовища частками мікропластику.

Зокрема, у мішках для заморожування харчових продуктів, кількість мікропластичних часток складає 48 ± 23 з розміром $12,2 \pm 0,8$ мкм. Ці частки мають гладку поверхню і волокнисту форму, що може свідчити про характерне забруднення від полімерних волокон, які можуть виділятися з матеріалу упаковки під час її використання. Оскільки мішки для

заморожування харчових продуктів часто контактують з водою або вологими середовищами, це може сприяти відщепленню дрібних часток пластику, які згодом потрапляють у продукти харчування.

У поліетиленових мішках для приготування круп виявлено 36 ± 13 часток мікропластику з розміром $7,5 \pm 0,6$ мкм. Поверхня цих часток є шорсткою, а форма – також волокниста, що може вказувати на різницю у процесах виробництва або фізичних властивостях матеріалу в порівнянні з упаковкою для заморожування. Мікропластик, який виділяється з цих мішків, є результатом термічної обробки поліетилену під час використання упаковки.

Таким чином, обидва зразки упаковки демонструють наявність мікропластикових часток, що підтверджує потенційне забруднення продуктів, упакованих у ці матеріали. Наявність таких часток є серйозною проблемою для здоров'я людини, оскільки мікропластик може проникати у харчові продукти, що споживаються, і мати негативний вплив на організм. Ці результати також підтверджують важливість подальших досліджень щодо механізмів виділення мікропластику з упаковок і розробки нових, більш безпечних матеріалів для пакування харчових продуктів. Забезпечення більш суворого контролю за якістю упаковки, а також підвищення обізнаності споживачів про ризики, пов'язані з мікропластиком, є важливими кроками для мінімізації забруднення та захисту здоров'я людини і навколишнього середовища.

Для зниження кількості мікропластику у харчових продуктах можна впровадити такі рекомендації:

1. Вдосконалення харчових технологій і процесів:

– оптимізація систем водопостачання: встановлення високоефективних фільтрів для видалення мікропластику з води, яка використовується у харчовому виробництві;

– зниження використання пластикової упаковки: впровадження альтернатив, таких як скло, метал або біорозкладні матеріали;

– контроль умов зберігання: мінімізація контакту харчових продуктів із пластиковою тарою, особливо при високих температурах, що сприяють виділенню мікропластику.

2. Поліпшення технологій відбору та аналізу проб:

– використання стандартних методів ідентифікації мікропластику для контролю якості продуктів;

– регулярне тестування харчових продуктів та упаковки на вміст мікропластику.

3. Зміна поведінки споживачів:

– зменшення використання пластикових контейнерів, пакетів і одноразового посуду;

– пропагування екологічно свідомого вибору упаковки під час купівлі продуктів;

– зберігання продуктів у скляних або металевих контейнерах вдома.

4. Розробка та впровадження політик і стандартів:

– посилення законодавства щодо виробництва та утилізації пластику;

– заборона мікропластикових добавок у продуктах особистої гігієни, які можуть потрапляти у воду;

– стимулювання виробників переходити на екологічно чисті матеріали.

5. Освітні та інформаційні кампанії:

– поширення знань серед населення та працівників харчової промисловості про небезпеку мікропластику та способи його уникнення;

– заохочення досліджень та інновацій у сфері видалення мікропластику з продуктів.

6. Розвиток технологій очищення:

– використання передових методів фільтрації, наприклад, мембранних технологій або електрокоагуляції, для видалення мікропластику на різних етапах виробництва;

– впровадження систем ультрафільтрації на харчових підприємствах.

7. Контроль забруднення навколишнього середовища:

– розробка програм для зниження викидів пластикового сміття у воду, ґрунт та повітря;

– заохочення програм утилізації та переробки пластикових відходів.

Виконання цих рекомендацій дозволить значно знизити ризики, пов'язані з мікропластиком у харчових продуктах, та сприятиме збереженню екологічного балансу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів

На підприємстві створена і діє система управління охороною праці, яку очолює керівник підприємства. Відповідальність за координацію, планування та контроль дотримання вимог законодавства у сфері охорони праці та промислової безпеки покладена на службу охорони праці, представлену начальником відповідного відділу [97].

У кожному виробничому підрозділі підприємства наявна необхідна нормативно-технічна документація, яка регламентує порядок і умови безпечного виконання виробничих процесів, дії персоналу у разі аварій та правила проведення ремонтних робіт. Перелік такої документації для кожного робочого місця затверджує головний інженер підприємства. Ця документація переглядається кожні три роки або за необхідності: у разі внесення змін до базових документів, на основі яких вона складена, або за результатами розслідувань аварій, травматизму чи нещасних випадків.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються за природою дії на такі групи [97]:

- фізичні;
- хімічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Фізичні фактори: рухомі машини й механізми, частини обладнання; об'єкти, що пересуваються, матеріали, що обробляються; конструкції, що можуть зруйнуватися; підвищена запиленість або загазованість робочої зони; екстремальні температури обладнання, матеріалів або повітря; висока інтенсивність ультрафіолетового випромінювання; розташування робочого місця на великій висоті; підвищений рівень шуму, вібрації; висока напруга в електромережі, небезпечна для людини; недостатнє чи надмірне освітлення.

Хімічні фактори: токсичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні речовини; вплив на репродуктивну функцію.

Проникають до організму через дихальні шляхи, шлунково-кишковий тракт або через шкіру та слизові оболонки.

Біологічні фактори: патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гриби тощо) та продукти їхньої життєдіяльності.

Психофізіологічні фактори: фізичні перевантаження (статичні або динамічні); нервово-психічні навантаження.

Такий підхід до ідентифікації небезпечних і шкідливих факторів дозволяє ефективно організувати заходи з охорони праці.

4.2. Вимоги до території, робочих місць, організації безпечного руху працівників і транспорту

При проектуванні робочого місця враховано наступні вимоги:

Проходи для обслуговування: відстань між стіною та елементами обладнання становить 1,3–1,5 м. Відстань між робочим місцем оператора і щитом – 2–6 м залежно від розмірів щита. Висота приміщень визначається в кожному конкретному проекті з урахуванням висоти обладнання, розташування повітроводів та естетичних вимог, але не може бути меншою за 3,6 м [97].

Кількість виходів: при площі приміщення до 60 м² передбачається один вихід. При площі понад 60 м² – щонайменше два виходи. Один із виходів облаштовується через тамбур або коридор, інші можуть мати двері, за потреби оббиті повстю і сталевим листом. У приміщеннях на другому поверсі один вихід повинен вести на зовнішні металеві сходи для евакуації. Якщо приміщення оточене обладнанням, один із виходів повинен бути спрямований у бік найменш небезпечного об'єкта (наприклад, компресорної повітря або інертного газу).

Вимоги до стану території. Виділяються спеціальні місця для стоянки транспорту, розташовані осторонь від маршрутів працівників і зон

вантажно-розвантажувальних робіт. Використання проїздів та технологічних заїздів для стоянки заборонено.

Освітлення приміщень. Вхід у неосвітлені або недостатньо освітлені приміщення заборонено. Освітлення в зонах із ризиком вибуху або пожежі виконується світильниками у вибухозахищеному виконанні.

Обмеження на роботи: заборонено проводити роботи, не пов'язані з плановою діяльністю, у зоні виконання технологічних або ремонтних завдань.

4.3. Забезпечення нормативних значень показників мікроклімату і чистоти повітря.

Показники мікроклімату включають [97]:

Температуру повітря.

Відносну вологість повітря.

Швидкість руху повітря.

Інтенсивність теплового випромінювання.

Вимоги до показників мікроклімату: оптимальні значення розповсюджуються на всю робочу зону. Допустимі значення визначаються окремо для постійних і непостійних робочих місць у випадках, коли технологічно, технічно або економічно неможливо забезпечити оптимальні умови.

Регулювання температури: температура внутрішніх поверхонь (стіни, підлога, стеля) або пристроїв не повинна відрізнятися від оптимальної температури повітря більш ніж на 2°C для кожної категорії робіт. Якщо температура поверхонь перевищує допустимі значення, робочі місця мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від таких поверхонь. У межах робочої зони температура повітря повинна бути стабільною і не перевищувати встановлені оптимальні показники протягом зміни [97].

Коливання температури: до 4°C для легких робіт. До 5°C для робіт середньої важкості. До 6°C для важких робіт. Незалежно від коливань,

температура повітря не повинна виходити за межі допустимих значень.

Вимоги до вентиляції: для припливної вентиляції у виробничих зонах повітрозабірні отвори розташовуються не нижче 15 м від рівня землі. У складських зонах – не нижче 5 м. Повітрозабір здійснюється виключно в місцях, де відсутній ризик утворення вибухонебезпечних сумішей.

Контроль стану вентиляції: технічний огляд і перевірка працездатності вентиляційних систем проводяться щозміни. Всі порушення або відхилення від норми реєструються. У місцях постійного виділення шкідливих речовин (парів, газів, пилу) встановлені локальні відсмоктувачі відповідно до Інструкції з проектування опалення та вентиляції. Вентилятори місцевих відсмоктувачів автоматично вмикаються одночасно з запуском обладнання. Дотримання цих норм забезпечує комфортні та безпечні умови праці, а також мінімізує вплив шкідливих факторів на працівників [97].

4.4. Освітлення, заходи і засоби для забезпечення нормованих показників освітлення.

Організація зовнішнього освітлення передбачає охоронне освітлення та освітлення, необхідне для забезпечення виробничого процесу в темний час доби. До об'єктів, які беруть участь у виробничій діяльності, належать дороги, проїзди, робочі майданчики, склади з готовою продукцією, зокрема гасом і нафтопродуктами, а також зони для розвантаження й навантаження продукції [97].

Охоронне освітлення встановлюється по периметру огорожі території. Світильники, здебільшого консольного типу, кріпляться на металеві опори, висота яких визначається особливостями об'єкта, розміром його території та висотою огорожі. Як джерела світла найкраще використовувати натрієві лампи, які створюють рівне м'яке освітлення. Таке освітлення не засліплює працівників охорони, але забезпечує чітке сприйняття контурів охоронюваної території.

Аварійне освітлення підключається до незалежного джерела

живлення, що дозволяє підтримувати освітлення навіть у разі перебоїв з електропостачанням. Для забезпечення належного функціонування освітлювальних установок передбачено їхній технічний огляд раз на рік. Ця система забезпечує безпеку і безперебійність виробничих процесів.

4.5. Заходи і засоби для захисту працюючих від ураження електричним струмом

Електроустановки підприємства відповідають вимогам чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), ОПВБ, а також експлуатуються відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів, Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів, діючих стандартів безпеки праці та інших нормативних документів.

Для забезпечення безпеки на всіх дверцятах, кришках шаф, нішах та інших конструкціях, що містять електрообладнання напругою понад 42 В, обов'язково розміщуються попереджувальні знаки електричної напруги. Крім того, на дверцятах має бути зазначений перелік устаткування, що відповідає встановленій електроапаратурі [97].

На підприємстві зберігається технічна документація, яка підтверджує відповідність електроустановок вимогам і дозволяє їх експлуатацію. До цієї документації належать акти приймання прихованих робіт, генеральний план території із позначенням споруд і підземних електротехнічних комунікацій, затверджена проектна документація з урахуванням усіх змін, акти випробувань і налаштування обладнання, акт приймання електроустановок в експлуатацію, робочі схеми первинних і вторинних електричних сполучень, технічні паспорти основного устаткування. Окрім цього, до документації входять інструкції з обслуговування електроустановок, посадові інструкції для кожного робочого місця та інструкції з охорони праці.

4.6. Забезпечення пожежо-вибухобезпеки

Пожежна безпека підприємства забезпечується відповідно до вимог

Закону України «Про пожежну безпеку», Правил пожежної безпеки в Україні та інших нормативних актів. Забезпечення пожежної безпеки входить до обов'язків посадових осіб і працівників підприємства, що має бути відображено в трудових договорах і статутах підприємств. Відповідальність за пожежну безпеку покладається на керівників підприємств та уповноважених осіб, які відповідають за окремі будівлі, споруди, приміщення або ділянки, включно з технологічним і інженерним обладнанням та технічними засобами протипожежного захисту. Ці обов'язки закріплюються у функціональних обов'язках, інструкціях і положеннях [97].

Керівник підприємства зобов'язаний організувати розробку комплексних заходів з пожежної безпеки, затверджувати положення, інструкції й інші нормативні акти, контролювати їх виконання, впроваджувати сучасні технічні досягнення та забезпечувати дотримання протипожежних вимог. У разі відсутності в нормативних актах відповідних вимог керівник повинен погоджувати необхідні заходи з органами державного пожежного нагляду. Підтримання справності засобів протипожежного захисту, організація навчання працівників правилам пожежної безпеки, інформування пожежної охорони про несправності, а також службове розслідування випадків пожеж входять до сфери його відповідальності [97].

Територія підприємства повинна забезпечувати вільний доступ до пожежних водойм, резервуарів і гідрантів, що мають бути оснащені світловими або флуоресцентними покажчиками. Пожежні гідранти та крани підлягають технічному обслуговуванню не рідше одного разу на шість місяців. Усі будівлі та приміщення повинні бути обладнані засобами пожежогасіння, сигналізації й зв'язку для негайного виклику допомоги у разі пожежі. Вогнегасники та засоби виклику передаються під відповідальність керівників відповідних підрозділів. Використання пожежної техніки для інших потреб заборонено.

Технологічне обладнання повинно бути пожежобезпечним за

нормальних умов експлуатації. У разі аварій передбачаються заходи для обмеження масштабу та наслідків пожежі. Зберігання та використання речовин із невивченими пожежно-вибуховими властивостями заборонено. Обладнання, трубопроводи та арматура, що контактують із вибухонебезпечними речовинами, повинні бути герметичними. Гарячі поверхні трубопроводів та обладнання ізолюються негорючими матеріалами, щоб знизити температуру до безпечного рівня.

РОЗДІЛ 5

ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

Зростаючий вплив людської діяльності на навколишнє середовище, стрімкий розвиток технологій і інтенсивна експлуатація певних територій призводять до суттєвих змін екосистеми, порушуючи природну рівновагу і механізми саморегуляції. Це значно збільшує ризик стихійних лих і техногенних катастроф. Засоби масової інформації регулярно повідомляють про надзвичайні ситуації, такі як природні катаклізми, аварії на підприємствах і транспорті, що призводять до загибелі людей, руйнування інфраструктури та забруднення довкілля [98].

Аналіз надзвичайних ситуацій показує, що найбільші втрати завдають події природного і техногенного характеру. У природній сфері найбільшу небезпеку становлять землетруси, цунамі, паводки, урагани, лісові пожежі і зсуви. У техногенній сфері загрозу несуть радіаційні аварії, транспортні катастрофи, аварії з викидами хімічно або біологічно небезпечних речовин, вибухи, пожежі, гідродинамічні руйнування і несправності комунально-енергетичних систем.

Державна політика у сфері цивільного захисту спрямована на забезпечення безпеки населення, матеріальних і культурних цінностей, а також довкілля в умовах надзвичайних ситуацій. Метою є досягнення прийняттого рівня ризику згідно з науково обґрунтованими критеріями. Протягом останніх років було прийнято низку законодавчих і нормативно-правових актів, які регулюють заходи із запобігання надзвичайним ситуаціям та ліквідації їх наслідків. Кодекс цивільного захисту України став важливим кроком у впорядкуванні відносин у цій сфері, зокрема щодо функціонування єдиної державної системи цивільного захисту [98].

Цивільний захист охоплює комплекс організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і профілактичних заходів, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям і ліквідацію їх наслідків. Наприклад, у разі вибуху

на заводі надзвичайна ситуація потребує негайного реагування.

Вибух є швидкою хімічною реакцією, що супроводжується вивільненням енергії та утворенням стиснених газів, здатних виконувати механічну роботу. Існує кілька видів вибухів:

- детонація, що характеризується швидкістю поширення фронту полум'я від 2000 до 3000 м/с;

- об'ємний вибух, який виникає внаслідок наявності вибухонебезпечної концентрації газів або парів у всьому об'ємі приміщення;

- вибух газопилової хмари в замкнутому просторі, коли в герметичній ємності (балони зі стисненим газом, компресори тощо) утворюється піковий тиск у сотні кПа;

- вибух газопилової хмари у відкритому просторі, де піковий тиск незначно перевищує атмосферний;

- вибух киплячих рідин із виділенням пари, що виникає всередині резервуарів із газом під тиском, супроводжується пожежами та інтенсивним тепловиділенням.

У кожному випадку необхідно застосовувати спеціальні заходи, щоб мінімізувати наслідки і запобігти поширенню небезпеки.

ВИСНОВКИ

1. За період з 1950 по 2023 рік загальне виробництво сягнуло 9,5 мільярдів тонн пластику – більше однієї тони пластику на кожну людину, яка живе сьогодні. Збільшення населення та постійний попит на пластмасу та пластикові вироби спричиняють безперервне зростання виробництва пластмас, утворення пластикових відходів і супутнє забруднення навколишнього середовища. Наразі одноразова упаковка є найбільшим сектором, на який припадає майже 40% загального використання пластику в Європі, далі йдуть споживчі товари, матеріали для будівництва, автомобілів, електротехніки та сільського господарства на 22%, 20%, 9%, 6% і 3% відповідно.

2. Розповсюдження пластикових відходів пов'язують з населенням. Неправильна утилізація відходів із пластмаси та пластмасових виробів призвела до забруднення навколишнього середовища. Пластикові відходи на звалищах є відображенням нереалізованого економічного потенціалу та шкоди, завданої навколишньому середовищу. Стандартні методи управління відходами для пластикових матеріалів включають термічне розкладання, захоронення, механічне подрібнення, спалювання, переробку та мікробіологічне розкладання. Основною проблемою, яка залишається в управлінні пластиковими відходами, є швидка та ефективна ідентифікація та сортування пластикових відходів.

3. Було виявлено, що забруднення мікропластиком впливає на всі компоненти навколишнього середовища, але найбільш широко досліджена гідросфера. Загалом же, кінцеві точки транслокації мікропластику знаходиться в атмосферному, наземному, прісноводному та морському середовищах. З цього моменту він може бути потрапити в харчовий ланцюг через антропогенну діяльність (наприклад, виробництво харчових продуктів) і біотурбацію (порушення відкладень живими організмами, що спричиняє мікропластичне переміщення). У виробництві харчових

продуктів мікропластик може потрапляти у харчовий ланцюг на всіх різних етапах, від первинного виробництва до обробки, транспортування/розповсюдження, пакування, споживання та навіть утилізації.

4. Все більше досліджень показують, що пластикова криза охоплює всі аспекти природного світу, від здоров'я людини до стабільності екосистем. Проте багато невідповідностей (нестандартизовані методології) та обмеження стають все більш очевидними в дослідженні з пластмас. Розробка нових і передових аналітичних інструментів, застосованих до різних типів зразків, їх валідація та загальна гармонізація в галузі досліджень мікропластик (MP)/нанопластик (NP) мають першочергове значення для моніторингу, розуміння присутності та поведінки цього нового класу забруднюючих речовин. Багатовимірність даних, необхідних для повної характеристики MP і НЧ, призводить до довгих і трудомістких протоколів. Для успішного аналізу МП/НЧ у зразках навколишнього середовища та харчових продуктів необхідна адекватна обробка різних етапів, включаючи: відбір проб; виділення/екстракцію МП/НЧ; розділення/попереднє концентрування; визначення розміру; хімічна ідентифікація; кількісна оцінка.

5. Пробопідготовка є ключовим елементом у виявленні МП та НЧ. Доступна література зосереджена на протоколах екстракції МП, тоді як вплив цих процедур на менші наночастинки ще не досліджено. Одержані результати узагальнюють аналітичні методи, які найбільше застосовуються для аналізу МП у продуктах харчування. ІЧ-перетворення Фур'є (FTIR) є найбільш використовуваною аналітичною технікою для оцінки забруднення МР у харчових продуктах і напоях, за нею слідує раманівська спектроскопія, оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія (SEM) і, меншою мірою, мас-спектрометрія (GC/MS). Однак, жоден із методів, не задовольняє повної аналітичної валідації МП, і лише близько третини з них оцінювали принаймні один параметр якості. На основі

проведеного аналізу не вдалося визначити єдиний унікальний метод, здатний мати справу з багатовимірністю даних, необхідних для повного опису появи МП та НЧ у продуктах харчування. Поєднання мікроскопічних методів з методами аналітичної характеристики є перспективним для виявлення та ідентифікації МП. Навіть найпоширеніші методи все ще знаходяться в стадії розробки, а дослідження МП ще далекі від валідації та стандартизації методу. Для НЧ поєднання АСМ з ІЧ є перспективним у майбутньому, оскільки це єдиний метод, здатний забезпечити як стабільну хімічну ідентифікацію, так і фізичну характеристику частинок у нанорозмірі. Однак варіанти розвитку методів аналізу НЧ все ще дуже обмежені.

6. Щоб оцінити, чи може та як, харчова упаковка вивільняти МП у звичайних умовах щоденного використання, ми зосередилися на виборі двох типів харчової упаковки: поліетиленові пакети для приготування круп та вакуумні пакети для заморожування харчових продуктів. Ці контейнери для харчових продуктів були обрані на основі їх широкого використання, а також тому, що їх звичне їх застосування відповідає умовам, що значно перевищує звичайну температуру навколишнього середовища. Зокрема, у мішках для заморожування харчових продуктів, кількість мікропластичних часток складає 48 ± 23 з розміром $12,2 \pm 0,8$ мкм. У поліетиленових мішках для приготування круп виявлено 36 ± 13 часток мікропластику з розміром $7,5 \pm 0,6$ мкм. Таким чином, обидва зразки демонструють наявність мікропластикових часток, що підтверджує потенційне забруднення продуктів, упакованих у ці матеріали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hannah Ritchie “FAQs on plastics” Published online at OurWorldinData.org. 2018. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/faq-on-plastics'
2. Global plastic production 1950-2023. Published by Statista Research Department, Nov 21, 2024. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950>
3. Olawade David, Wada Ojima, Ore Odunayo, Clement David-Olawade Aanuoluwapo, David-Olawade Aanuoluwapo, Esan Deborah, Egbewole Bamise Ling Jonathan. Trends of solid waste generation during COVID-19 Pandemic: A review. Waste Management Bulletin. 2024 1. 93-103.
4. Proshad R., Islam M.S., Kormoker T., Haque M.A., Mahfuzur Rahman M.D., et al. Toxic effects of plastic on human health and environment: A consequences of health risk assessment in Bangladesh Inter J Hlth. 2018. 6: 1-5.
5. Rochman C.M., Browne M.A., Halpern B.S., Hentschel B.T., Hoh E, et al. Policy: Classify plastic waste as hazardous. Nature. 2013. 494: 169-171.
6. Derraik J.G. The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. Mar Pollut Bull. 2002. 44: 842-852.
7. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J. Lost at sea: Where is all the plastic?. Science. 2004. 304: 838.
8. Wilcox C., Van Sebille E., Hardesty B.D.) Threat of plastic pollution to seabirds is global, seabirds, pervasive and increasing. PNAS. 2015. 38: 11899-11904.
9. Aizudin M., Goei R., Ong A.J., Tan Y.Z., Lua S.K., Pottammel R.P., Geng H., Wu, X.L., Tok A.L.Y., Ang E.H. Sustainable development of graphitic carbon nanosheets from plastic wastes with efficient photothermal energy conversion for enhanced solar evaporation. J. Mater. Chem. A Mater. 2022. 10. 19612–19617.
10. Shen M., Song B., Zeng G., Zhang Y., Huang W., Wen X., Tang W.

Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution? *Environ. Pollut.* 2020. 263. 114469.

11. Hira A., Pacini H., Attafuah-Wadee K., Vivas-Eugui D., Saltzberg M., Yeoh T.N. Plastic Waste Mitigation Strategies: A Review of Lessons from Developing Countries. *J. Dev. Soc.* 2022. 38. 336–359.

12. Li N., Liu H., Cheng Z., Yan B., Chen G., Wang, S. Conversion of plastic waste into fuels: A critical review. *J. Hazard. Mater.* 2022. 424. 127460.

13. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 2017. 3. 700782.

14. Worm B., Lotze H.K., Jubinville I., Wilcox C., Jambeck J. Plastic as a Persistent Marine Pollutant. *Annual Rev Environ Res.* 2017. 42. 1-26.

15. Recyclable Plastic Materials <https://www.aaapolymer.com/recyclable-plastic-materials>

16. Dowty B.J., Laseter J.L., Storer J. The transplacental migration and accumulation in blood of volatile organic constituents. *Pediat Res.* 1976. 10: 696-701.

17. Van Cauwenberghe L., Devriese L., Galgani F., Robbens J., Janseen C.R. Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects. *Mar Environ Res.* 2015. 111. 5-17.

18. Alomar C., Estarellas F., Deudero S. Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Mar Environ Res.* 2016. 115. 1-10.

19. Lambert S., Scherer C., Wagner M. Ecotoxicity testing of microplastics: Considering the heterogeneity of physicochemical properties. *Integr Environ Assess Manag.* 2017. 13(3). 470–475

20. Dey T.K., Uddin M.E., Jamal, M. Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. *Environ Sci Pollut Res.* 2021. 28, 16925–16947. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12943-5>

21. Величко С., Дупляк О. Методи боротьби з пластиковими відходами в водних об'єктах, огляд світового досвіду. Проблеми

водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2022. 40. 4–15.
<https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.4-15>

22. Михайлова Є. О. Пластикове забруднення – одна з головних екологічних проблем людства. Комунальне господарство міст. 2020. 157. 109 – 121

23. Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., et al. Plastic pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLOS One. 2014. 9. e111913.

24 Barbosa L.G.A., Gimenez B.C.G. Microplastics in the marine environment: Current trends and future perspectives. Mar Pollut Bull. 2015. 97: 5–12.

25. Gregory MR Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2009. 364. 2013-2025.

26. Chandegara V.K., Cholera S.P., Nandasana J.N., Kumpavat M.T., Patel K.C. Plastic Packaging Waste Impact on Climate Change and its Mitigation. In: Subbaiah R, Prajapati GV, Water management and climate smart agriculture. Adaptation of Climatic Resilient Water Management and Agriculture, Gyan Publishing House, New Delhi, India. 2015. 3. 404-415.

27. Hamlet C., Matte T., Mehta S. Combating plastic air pollution on earth's day. Vital strategies environmental health division. 2018.
<https://medium.com/vital-strategies/combating-plastic-and-air-pollution-on-earth-day-d9c06f1ca219>

28. Lwanga E.H., Beriot N., Corradini F., Silva V., Yang X., Baartman J., Geissen V. Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2022. 9(1). 1-20.

29. Guo Z., Li P., Yang X., Wang Z., Lu B., Chen W., Xue S. Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. Environment International. 2022. 165. 107293.

30. Wang Z., Li W., Li W., Yang W., Jing S. Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures. *Chemosphere*. 2023. 317. 137762.
31. Daniel D.C. *Creating a sustainable future*. Jones and Bartlett Learning. *Environ Sci*. 2008. 8. 517-518.
32. Galloway T.S. Micro- and nano-plastics and human health. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M, (1st edn). Published by Springer Open, *Marine Anthropogenic Litter*. 2015. 343-366.
33. Kang JH, Kito K, Kondo F Factors influencing the migration of bisphenol A from cans. *J Food Prot*. 2003. 66. 1444- 1447.
34. Yuan Z Nag R, Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - from marine to food systems. *Sci Total Environ*. 2022. 823. 153730.
35. Chen Y., Selvinsimpson S. Current trends, challenges, and opportunities for plastic recycling. *Plastic and Microplastic in the Environment: Management and Health Risks*. 2022. 205–221.
36. Geyer R. Production, use, and fate of synthetic polymers. *Plast. Waste Recycl*. 2020. 13–32
37. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2009. 364. 2115-2126.
38. The APR Design Guide for Plastics Recyclability. The Association of Plastic Recyclers. <https://www.recyclingtoday.com/news/apr-launches-new-digital-tool-for-design-guide/>
39. Reddy R.L., Reddy S.V., Gupta G.A. Study of Bio-plastics as Green and Sustainable Alternative to Plastics. *Inter. J Emerg Technol Advance Engineer*. 2013. 3. 82-89.
40. Chen G., Patel M. Plastics derived from biological sources: Present and future: A technical and environmental review. *Chem Rev* 2012. 112. 2082-2099.
41. Чагайда А., Тарасюк Г. Тенденції зростання у навколишньому середовищі мікропластику та його вплив на споживачів послуг індустрії

гостинності. Економіка, управління та адміністрування. 2023. 1(103). 76-87.

42. Коріненко Б.В. Мікропластик як глобальне джерело забруднення навколишнього середовища. Вісник ВПІ. 2022. 6. 6–12

43. Li Q., Feng Z., Zhang T., Ma C., Shi H.. Microplastics in the commercial seaweed nori. *J. Hazard. Mater.* 2020. 388. 122060

44. Tympa L.E., Katsara K., Moschou P.N. Kenanakis G., Papadakis V.M. Do Microplastics Enter Our Food Chain Via Root Vegetables? A Raman Based Spectroscopic Study on *Raphanus sativus*. *Materials.* 2021. 14(9). 2329.

45. Silva G.C., Galleguillos Madrid F.M., Hernández D., Pincheira G., Peralta A.K., Urrestarazu Gavilán M., Vergara-Carmona V., Fuentes-Peñailillo F. Microplastics and Their Effect in Horticultural Crops: Food Safety and Plant Stress. *Agronomy.* 2021. 11(8). 1528.

46. Nizzetto L., Futter M., Langaas S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol 50/Issue 20. 10777-10779

47. Chen Y., Leng Y., Liu X., Wang J. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China. *Environ. Pollut.* 2020. 257. 113449

48. Wang J., Chen G., Christie P., Zhang M., Luo Y., Teng Y. Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in vegetables and soils of suburban plastic film greenhouses. *Sci. Total Environ.* 2015. 523. 129–137

49. Mintenig S.M., Löder M.G.J., Primpke S., Gerdts, G. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Sci. Total Environ.* 2019. 648. 631-635.

50. Strand J., Feld L., Murphy F., Mackevica A., Hartmann N.B. Analysis of microplastic particles in Danish drinking water. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy. 2018. 291. 38.

51. Kutralam-Muniasamy G., Pérez-Guevara F., Elizalde-Martínez, I., Shruti V.C. Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? *Sci. Total Environ.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136823>

52. Wagner, M., Oehlmann, J. Endocrine disruptors in bottled mineral

water: total estrogenic burden and migration from plastic bottles. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2009. 16. 278–286.

53. Liebezeit G., Liebezeit E. Origin of synthetic particles in honeys. *Polish J. Food Nutr. Sci.* 2015. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0025>

54. Renzi M., Guerranti C., Blašković, A. Microplastic contents from maricultured and natural mussels. *Mar. Pollut. Bull.* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.035>

55. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Mar. Pollut. Bull.* 2016. Volume 104, Issues 1–2. 290-293

56. Grob, K., Biedermann, M., Scherbaum, E., Roth, M. & Rieger, K. Food Contamination with Organic Materials in Perspective: Packaging Materials as the Largest and Least Controlled Source? A View Focusing on the European Situation. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2006. 46. 529–535.

57. Garcia Ibarra V., Rodriguez Bernaldo de Quiros A., Paseiro Losada P., Sendon, R. Identification of intentionally and non-intentionally added substances in plastic packaging materials and their migration into food products. *Anal. Bioanal. Chem.* 2018. 410(16). 3789-3803.

58. Bhunia K., Sablani S.S., Tang J., Rasco B. Migration of chemical compounds from packaging polymers during microwave, conventional heat treatment, and storage. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2013. 12(5). 523-545

59. Musoke L., Banadda N., Sempala C., Kigozi J. The Migration of Chemical Contaminants from Polyethylene Bags into Food During Cooking. *Open Food Sci. J.* 2015. 9(1). 14 – 18

60. Aves A.R., Revell L.E., Gaw S., Ruffell H., Schuddeboom A., Wotherspoon N.E., LaRue M., McDonald A.J.. First evidence of microplastics in Antarctic snow. *Cryosphere.* 2022. 16 (6). 2127–2145

61. Montano L., Giorgini E., Notarstefano V., Notari T., Ricciardi M., Piscopo M., Motta O. Raman Microspectroscopy evidence of microplastics in human semen. *Sci Total Environ.* 2023. 901. 165922.

62. Sharma Raj, Kumari Usha, Kumar Sudhir. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus*. 2024. 16. 1-9.
63. Way C., Hudson M.D., Williams I.D., Langley G.J. Evidence of underestimation in microplastic research: a meta-analysis of recovery rate studies. *Sci Total Environ*. 2022.805. 150227.
64. Provencher J.F., Covernton G.A., Moore R.C., Horn D.A., Conkle J.L., Lusher A.L. Proceed with caution: the need to raise the publication bar for microplastics research. *Sci Total Environ*. 2020. 748. 141426.
65. Witzig C.S., Foldi C., Worle K., Habermehl P., Pittroff M., Muller Y.K., Lauschke T., Fiener P., Dierkes G., Freier K.P., Zumbulte N. When good intentions go bad-false positive microplastic detection caused by disposable gloves. *Environ Sci Technol*. 2020. 54 (19). 12164–12172.
66. ISO/TR 21960. International Organization for Standardization, Plastics and Environmental Aspects and State of Knowledge and Methodologies, 2020. <https://www.iso.org/standard/72300.html#lifecycle>
67. Hurley R.R., Lusher A.L., Olsen M., Nizzetto L. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices, *Environ. Sci. Technol*. 2018. 52. 7409–7417.
68. Davidson K., Dudas S. Microplastic ingestion by wild and cultured manila clams (*venerupis philippinarum*) from baynes sound, British columbia, *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 2016. 71. 147–156.
69. Mathalon A., Hill P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding halifax harbor, nova scotia, *Mar. Pollut. Bull*. 2014. 81. 69–79.
70. Panebianco A., Nalbone L., Giarratana F., Ziino G. First discoveries of microplastics in terrestrial snails, *Food Control*. 2019. 106. 106722.
71. Lambert S., Wagner M. Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene, *Chemosphere*. 2016. 145. 265–268.
72. Ekvall M., Lundqvist M., Kelpsiene E., Sileikis E., Gunnarsson S., Cedervall T. Nanoplastics formed during the mechanical breakdown of daily-use polystyrene products, *Nanoscale Adv*. 2019. 1. 1055–1061.

73. Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red, *Sci. Rep.* 2017. 7. 1–10.

74. Prata J., Reis V., Matos J., da Costa J., Duarte A., Rocha-Santos T. A new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT), *Sci. Total Environ.* 2019. 690. 1277–1283.

75. Girao A., Caputo G., Ferro M. Application of Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, *Compr. Anal. Chem.*, Elsevier. 2017. 153–168.

76. Crawford C., Quinn B. Microplastic identification techniques. Elsevier Science 2017. 219–267.

77. Ruggeri F., Sneideris T., Vendruscolo M., Knowles T. Atomic force microscopy for single molecule characterisation of protein aggregation, *Arch. Biochem. Biophys.* 2019. 664. 134–148.

78. Chen Y., Wen D., Pei J., Fei Y., Ouyang D., Zhang H., Luo Y., Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: current status and future prospects, *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.* 2020. 18. 14–19.

79. Li J., Green C., Reynolds A., Shi H., Rotchell J. Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom, *Environ. Pollut.* 2018. 241. 35–44.

80. Zada L., Leslie H., Vethaak A., Tinnevelt G., Jansen J. Fast microplastics identification with stimulated Raman scattering microscopy. *J. Raman Spectrosc.* 2018. 49. 1136–1144.

81. Goedecke C., Dittmann D., Eisentraut P., Wiesner Y., Scharrel B. Evaluation of thermoanalytical methods equipped with evolved gas analysis for the detection of microplastic in environmental samples, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2020. 152. 104961.

82. Penalver M., Arroyo-Manzanares R., Lopez-Garcia N., Hernandez-Cordoba I. An Overview of Microplastics Characterization by Thermal Analysis.

2020. 242.

83. Karami A., Golieskardi A., Keong Choo C., Larat V., Galloway T.S., Salamatinia B. The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Scientific Reports*. 2017. 7. 46173.

84. Nalbone L., Cincotta F., Giarratana F., Ziino G., & Panebianco A. Microplastics in fresh and processed mussels sampled from fish shops and large retail chains in Italy. *Food Control*. 2021. 125. 108003.

85. Daniel D. B., Ashraf P. M., Thomas S. N. Abundance, characteristics and seasonal variation of microplastics in Indian white shrimps (*Fenneropenaeus indicus*) from coastal waters off Cochin, Kerala, India. *Science of The Total Environment*. 2020. 737. 139839.

86. Barboza L., Lopes C., Oliveira P., Bessa F., Otero V. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Science of the Total Environment*. 2020. 717. 134625.

87. Diaz-Basantes M. F., Nacimba-Aguirre D., Conesa, J. A., Fullana, A. Presence of microplastics in commercial canned tuna. *Food Chemistry*. 2022. 385. 132721.

88. Pham D. , Kim J., Lee S., Kim J., Kim D., Hong S., Jung J., Kwon, J. Analysis of microplastics in various foods and assessment of aggregate human exposure via food consumption in Korea. *Environmental Pollution*. 2023. 322. 121153.

89. Kosuth M., Mason S. Wattenberg E. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE*. 2018. 13(4). 0194970.

90. Aydin R. B., Yozukmaz A., Sener İ., Temiz F., Giannetto D. Occurrence of microplastics in most consumed fruits and vegetables from Turkey and public risk assessment for consumers. 2023. *Life*. 13(8). 1686.

91. Qian N., Gao X., Lang X., Deng H., Bratu T. M., Chen Q., Stapleton P., Yan B., Min W. Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2024. 121(3).

2300582121.

92. Zhou G., Wu Q., Tang P., Chen C., Cheng X., Wei X., Ma J. How many microplastics do we ingest when using disposable drink cups? *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 441.

93. Gerhard M., Schymanski D., Ebner I., Esselen M., Stahl T., Humpf H. Can the presence of additives result in false positive errors for microplastics in infant feeding bottles? *Food Additives & Contaminants: Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*. 2022. 39(1). 185–197.

94. Jakubowska N.; Beldi G.; Robouch P.; Hoekstra E. Testing Conditions for Kitchenware Articles in Contact with Foodstuffs: Plastics and Metals; Technical Report JRC121622; European Commission: Ispra, Italy, 2020.

95. Majors R. Current Trends in HPLC Column Technology. *LCGC N. Am.* 2012. 30. 20–34.

96. European Union. Council directive of 19 December 1985 laying down the list of simulants to be used for testing migration of constituents of plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs. *Off. J. Eur. Communities* 1985. 372. 14–21.

97. Полукаров О. І. Охорона праці та цивільний захист: конспект лекцій навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 289 с.

98. Методичні рекомендації з питань організації та реалізації заходів цивільного захисту в органах виконавчої влади та на підприємствах, в установах і організаціях. Київ : ДСУ з НС. 2016. 185 с.