

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
факультет медико-фармацевтичних технологій
кафедра клінічної лабораторної діагностики,
мікробіології та біологічної хімії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ МІКРОПЛАСТИКУ В ЇЖІ ТА НАПОЯХ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Виконала: здобувачка вищої освіти групи

ЛДм24(1,5д)-01

спеціальності 224 Технології медичної

діагностики та лікування

освітньо-професійної програми Лабораторна

діагностика

Діана КУЦЕНКО

Керівник: доцент закладу вищої освіти

кафедри клінічної лабораторної діагностики

мікробіології та біологічної хімії, к. біол. н.,

доцент Олена МАТВІЙЧУК

Рецензент: доцент закладу вищої освіти

кафедри технологій медичної діагностики

ХНМУ, к.мед.н., доцент Лариса КАРАБУТ

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі проаналізовано потенційні наслідки впливу мікропластику в продуктах харчування для здоров'я людини, вивчено методики виявлення мікропластику в харчовій сировині та проведено дослідження зразків цукру з роздрібної торгівельної мережі.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг – 47 сторінок. Опрацьовано 42 джерела літератури.

Ключові слова: мікропластик, ризики для здоров'я, гігієнічна оцінка, Раман спектроскопія.

ANNOTATION

The qualification work analyzed the potential consequences of microplastics in food for human health, studied methods for detecting microplastics in food raw materials, and conducted a study of sugar samples from a retail chain.

The work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices. Total volume – 47 pages. 42 sources of literature were reviewed.

Keywords: microplastics, health risks, hygienic assessment, Raman spectroscopy.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ГІГІЄНИЧНОЇ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТІВ ПЛАСТИКУ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ (огляд літератури) | 7 |
| 1.1. Вплив мікропластику в харчових продуктах та напоях на здоров'я людини..... | 7 |
| 1.2. Нормативно-правова база контролю матеріалів і виробів з пластмас.. | 13 |
| 1.3. Основні види пластиків у пакуванні..... | 15 |
| 1.4. Шкідливі компоненти та домішки пластику | 18 |
| 1.5. Мікропластик у харчових продуктах як небезпечний фактор впливу на здоров'я | 23 |
| Висновки до розділу 1 | 25 |
| РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 28 |
| 2.1. Характеристика матеріалів дослідження | 28 |
| 2.2. Опис методики дослідження | 28 |
| Висновки до розділу 2..... | 32 |
| РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ПЛАСТИКУ У ПРОДУКТАХ ХАРЧУВАННЯ..... | 33 |
| 3.1. Методи збору, підготовки та аналізу проб..... | 33 |
| 3.2. Результати аналізів та їх гігієнічне значення | 36 |
| 3.3. Біотестування як оцінка впливу екстремальних умов зберігання..... | 37 |
| 3.4. Методи виявлення та ідентифікація Мікро- та Нанопластику..... | 37 |
| Висновки до розділу 3..... | 39 |
| РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ..... | 41 |
| 4.1. Аналіз фільтрів для Раманівського дослідження | 41 |
| Висновки до розділу 4..... | 45 |
| ВИСНОВКИ..... | 46 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 48 |

ВСТУП

Актуальність дослідження. В останні десятиліття відзначається стрімке зростання виробництва та використання полімерних матеріалів, зокрема у сфері пакування харчових продуктів і напоїв. За даними PlasticsEurope світове виробництво пластмас перевищило 400 млн тонн на рік, значна частина яких використовується у харчовій промисловості. Основною проблемою є міграція хімічних компонентів (мономерів, пластифікаторів, стабілізаторів, барвників) із полімерної тари у продукти харчування. Найбільш небезпечними вважаються фталати, бісфенол А (BPA), формальдегід, антимікробні домішки, які мають потенційний ендокриноруйнівний, канцерогенний та мутагенний ефекти. Актуальність проблеми зумовлена тим, що сучасна людина щодня контактує з пластиковим пакуванням (пляшки, контейнери, плівки), а систематичне надходження навіть малих доз цих речовин може становити ризик для здоров'я. Зростає кількість публікацій, що підтверджують зв'язок між міграцією компонентів пластику та порушенням репродуктивної функції, розвитком ожиріння, діабету, серцево-судинних хвороб.

Мета дослідження: оцінити вплив компонентів мікропластику, що мігрують у харчові продукти та напої, на стан здоров'я людини. Провести гігієнічне дослідження зразку цукру з торгівельної мережі України на наявність компонентів мікропластику.

Відповідно до поставленої мети було висунуто наступні **завдання**:

1. Провести аналіз сучасних наукових публікацій щодо досліджень впливу мікропластику на здоров'я людини.
2. Проаналізувати нормативну базу щодо використання полімерних матеріалів у харчовій промисловості (документи EFSA, FDA, WHO).
3. Вивчити методики дослідження рівнів міграції хімічних компонентів із пластикової тари у продукти харчування залежно від температури, кислотності та тривалості зберігання.

4. Проаналізувати зразок цукру, придбаний у роздрібній мережі на наявність компонентів мікропластику.
5. Сформулювати гігієнічні рекомендації щодо мінімізації шкідливого впливу компонентів мікропластику на здоров'я.

Об'єкт дослідження: мікропластик як чинник забруднення харчових продуктів і напоїв та пов'язані з ним ризики для здоров'я людини.

Предмет дослідження: міграція компонентів мікропластику (частинок і/або хімічних складників полімерів) у харчові продукти та напої, їх потенційний вплив на організм людини, а також наявність компонентів мікропластику у зразку цукру з торгівельної мережі України.

Практичне значення: отримані результати можуть бути використані для підготовки гігієнічних рекомендацій щодо зменшення надходження компонентів мікропластику з їжею та напоями; матеріали роботи придатні для інформування споживачів і закладів харчової галузі про фактори ризику (тара, умови зберігання, температура, кислотність); підхід/алгоритм аналізу може застосовуватися для скринінгових досліджень інших харчових продуктів у торговельній мережі.

Апробація результатів дослідження і публікацій. Основні матеріали і положення кваліфікаційної роботи представлені на VI Всеукраїнській науково–практичній конференції з міжнародною участю «YOUTH PHARMACY SCIENCE» 10–11 грудня 2025 р. За матеріалами роботи опубліковано тези доповідей.

Структура роботи: робота складається зі вступу, трьох розділів з підрозділами, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 48 сторінок. Опрацьовано 42 літературних джерела.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ГІГІЄНИЧНОЇ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТІВ ПЛАСТИКУ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ (огляд літератури)

1.1 Вплив мікропластику в харчових продуктах та напоях на здоров'я людини

Мікропластик (МП) — це синтетичні полімерні частинки діаметром менше ніж 5 мм, що утворюються внаслідок дезінтеграції більших пластикових виробів або навмисно виробляються у мікророзмірах. Упродовж останніх років значно зросла кількість досліджень щодо його наявності у довкіллі та харчових продуктах, а також можливих наслідків для здоров'я людини. Незважаючи на відсутність єдиних стандартів кількісного визначення МП, більшість робіт свідчать про його масове поширення у харчовому ланцюзі та потенційний ризик для організму людини [6, 7, 8, 14, 16, 18, 29].

До основних джерел надходження МП належать харчові продукти, напої та питна вода. Ряд досліджень підтверджує наявність мікропластику у морепродуктах, харчовій солі, цукрі, меді, м'ясо-молочній продукції, овочах і фруктах [1, 8, 12]. Особливе занепокоєння викликає міграція частинок із пластикового пакування та посуду, що посилюється під час нагрівання або тривалого зберігання харчових продуктів [16].

Напої також можуть бути значущим шляхом експозиції МП: фіксується його вміст у бутельованій воді, безалкогольних напоях, чаї та каві, особливо при використанні одноразової полімерної тари [14].

За даними EFSA (2020), частинки мікропластику найчастіше виявляють у морепродуктах, де вони накопичуються внаслідок фільтраційної здатності організмів [7]. Концентрації мікропластику у питній воді та напоях значно варіюють залежно від регіону та методики визначення, але тенденція демонструє постійне зростання рівня забруднення [14, 17].

Бутильована вода містить більше частинок, ніж водопровідна, що пояснюється можливим міграційним впливом пластикової тари. В чайних пакетиках та одноразових склянках також виявлені мікрочастинки поліпропілену і нейлону, які потрапляють у гарячі напої внаслідок температурної деградації пластику [9].

Частинки МП можуть здійснювати токсичний вплив через механічне подразнення слизової оболонки, індукцію оксидативного стресу та запальної відповіді. Малорозмірні частинки здатні проникати через кишковий бар'єр, потенційно потрапляючи у кровообіг і різні тканини [18].

На поверхні МП адсорбуються хімічні забрудники: важкі метали, фталати, бісфенол А, поліхлоровані біфеніли. При надходженні до організму такі комплекси можуть вивільняти токсичні речовини та виступати додатковими джерелами ендокринних дизрупторів [19, 15].

Експериментальні дослідження на тваринах показали, що пероральне надходження МП пов'язане зі зміною структури кишечника, порушенням мікробіоти, розвитком запалення та зміною метаболізму [15, 19, 10].

У 2020–2024 рр. з'явилися роботи, в яких мікропластик було виявлено у плаценті, крові та легеневій тканині людини, що підтверджує його системну біодоступність [14].

Однак доказова база щодо прямого впливу МП на здоров'я людей поки недостатня. ВООЗ (2022) та EFSA (2020) зазначають, що існує значний рівень наукової невизначеності щодо довгострокових ризиків, особливо у зв'язку із нанопластиком, для якого характерна висока біореактивність [8, 18].

За результатами EFSA, СOT (Велика Британія) та ВООЗ, проведення повноцінної кількісної оцінки ризику наразі неможливе через:

- нестандартизовані методики визначення МП;
- різномірність отриманих епідеміологічних даних;
- недостатність токсикокінетичної інформації;
- відсутність даних для оцінки дозо-ефектних залежностей [8, 17, 18].

Рекомендовано застосовувати принцип обережності: обмеження використання одноразового пластику; удосконалення технологій очищення питної води; жорсткіші вимоги до пакувальних матеріалів; проведення довготривалих когортних досліджень.

Мікропластик є розповсюдженим забруднювачем харчових продуктів та напоїв. Наявні дані підтверджують можливість його потрапляння в організм людини та певні токсичні механізми дії. Проте величина реальних ризиків для здоров'я людини лишається невизначеною через нестачу чітких кількісних показників експозиції й недостатність клінічних доказів. Наукова література наголошує на потребі стандартизації методик, удосконаленні систем моніторингу та проведенні масштабних епідеміологічних досліджень.



Рис. 1.1 Механізми токсичності мікропластику

Точність оцінки ризиків, пов'язаних з мікропластиком, значною мірою залежить від методів його ідентифікації та кількісного визначення. У науковій літературі описано кілька підходів, які відрізняються чутливістю, специфічністю та можливостями визначення частинок різних розмірів.

Найбільш поширеними є методи:

Фур'є-спектроскопія (FTIR) — дозволяє ідентифікувати полімерний склад частинок розміром від 20–50 мкм; широко використовується у моніторингових дослідженнях.

Раман-спектроскопія — забезпечує вищу роздільну здатність (до 1 мкм), проте є чутливою до флуоресценції матриці.

Піролізна газова хроматографія з мас-спектрометрією (Pyro-GC/MS) — використовується для визначення маси полімерів у складних матрицях, але не дає інформації про морфологію частинок.

Оптична та електронна мікроскопія дозволяють оцінити форму, розміри й кількість частинок, однак не дають точних даних щодо хімічного складу. Комбінування мікроскопії з FTIR або Раман-аналізом вважається «золотим стандартом» для деталізованого дослідження МП у продуктах харчування.

На сьогодні відсутні міжнародно затверджені стандарти щодо відбору проб, очищення матриць, калібрування та контролю забруднення. Це спричиняє значну варіабельність результатів навіть у межах одного типу харчового продукту. У зв'язку з цим EFSA та ВООЗ рекомендують проводити валідацію методик і створити узгоджені протоколи для міжлабораторних порівнянь [8].

Результати досліджень демонструють значну різницю у концентраціях МП у продуктах харчування. Це зумовлено низкою факторів:

Екологічні умови вирощування чи вилову. Морепродукти, виловлені у районах з інтенсивним судноплавством або високим рівнем антропогенного забруднення, містять на порядок більше частинок МП порівняно з продуктами з малозабруднених акваторій [2, 8, 9].

Технологічні процеси виробництва та переробки. Подрібнення, фільтрація і нагрівання можуть сприяти дезінтеграції пластикового обладнання чи пакування.

Тип пакувальних матеріалів. Поліетилентерефталат (ПЕТ), поліпропілен (PP), полістирол (PS) при нагріванні здатні вивільняти як мікропластик, так і хімічні добавки. Встановлено, що тепло (60–100°C) різко збільшує кількість вивільнених частинок.

Тривалість і умови зберігання продуктів. Довший контакт харчової продукції з пластиковим пакуванням (особливо під дією світла) призводить до збільшення кількості фрагментованих частинок полімерів.

Мікропластик розглядається не лише як фізичний агент, а й як транспортер токсичних речовин, що підсилює його потенційну небезпеку для людини. На поверхні МП можуть накопичуватися важкі метали (Pb, Cd, Hg), пестициди, поліхлоровані біфеніли (ПХБ), поліароматичні вуглеводні (ПАВ), фталати та бісфенол А. Дослідження *in vitro* показали, що такі комплекси здатні передавати адсорбовані токсиканти біологічним тканинам, посилюючи їх проникність і токсичність. Мікропластик у водному середовищі часто колонізується мікроорганізмами, зокрема патогенними штамами. Поняття «plastisphere» описує комплекс біоплівки, що формується на поверхні частинок. Існують дані, що пластисфера може переносити стійкі до антибіотиків бактерії та гени антибіотикорезистентності. Моніторингові дослідження у ЄС, США, Китаї, Японії та країнах Південно-Східної Азії показують значні відмінності у рівнях МП у харчових продуктах, зокрема країни ЄС демонструють вищу частоту виявлення МП у морепродуктах та бутильованій воді, але нижчі рівні у солі та овочах порівняно з країнами Азії [8, 9, 17].

Китай і Південна Корея мають найвищі зафіксовані концентрації МП у морепродуктах, що пов'язано з інтенсивним промисловим рибальством та високим рівнем забруднення акваторій. Дослідження, проведені у США показують середні рівні вмісту МП у водній продукції, але вищі концентрації у водопровідній воді порівняно з Європою. Глобальні тенденції свідчать про постійне збільшення кількості досліджень та удосконалення методів аналізу, що впливає на точність і порівнюваність результатів [8, 9, 17].

ЄС однією з перших країн світу ухвалив Директиву щодо обмеження одноразового пластику (2019/904) [21]; Регламент REACH щодо контролю хімічних речовин, де обговорюється включення полімерів до списку речовин, що викликають занепокоєння; вимоги до матеріалів, що контактують із харчовими продуктами (Regulation (EU) No 10/2011). Європейське агентство EFSA активно працює над розробкою стандартів для оцінки ризиків МП і НП у харчових продуктах [8]. Американське FDA наразі не має окремих нормативів щодо вмісту МП у харчових продуктах, проте проводить оцінку ризиків для пакувальних полімерів і контролює міграцію хімічних речовин із матеріалів, що контактують із харчовими продуктами. В Україні відсутні офіційні норми щодо допустимого рівня мікропластику у харчових продуктах. Проте імплементуються європейські директиви з безпечності харчових продуктів; діє Закон України «Про обмеження обігу пластикових пакетів» (2021); проводяться поодинокі наукові дослідження щодо оцінки вмісту МП у воді та харчових продуктах. Україна рухається у напрямку адаптації європейських підходів до контролю небезпечних факторів, включно з мікропластиком [27].

Попри значний прогрес у дослідженнях, наукова невизначеність залишається високою через відсутність стандартизованих методів збору та аналізу проб; складність визначення нанопластику (<1 мкм); обмежені клінічні дані; різномірність результатів досліджень з різних країн; недостатність токсикокінетичних моделей для людини. Саме тому EFSA (2020), WHO (2022) та FAO (2022) наголошують, що дані щодо впливу мікропластику на здоров'я людей є «попередніми» і потребують подальших багатоцентрових досліджень [8, 9, 17].

1.2 Нормативно-правова база контролю матеріалів і виробів з пластмас

У сучасних умовах забезпечення населення безпечними та якісними харчовими продуктами та напоями ключову роль відіграє чітка система

державного регулювання матеріалів і виробів, що контактують із харчовими продуктами. Нормативно-правова база встановлює вимоги до безпечності пластмасової тари та пакування, регламентує контроль за міграцією шкідливих речовин у продукти харчування, визначає права та обов'язки виробників і споживачів, а також гарантії для здоров'я населення.

Законодавчі акти, стандарти та накази профільних органів формують комплексну систему, спрямовану на охорону здоров'я людини та попередження можливих ризиків, що виникають через міграцію токсичних компонентів із пластику у їжу та напої. Ці документи є основою для ефективного функціонування харчових ланцюгів та забезпечення контролю безпечності продуктів на всіх етапах їхнього виробництва, зберігання та реалізації.

В межах регулювання безпечності харчових продуктів ключове значення має Закон України «Про безпечність та якість харчових продуктів», який визначає комплекс правових та організаційних заходів щодо гарантування населення доступу до безпечних продуктів харчування. Цей закон встановлює вимоги до складу матеріалів, що контактують із їжею, передбачає обов'язковий контроль за їх міграцією та регламентує права і обов'язки виробників та контролюючих органів [30].

Нормативні документи тісно пов'язані з гігієнічними стандартами, затвердженими ДСанПіН та ДСТУ, які деталізують показники безпечності продуктів щодо хімічних домішок, токсичних компонентів і небезпечних мікропластику. Зокрема, в них визначені допустимі концентрації бісфенолу-А, фталатів, олігомерів та інших шкідливих речовин, що можуть мігрувати з пластику в продукти харчування [31, 33].

Національний стандарт ДСТУ 7525:2014, містить перелік допустимих концентрацій шкідливих речовин у харчових продуктах та методи контролю їхнього вмісту, що забезпечує науково обґрунтований підхід до оцінки ризиків для здоров'я людини. Крім того, міжнародні стандарти та регламенти ЄС (EU 10/2011, EFSA Guidelines), встановлюють вимоги щодо допустимого

рівня міграції токсичних компонентів із пластику у продукти харчування, що дозволяє гармонізувати українські нормативи із загальноєвропейськими [23, 36].

Якість продуктів харчування в пластику визначається поєднанням хімічного складу, відсутністю токсичних домішок та фізико-хімічних показників безпечності. Це означає, що продукти не повинні містити шкідливих хімічних речовин у концентраціях, що перевищують допустимі норми, а їхнє споживання не має становити загрозу для здоров'я в короткостроковій чи довготривалій перспективі. Наприклад, допустима міграція бісфенолу-А із PET-пляшок у воду не повинна перевищувати 0,05 мг/кг, а фталатів — 0,1 мг/кг продукту [8, 17, 18].

Особливу увагу приділяють контролю мікропластику та нанопластику, що може утворюватися при нагріванні пластику, тривалому зберіганні продуктів або механічному зношуванні тари. Наукові дослідження показують, що у воді та напоях у пластиковій тарі можуть міститися десятки-тридцять тисяч частинок мікропластику на літр, а при використанні поліпропіленових чайних пакетиків — мільярди нанопластикових частинок.

В системі забезпечення безпечності харчових продуктів важливу роль відіграє державний контроль, який здійснюють Держпродспоживслужба та інші компетентні органи. Вони контролюють дотримання норм на всіх етапах — від виробництва пластику та пакувальної тари до реалізації продуктів. Виробники у свою чергу зобов'язані проводити внутрішній лабораторний контроль якості та міграції шкідливих компонентів, що забезпечує прозорість та своєчасне реагування на відхилення від норм [28].

У межах євроінтеграційного курсу Україна активно гармонізує свої стандарти з вимогами ЄС (наприклад, директива 2020/2184 щодо безпечності харчових продуктів і води для споживання людиною, що дозволяє підвищити ефективність системи контролю і інтегрувати її до загальноєвропейського простору моніторингу та регулювання [22].

Завдяки цій гармонізації українська система контролю безпеки продуктів стає більш відкритою, прозорою й здатною оперативно реагувати на сучасні ризики, включно з хімічним забрудненням та мікропластиком у харчових продуктах [22, 23].

Таким чином, гігієнічний контроль за продуктами та напоями у пластиковій тарі в Україні базується на комплексній системі нормативних документів, державних стандартів і санітарних правил, що забезпечує ефективний нагляд, регламентує лабораторний контроль і відповідальність виробників та контролюючих органів за безпеку продуктів для населення [22].

1.3 Основні види пластиків у пакуванні

Пакувальні пластикові матеріали відрізняються високою ефективністю в упаковці. Він міцний, довговічний, стійкий, а також надзвичайно легкий і дешевий у виробництві. Пластик настільки легкий, що є найбільш енергоефективним матеріалом для використання в упаковці. Більше можна відвантажити, використовуючи меншу кількість палива [8].

З цієї причини пакувальний пластик давно обігнав інші більш традиційні пакувальні матеріали, такі як скло, дерево, тканина, папір і метал. Наприклад, для транспортування десяти галонів рідини потрібно всього два фунти пластику в порівнянні з 40 фунтами скла або чотирма фунтами металу (алюмінію), щоб виконати ту ж роботу.

Нещодавнє європейське дослідження показує, що якщо ми замінимо пластик іншими матеріалами, то для доставки тієї ж кількості продукції буде споживатися на 57% більше енергії.

Поліетилентерефталат (PET) — це термопластичний поліестер, який отримують шляхом поліконденсації терефталевої кислоти (або її диметилового ефіру) з етиленгліколем. Завдяки своїм унікальним властивостям — високій міцності, хімічній стійкості, прозорості та бар'єрним характеристикам — цей полімер є одним з найбільш поширених

матеріалів для виробництва упаковки, зокрема пляшок для напоїв, контейнерів для харчових продуктів, плівки та волокон для текстильної промисловості. За оцінками Європейської комісії, більше 50% усього світового виробництва PET використовується для виготовлення харчової упаковки, що робить його одним із найчастіше контактуючих із продуктами матеріалів. Його хімічна інертність тривалий час вважалася гарантією безпеки для споживачів. Проте сучасні дослідження свідчать, що за певних умов з полімерної матриці можливий перехід низькомолекулярних сполук у харчові продукти [13].

Поліпропілен (PP) може існувати як гомополімер, випадковий сополімер або блоковий сополімер, кожен з яких має різні властивості та застосування: гомополімери жорсткі та стійкі до тепла та хімічних речовин, зазвичай використовуються в литтях під тиском, таких як автомобільні деталі та ковпачки, а також видувне формування, плівки, волокна, екструзія та термоформування. Випадкові сополімери більш гнучкі та прозорі з покращеними оптичними властивостями, що робить їх ідеальними для прозорої упаковки, товарів домашнього вжитку, тонкостінного лиття, плівок та канцелярських товарів. Блок-сополімери поєднують в собі міцність і простоту обробки завдяки поєднанню кристалічних і аморфних областей, що робить їх придатними для автомобільного та промислового застосування [36].

Полістирол є універсальним пластиком, який може бути жорстким або спіненим, проявляючи широкий спектр властивостей, заснованих на його структурному складі. Його отримують з мономеру стиролу, рідкого вуглеводню, який комерційно виробляється з нафти. У присутності каталізатора молекули стиролу з'єднуються між собою (полімеризуються) з утворенням полістиролу. Цей пластик буває трьох основних типів: полістирол загального призначення (GPPS), ударостійкий полістирол (HIPS) і пінополістирол (EPS). GPPS, також відомий як Crystal PS, — це твердий, прозорий пластик, який використовується, коли потрібна прозорість,

наприклад, у лабораторному посуді та упаковці харчових продуктів. HIPS — це міцніший непрозорий пластик, виготовлений шляхом додавання каучукового полібутадієну до полістиролу, який зазвичай використовується для корпусів приладів та іграшок. EPS - це легка ізоляційна піна, яка широко використовується в упаковці та ізоляції. Полістирол зазвичай має форму твердої речовини і часто транспортується у вигляді гранул або кульок, в мішках вагою від 25 кг до біг-бегів і сипучих контейнерів [1, 36].

Серед сучасних пакувальних матеріалів особливу увагу привертають біополімери, які розглядаються як екологічна альтернатива традиційним синтетичним пластикам. Найбільш поширеним серед них є полілактид (PLA) — термопластичний поліестер, що отримується шляхом полімеризації молочної кислоти, яка, у свою чергу, виробляється з відновлюваної сировини (кукурудзяний крохмаль, цукрова тростина тощо). Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям PLA є прозорим, досить міцним та легким у переробці матеріалом. Він вважається безпечним для контакту з харчовими продуктами та відноситься до біорозкладних полімерів, здатних розпадатися у промислових умовах компостування протягом кількох місяців. Важливо, що продукти його деградації — молочна кислота — є природними метаболітами людського організму, що мінімізує ризик токсичного впливу. Водночас цей матеріал має й обмеження: PLA нестійкий до підвищених температур (вище 55 °C) та має відносно низькі бар'єрні властивості щодо кисню й вологи, що обмежує його застосування для довготривалого зберігання продуктів [39].

Окрім PLA, у пакувальній індустрії застосовуються й інші біополімери. Зокрема, крохмальні полімери відзначаються дешевизною та легкістю утилізації, проте характеризуються високою гігроскопічністю і низькою механічною міцністю. Целюлозні матеріали мають добрі бар'єрні властивості, але для використання в харчовому пакуванні часто потребують додаткового покриття, яке захищає їх від вологи. Перспективним напрямом є застосування хітозану, який не лише є біорозкладним, але й має природні

антимікробні властивості, що дозволяє використовувати його для активного пакування продуктів харчування. До новітніх матеріалів належать полігідроксиалканоати (РНА) — біополімери мікробіального походження, які поєднують універсальність і повну біорозкладність. Проте їх широке використання обмежене високою собівартістю виробництва [9, 17, 40].

1.4 Шкідливі компоненти та домішки пластику

Бісфенол А (ВРА) — це органічна синтетична сполука, що є дифенольним похідним пропану. У промислових масштабах ВРА отримують шляхом конденсації двох еквівалентів фенолу з одним еквівалентом ацетону в присутності кислотного каталізатора. Саме через вихідні реагенти (бісфенол та ацетон-пропан) він і отримав свою назву. Основні сфери застосування: використовується для виготовлення пляшок для води, дитячих пляшечок, контейнерів для їжі, спортивного інвентарю, компакт-дисків та компонентів побутової техніки. Епоксидні смоли використовуються як внутрішнє покриття для консервних банок та металевих кришок, щоб запобігти контакту їжі з металом. Також застосовуються в стоматологічних герметиках та композитах. Термопапір використовується як проявник кольору в касових чеках, квитках та етикетках.

Основна небезпека ВРА полягає в його здатності діяти як ендокринний ксеноестроген: молекула ВРА структурно схожа на жіночий статевий гормон естрадіол. Завдяки цій схожості вона може зв'язуватися з естрогенними рецепторами в організмі ($ER\alpha$ та $ER\beta$), імітуючи або блокуючи дію природних гормонів. Це порушує гормональний баланс, який є критично важливим для репродуктивної, нервової та імунної систем. Дослідження показують, що ВРА може втручатися в роботу щитоподібної залози, порушуючи синтез і метаболізм тиреоїдних гормонів. Деякі дослідження вказують на те, що ВРА може блокувати рецептори чоловічих статевих гормонів (андрогенів), що негативно впливає на чоловіче репродуктивне здоров'я. Накопичувальний ефект пов'язаний з тим, що хоча період

напіввиведення ВРА з організму відносно короткий (близько 6 годин), постійне щоденне надходження з різних джерел створює квазі-стабільну концентрацію в організмі, що призводить до хронічного впливу [4, 20].

Наукові дослідження (переважно на тваринах, але також і епідеміологічні на людях) пов'язують хронічний вплив ВРА з низкою ризиків: у жінок: синдром полікістозних яєчників (СПКЯ), ендометріоз, безпліддя, передчасне статеве дозрівання. У чоловіків: зниження якості сперми, еректильна дисфункція. Вплив ВРА у пренатальний період асоціюють із ризиком розвитку синдрому дефіциту уваги та гіперактивності (СДУГ), тривожності та депресії у дітей. Через гормональну активність ВРА розглядається як фактор ризику для гормонозалежних видів раку, зокрема раку молочної залози та простати. Існують дані про зв'язок між рівнем ВРА в організмі та ризиком розвитку ожиріння, діабету 2-го типу та серцево-судинних захворювань [32].

Європейським агентством з безпеки харчових продуктів (EFSA) у 2023 році було встановлено нову допустиму добову дозу (TDI) на рівні 0.2 нанограма на кілограм маси тіла на добу, що приблизно у 20 000 разів нижче за попередню норму [8]. Це рішення базується на нових даних про негативний вплив ВРА на імунну систему. Така низька норма фактично означає необхідність повної відмови від його використання в матеріалах, що контактують з їжею [28]. Управління з санітарного нагляду за якістю харчових продуктів та медикаментів (FDA) дотримується позиції, що поточні рівні споживання ВРА є безпечними. Однак, ще у 2012 році FDA заборонило використання полікарбонату на основі ВРА у дитячих пляшечках та поїльниках. Штат Каліфорнія вніс ВРА до списку токсичних для репродуктивної системи речовин [3, 4].

У 2010 році Канада стала першою країною, яка офіційно визнала ВРА токсичною речовиною та заборонила його у дитячих пляшечках [4]. Українське законодавство у сфері безпеки матеріалів, що контактують з харчовими продуктами, переважно гармонізоване зі старими нормами ЄС.

Нові, значно суворіші вимоги EFSA, ймовірно, ще не імплементовані. Це означає, що товари, які вже не можуть продаватися в ЄС, можуть бути легально представлені на українському ринку [29].

Фталати — це група хімічних речовин, що є ефірами фталевої кислоти. Вони широко використовуються як пластифікатори, тобто добавки, які надають жорстким пластмасам, таким як полівінілхлорид (ПВХ), гнучкості, еластичності та довговічності. Найбільш поширеними та вивченими є:

- DEHP (Ді(2-етилгексил)фталат)
- DBP (Дибутилфталат)
- BBP (Бензилбутилфталат)

Ці сполуки не утворюють міцних хімічних зв'язків з полімерною матрицею, тому з часом вони легко вивільняються з продуктів у навколишнє середовище, потрапляючи в повітря, пил, їжу та воду [1].

Фталати цієї групи можна знайти у значному переліку товарів повсякденного вжитку:

- Вироби з ПВХ: Вінілові підлогові покриття, шпалери, натяжні стелі, штучна шкіра, медичні вироби (трубки для крапельниць, катетери, пакети для крові).
- Дитячі товари: Іграшки, дитячі килимки, нагрудники.
- Пакувальні матеріали: Харчова плівка, контейнери, ущільнювачі в кришках.
- Косметика та засоби особистої гігієни: DBP використовується у лаках для нігтів для запобігання розтріскуванню, а також як розчинники та фіксатори запаху в парфумах, лосьйонах та дезодорантах.
- Промисловість: Клеї, герметики, фарби, друкарські фарби [1].

Як і Бісфенол А, фталати є ендокринними руйнівниками, але їхній основний механізм дії відрізняється. Вони діють переважно як антиандрогени. Основний механізм їх дії полягає у пригніченні синтезу тестостерону — ключового чоловічого статевого гормону. Вони втручаються в роботу клітин Лейдіга в яєчках, які відповідають за виробництво цього гормону. Це порушення є особливо критичним під час внутрішньоутробного

розвитку плоду чоловічої статі, оскільки тестостерон відіграє вирішальну роль у формуванні чоловічих репродуктивних органів [26].

Вплив фталатів у цей критичний період розвитку може призвести до стану, відомого як "фталатний синдром", який характеризується комплексом аномалій чоловічої репродуктивної системи. Численні наукові дослідження пов'язують вплив фталатів з низкою негативних наслідків для здоров'я. У чоловікі вплив DEHP та DBP асоціюється зі зниженням якості сперми (зменшення кількості та рухливості сперматозоїдів), пошкодженням ДНК сперматозоїдів, зниженням рівня тестостерону та скороченням аногенітальної відстані у новонароджених хлопчиків (маркер пренатального антиандрогенного впливу). У жінок можливий зв'язок з ендометріозом, передчасними пологами та порушеннями фертильності [20].

Через доведену шкоду, використання фталатів суворо регулюється у багатьох країнах. Регламент REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) класифікує DEHP, DBP та BPP як "речовини, що викликають особливе занепокоєння". Їх використання суворо обмежене: концентрація в іграшках та товарах для догляду за дітьми не повинна перевищувати 0.1% від маси матеріалу [1, 6].

Закон про підвищення безпеки споживчих товарів США (CPSIA) від 2008 року на постійній основі заборонив використання DEHP, DBP та BPP у концентрації вище 0.1% в дитячих іграшках та певних товарах для догляду за дітьми [40]. Законодавство України гармонізоване з європейським. Технічний регламент безпечності іграшок (постанова КМУ №151 від 28.02.2018) встановлює аналогічні обмеження на вміст цих фталатів в іграшках на рівні не більше 0.1% [30].

Олігомери є низькомолекулярними сполуками, що займають проміжне положення між мономерами та повноцінними полімерами. Вони складаються з невеликої кількості (зазвичай від 2 до 10) мономерних ланок. У контексті матеріалів, що контактують з харчовими продуктами (FCM), олігомери класифікуються як ненавмисно додані речовини (NIAS), оскільки вони не є

цільовим компонентом кінцевого продукту, а радше його неминучим побічним продуктом. Утворення олігомерів у полімерній матриці відбувається двома основними шляхами: Побічний продукт синтезу. Під час процесу полімеризації не всі мономерні реагують до кінця, утворюючи довгі полімерні ланцюги. Частина з них формує короткі ланцюги (лінійні олігомери) або вступає в реакції циклізації, утворюючи циклічні олігомери. Це особливо характерно для поліконденсаційних полімерів, таких як ПЕТ та ПА. Високі температури під час переробки пластику (екструзія, лиття під тиском), а також вплив ультрафіолету чи хімічних речовин під час експлуатації можуть призводити до розриву довгих полімерних ланцюгів, утворюючи олігомери [41].

Олігомери поліетилентерефталату (ПЕТ) широко використовується для виготовлення пляшок для напоїв, контейнерів для салатів та плівок. Олігомери в ПЕТ є переважно циклічними ефірами терефталевої кислоти та етиленгліколю. Найбільш поширеним є циклічний тример ПЕТ. Їх загальний вміст у гранулах ПЕТ може сягати 1-3% від маси. Вони утворюються під час високотемпературного синтезу полімеру [41].

Олігомери Поліамідів (ПА) використовуються для виготовлення багат шарових пакувальних плівок (наприклад, для вакуумного пакування м'яса та сиру) та кухонного приладдя (лопатки, ополоники).

Ключова проблема з олігомерами полягає в їхній здатності мігрувати з пластикового пакування в їжу. На відміну від довгих полімерних ланцюгів, які є інертними та нерухомими, олігомери мають значно меншу молекулярну масу та більшу рухливість, що дозволяє їм дифундувати з матеріалу.

Нагрівання їжі в пластиковому контейнері або пастеризація продукту в упаковці є найпотужнішим фактором, що прискорює міграцію. Жирні продукти (олії, сири, м'ясо) та кислі продукти значно сильніше екстрагують олігомери, ніж сухі або водні. Чим довше продукт зберігається в упаковці, тим більша кількість речовин встигає мігрувати. Упаковки малого об'єму

мають гірше співвідношення, що може призводити до вищої концентрації мігрантів у продукті [42].

Дослідження *in vitro* показали, що деякі олігомери можуть викликати цитотоксичність або окислювальний стрес. Існує занепокоєння щодо їхньої можливої біоаккумуляції через ліпофільну природу. Хоча гостра токсичність олігомерів вважається низькою, ризики хронічного впливу низьких доз залишаються недостатньо вивченими.

Регулювання олігомерів є складним завданням, оскільки вони є частиною великої та змінної групи NIAS. Регламент (ЄС) № 10/2011 "Про пластмасові матеріали та вироби, призначені для контакту з харчовими продуктами" не встановлює специфічних лімітів міграції (SML) для більшості олігомерів [39]. Однак, застосовуються два основні принципи: Загальний ліміт міграції (OML): Сумарна кількість всіх нелетких речовин, що мігрують з пластику, не повинна перевищувати 60 мг/кг їжі. Олігомери роблять внесок у цей показник. Законодавство України поступово гармонізується з європейськими нормами. Проте, аналітичний контроль NIAS та олігомерів є складним процесом, що вимагає сучасного обладнання (наприклад, рідинної хроматографії з мас-спектрометрією) та відповідних методик [28, 39].

1.5 Мікропластик у харчових продуктах як небезпечний фактор впливу на здоров'я

Мікропластик — це дрібні частинки пластику розміром від 1 мкм до 5 мм, які утворюються внаслідок фізико-хімічної деградації більших пластикових виробів (пакети, пляшки, одноразовий посуд). Також джерелом можуть бути первинні мікрогранули, що використовуються у косметиці, мийних засобах та промисловості. До основних джерел мікропластику належать одноразовий пластиковий посуд і пакування, синтетичні тканини, з яких під час прання вивільняються полімерні волокна, автомобільні шини, що зношуються під час руху, а також косметичні засоби з мікрогранулами [6,

7, 8, 16, 17, 30]. Мікропластик потрапляє в харчові продукти й питну воду, накопичується у морепродуктах і навіть може бути складовою домашнього пилу. Відповідно, організм людини перебуває у постійному контакті з цим видом забруднення [1, 17, 32].

Шляхи надходження мікропластику в організм різноманітні. Найбільш поширеним є аліментарний шлях — разом із харчовими продуктами та водою. Значну роль відіграє також інгаляційний шлях, адже мікропластик присутній у повітрі, особливо у закритих приміщеннях із великою кількістю синтетичних матеріалів. Трансдермальний механізм — проникнення крізь шкіру під час контакту з косметикою чи одягом. У будь-якому разі, незалежно від шляху експозиції, мікропластик виявляється у внутрішніх органах і тканинах, що свідчить про його здатність до біоаккумуляції [16, 18].

Найбільшу небезпеку становлять не самі пластикові частинки, а хімічні сполуки, які входять до їхнього складу або адсорбуються на їх поверхні. До таких належать так звані ендокринно-руйнівні хімічні речовини серед яких найбільш відомі бісфенол А (BPA), фталати та нонілфенол. Вони здатні імітувати або блокувати дію природних гормонів, у тому числі статевих (естрогену, прогестерону, тестостерону), і таким чином порушувати ендокринний баланс організму [1, 2–5].

Порушення гормональної регуляції проявляється у вигляді проблем із фертильністю, збоїв у розвитку та зростанні, порушень метаболізму, а також підвищеного ризику розвитку злякисних новоутворень. Особливо вразливими до впливу мікропластику є вагітні жінки та діти, оскільки у ці періоди формуються органи та нервова система, а будь-які зовнішні впливи можуть мати довготривалі наслідки [14, 16, 18].

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, вплив ендокринних руйнівників, пов'язаних із мікропластиком, асоціюється з розвитком таких патологій, як крипторхізм у хлопчиків, безпліддя, розлади нервової системи, включаючи синдром дефіциту уваги з гіперактивністю, ожиріння, діабет 2-го типу, серцево-судинні захворювання та когнітивні

порушення. Крім того, встановлений зв'язок між впливом цих речовин та підвищеним ризиком розвитку раку щитоподібної та передміхурової залози, а також пухлин яєчка [16, 18].

Таким чином, мікропластик є не лише маркером глобального забруднення довкілля, а й суттєвим фактором ризику для громадського здоров'я. Сьогодні він розглядається як новий клас небезпечних агентів, що поєднують у собі механічну та хімічну токсичність. Усвідомлення масштабів цієї проблеми та її потенційних наслідків потребує подальших фундаментальних і прикладних досліджень, а також удосконалення нормативно-правових механізмів контролю за використанням та утилізацією пластикових виробів [21–23].

Висновки до розділу 1

У результаті огляду літератури встановлено, що мікро- та нанопластик є поширеними контамінантами харчових продуктів і напоїв, а ключовими шляхами надходження в організм людини виступають аліментарний та інгаляційний, причому вагомий внесок має міграція з пакувальних матеріалів, особливо за умов нагрівання та тривалого зберігання.

Показано, що потенційна небезпека мікропластику зумовлена не лише фізичним фактором (частинки як механічний подразник), а й хімічним — здатністю переносити та вивільняти токсиканти і добавки (фталати, бісфенол А, інші домішки), а також адсорбувати забрудники довкілля, що підсилює сумарний ризик для здоров'я.

Проаналізовано сучасні дані щодо механізмів токсичності, серед яких найбільш імовірними є індукція оксидативного стресу, запальної відповіді, порушення бар'єрної функції кишечника, вплив на мікробіоту та ендокринні ефекти. Водночас наголошено, що рівень доказовості для людини залишається обмеженим, а оцінка довгострокових наслідків ускладнена науковою невизначеністю.

Визначено, що однією з головних причин варіабельності результатів досліджень є відсутність уніфікованих міжнародних стандартів відбору проб, підготовки матриць, контролю вторинного забруднення та методик кількісного визначення мікро-/нанопластику. Найбільш інформативним підходом вважається комбінування мікроскопії з FTIR або Раман-спектроскопією; для оцінки маси полімерів у складних матрицях застосовується Руг-GC/MS.

Узагальнено, що нормативно-правове регулювання безпечності матеріалів, які контактують із харчовими продуктами, базується на контролі міграції хімічних речовин (у т.ч. ВРА, фталатів та NIAS), причому Україна поступово гармонізує вимоги з підходами ЄС, однак окремі питання (зокрема встановлення норм щодо мікропластику в їжі) залишаються недостатньо врегульованими.

Охарактеризовано основні види пакувальних пластиків (PET, PP, PS, біополімери) та показано, що ризик міграції компонентів залежить від типу полімеру, наявності добавок/домішок, технології виробництва та умов експлуатації (температура, світло, час контакту, тип харчової матриці).

Отже, теоретичний аналіз підтверджує актуальність гігієнічної оцінки мікропластику та хімічних компонентів пластику як потенційних факторів ризику для здоров'я людини й обґрунтовує необхідність стандартизації методик, посилення моніторингу та розвитку нормативної бази для отримання порівнюваних даних і коректної оцінки ризиків.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика матеріалів дослідження

Для виконання експериментальної частини було замовлено комплексне лабораторне дослідження на визначення вмісту мікропластикових частинок у зразку цукру. Білий кристалічний цукор було обрано як модельний харчовий продукт, оскільки він є одним із найбільш споживаних продуктів харчування в Україні та може бути потенційним джерелом мікропластику через забруднення під час виробництва, транспортування та пакування. Для дослідження вмісту мікропластику у цукрі було використано 5 г білого кристалічного цукру, придбаного у роздрібній торговій мережі АТБ. Отримані результати лабораторних вимірювань включали кількість виявлених полімерних частинок, їхній морфотип та спектроскопічну ідентифікацію. Аналіз проведено незалежним центром лабораторних досліджень «Еталон» м. Хмельницький. Центр акредитовано Національним агентством з акредитації України згідно з вимогами Міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій» (атестат акредитації № 20846, чинний до 09.03.2025) [25].

2.2 Опис методики дослідження

Зразок розчиняли у 500 мл гарячої дистильованої води до повного розчинення цукрових кристалів. Отриманий розчин одразу після приготування піддавали фільтрації через кремнієвий фільтр (Si-фільтр) з розміром пор 5 мкм, використовуючи стандартний лабораторний фільтраційний модуль HORIBA. На етапі фільтрування всі тверді мікрочастинки, що могли бути присутніми у початковому продукті, осідали на поверхні фільтра, забезпечуючи можливість їх подальшої детальної спектроскопічної ідентифікації.

Щоб мінімізувати вплив лабораторних похибок і виключити можливість контамінації сторонніми частинками під час підготовки проб, паралельно було підготовлено контрольні зразки. Для цього через аналогічні кремнієві фільтри фільтрували 500 мл гарячої дистильованої води без додавання цукру. Контрольні фільтрати давали змогу встановити, чи потрапляли до зразка будь-які сторонні частинки з повітря, обладнання або води.

Вибір кремнієвих фільтрів був зумовлений їхніми фізико-хімічними властивостями, що роблять їх оптимальними для раманівської спектроскопії. Кремнієві фільтри мають гладку, рівномірну поверхню, що значно полегшує автоматизоване виявлення частинок. Крім того, кремній проявляє мінімальний власний раманівський сигнал, який не перекривається з характерними піками основних полімерів (поліетилену, поліпропілену, полістиролу тощо). Це забезпечує високу точність ідентифікації частинок мікропластику навіть у зразках із низьким рівнем забруднення, до яких належить і харчовий цукор.

Раман спектроскопію частинок мікропластику здійснювали із використанням високоточного раманівського мікроскопа LabRAM Soleil™ (рис. 2.1), який забезпечує можливість одночасного морфологічного та хімічного аналізу частинок завдяки поєднанню мікроскопії та спектроскопії.



Рис. 2.1. Раманівський мікроскоп LabRAM Soleil™

Для автоматизованої сегментації частинок, збору спектрів, підрахунку та визначення їхніх морфометричних параметрів застосовували спеціалізований програмний модуль ParticleFinder™. Щоб покращити оптичний контраст полімерних частинок на Si-фільтрі, під час аналізу використовували темнопольне освітлення. Такий режим підсилює видимість дрібних частинок та покращує їхнє автоматизоване виявлення. Після локалізації частинок ParticleFinder автоматично формував карту їхнього розташування на фільтрі та ініціював запис раманівських спектрів за допомогою збуджувального лазера з довжиною хвилі 532 нм.

Аналіз проводився у «динамічному режимі», при якому мікроскоп автоматично повторював аналітичну послідовність для кожної ділянки фільтра, що охоплювала кілька полів зору. Це включало етапи:

1. отримання оптичних зображень поверхні фільтра;
2. автоматичну детекцію та сегментацію частинок;
3. збір раманівських спектрів для кожної частинки.

Застосування динамічного режиму є доцільним під час роботи з великими фільтрами, оскільки дозволяє уникнути механічного зміщення частинок і забезпечує високу точність позиціонування.

Ідентифікацію хімічного складу проводили за допомогою модуля IDFinder, який працює на основі порівняння отриманих спектрів із вбудованою спектральною бібліотекою. Для встановлення хімічної природи частинки обчислювали індекс відповідності HQI (Hit Quality Index), що ґрунтується на кореляції Пірсона між спектром зразка та еталонним спектром. Частинка вважалася достовірно ідентифікованою, якщо значення HQI було не нижче 60%, що відповідає прийнятним критеріям у міжнародних протоколах аналізу мікропластику. Спектральну бібліотеку було доповнено спектрами десяти найбільш поширених полімерів (табл. 3.1), серед яких поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), полістирол (PS), полівінілхлорид (PVC) та ін. Також до бібліотеки були включені типові неорганічні та органічні матеріали (целюлоза, аморфний вуглець, Si, CaCO₃, TiO₂), що дозволяло зменшити ризик помилкової ідентифікації та коректно відсіювати природні частинки.

Таблиця 2.1

Список полімерів, включених до базової спектральної бібліотеки для аналізу мікропластику

| Polymer | Abbreviation |
|----------------------------|---------------------|
| Polyethylene | PE |
| Polypropylene | PP |
| Polyethylene terephthalate | PET |
| Polycarbonate | PC |
| Polystyrene | PS |
| Polytetrafluoroethylene | PTFE |
| Polyvinyl chloride | PVC |

| Polymer | Abbreviation |
|-------------------------|---------------------|
| Polyamide | PA |
| Polymethyl methacrylate | PMMA |
| Polyurethane | PU |

Описана методика забезпечила надійний, відтворюваний та високоточний аналіз мікропластикових частинок, що дає змогу отримати достовірні дані щодо їхньої кількості, розмірів і хімічного складу.

Висновки до розділу 2

У розділі обґрунтовано вибір об'єкта та методів дослідження мікропластикових частинок у харчовому продукті. Білий кристалічний цукор визначено як репрезентативний продукт, що дозволяє оцінити потенційне забруднення мікропластиком, пов'язане з технологічними етапами виробництва, транспортування та пакування.

Встановлено, що застосування раманівської мікроскопії у поєднанні з автоматизованими програмними модулями є сучасним і високоточним підходом для одночасного морфологічного та хімічного аналізу мікропластику. Обрані критерії ідентифікації відповідають міжнародним рекомендаціям і забезпечують надійну диференціацію полімерних і неполімерних частинок.

Таким чином, описані матеріали та методи дослідження є науково обґрунтованими, відтворюваними та придатними для отримання достовірних даних щодо кількості, морфології та полімерного складу частинок мікропластику в харчових продуктах, що створює методичну основу для подальшого аналізу результатів і їх гігієнічної оцінки.

РОЗДІЛ 3

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ПЛАСТИКУ У ПРОДУКТАХ ХАРЧУВАННЯ

3.1 Методи збору, підготовки та аналізу проб

Підготовка зразків пакувальних матеріалів передбачає нарізку пакувальних матеріалів на стандартизовані фрагменти розміром 10x10 мм або визначення площі контакту 1 дм² (для міграційних тестів) [23, 38]. Поверхні матеріалів ретельно очищуються від пилу та сторонніх забруднень і за необхідності дезинфікуються 70% спиртовим розчином, після чого багаторазово промиваються дистильованою водою [25]. Для біотестування зразки витримуються у дистильованій воді для отримання водних витяжок (екстрактів) згідно з вимогами ДСТУ [22, 23].

На початку дослідження оцінюються органолептичні показники, такі як колір, запах, смак, прозорість і наявність осаду за стандартними методами для води та харчових продуктів [22, 36]. Оцінюють появу стороннього запаху та присмаку, у тому числі «пластикового», порівнюючи дослідні зразки з контролем. Це дозволяє виявляти наявність летких і напівлетких сполук, таких як ацетальдегід із PET [12, 40]. Фізико-хімічний аналіз: вимірювання рН (потенціометрично) та питомої електропровідності (кондуктометрично). Зростання провідності свідчить про міграцію іонних сполук (мономери, солі), а зміни рН — про вилучення кислих або лужних компонентів пластику [22, 37].

Наступний етап дослідження – визначення загальної міграції (ЗМ). Загальна міграція — це сумарна кількість нелетких речовин, що мігрують із пакувального матеріалу до харчового продукту. Визначення є обов'язковим первинним гігієнічним показником безпеки матеріалу [38]. ЗМ зазвичай визначається за стандартизованою методикою ДСТУ EN 1186 (комплекс стандартів), яка встановлює сумарну кількість нелетких речовин, що мігрують. Для моделювання міграційних процесів використовувалися

стандартизовані імітатори (симулянти), які покривають усі основні фізико-хімічні класи харчових продуктів (табл. 3.1). Це забезпечує надійність результатів та можливість їхнього порівняння з допустимою нормою 10 мг/дм² [23].

Таблиця 3.1

Стандартизовані імітатори (симулянти)

| Імітатор (Симулянт) | Концентрація/ Склад | Клас харчових продуктів, що моделюється | Мета використання |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---|
| Імітатор А | Дистильована вода | Водні та нейтральні продукти (рН > 4.5), напої. | Моделює міграцію полярних, водорозчинних компонентів. |
| Імітатор В | 3% розчин оцтової кислоти | Кислі продукти рН < 4.5, фруктові соки, маринади. | Моделює міграцію в умовах, де кислота каталізує вивільнення мономерів. |
| Імітатор С | 10% розчин етанолу | Спиртовмісні напої (пиво, слабоалкогольні). | Моделює міграцію компонентів, розчинність яких підвищується у присутності спирту. |
| Імітатор D | Ізооктан | Жирні та олійні продукти (олії, вершкове масло, сири). | Моделює міграцію неполярних, жиророзчинних компонентів (пластифікатори, антиоксиданти). |

Зразки пластику стандартизованої площі 1 дм² піддають експозиції з імітаторами за умов, що моделюють реальне використання: умови тривалого контакту: 10 днів при температурі 40 С° (для продуктів, що зберігаються при кімнатній температурі). Умови термічного впливу: 121 С° протягом 1 години (для консервованих продуктів). Після експозиції імітатор повністю випаровують. Сухий нелеткий залишок зважують на аналітичних вагах з точністю до 0.0001 г. Результат виражають у мг речовини, що мігрувала на дм² поверхні контакту (мг/дм²) [23, 38].

Визначення Специфічної Міграції (СМ). Специфічна міграція (СМ) — це кількісне визначення вмісту конкретної, токсикологічно значущої речовини (цільового аналіту) у мігранті [5, 38].

Визначення Бісфенолу А (ВРА). Для визначення вмісту Бісфенолу А (ВРА), основного мігранта з полікарбонатної (РС) тари, використовується високочутливий метод рідинної хроматографії-тандемної мас-спектрометрії (LC-MS/MS) [2–5]. Для концентрування ВРА зі значних об'ємів водних та слабокислих імітаторів застосовується твердофазна екстракція SPE. ВРА є полярною та термічно нестійкою сполукою. LC-MS/MS дозволяє розділяти та кількісно визначати ВРА у слідових концентраціях без нагрівання, що забезпечує найвищу чутливість та достовірність результатів відповідно до лімітів SML (Specific Migration Limit) [5, 38].

Визначення Фталатів (Пластифікаторів). Фталати (наприклад, DEHP, DBP) використовуються у виробництві пластиків (особливо PVC та деяких видів PP) як пластифікатори — речовини, що надають матеріалу гнучкості та еластичності. Вони легко мігрують у харчові продукти, особливо жиромісні [1, 6].

Основна мета використання GC-MS — точне кількісне визначення цих мігрантів, які негативно впливають на ендокринну систему людини, щоб порівняти їхню концентрацію з гігієнічними нормативами.

Фталати мають високу спорідненість до жирів, тому для їхнього вилучення з жирових імітаторів (наприклад, ізооктану) використовуються спеціалізовані техніки:

1. Рідинно-рідинна екстракція: Жировий імітатор змішується з органічним розчинником (наприклад, гексан), який витягує фталати, концентруючи їх.
2. Мікроекстракція на твердій фазі (SPME): Це більш сучасний, безрозчинниковий метод. Волокно, покрите адсорбентом, занурюється у витяжку, вибірково адсорбуючи фталати, які потім термічно десорбуються безпосередньо у GC.
3. Газова Хроматографія (GC): Екстракт вводиться у колонку, де фталати розділяються за температурою кипіння та полярністю. Кожен фталат (наприклад, DBP та DEHP) виходить з колонки у свій унікальний час (час утримування).
4. Мас-Спектрометрія (MS): Речовини, що вийшли, іонізуються та розбиваються на фрагменти. Спектр цих фрагментів є "молекулярним відбитком" фталату. Порівнюючи цей спектр із бібліотекою даних, ми точно ідентифікуємо наявність фталату [1, 5].

3.2 Результати аналізів та їх гігієнічне значення

В результаті проведених досліджень отримуємо якісний результат – підтвердження наявності конкретних фталатів (наприклад, DEHP, DBP) у витяжці. А також кількісний результат – точний вміст фталату, виражений у міліграмах на кілограм продукту (мг/кг) або на одиницю площі (мг/дм²). Цей кількісний результат має пряме гігієнічне значення:

Отриману концентрацію СМ фталату порівнюють із Лімітом Специфічної Міграції (SML), встановленим національними та європейськими нормативними актами. Перевищення SML свідчить про небезпеку для здоров'я споживача, оскільки фталати асоційовані з порушеннями

ендокринної та репродуктивної систем. Якщо СМ знаходиться в межах норми, матеріал вважається безпечним за цим показником [3, 16, 18].

3.3 Біотестування як оцінка впливу екстремальних умов зберігання

Для інтегральної оцінки зміни біологічних властивостей питної води внаслідок міграції компонентів із пакувальних матеріалів за екстремальних умов використовують метод фітотестування. Сутність методу полягає в пророщуванні насіння ячменю на воді, що пройшла експозицію на сонці та циклічне заморожування-танення [16, 34].

Як тест-середовище використовується питна водопровідна вода, яку піддають двом типам екстремального впливу з подальшим 2-тижневим зберіганням у звичайних умовах: термічний вплив (нагрівання): витримка під прямими сонячними променями $+50\text{ C}^{\circ}$ протягом 9 годин та кріотермічний вплив (заморожування-танення): вода піддається трьом циклам замороження -18 C° та подальшого танення. Вода для експозиції поміщається у два типи тари для порівняння: скляну (контроль міграції) та пластикову (дослід). Наступний етап полягає в пророщуванні насіння ячменю на підготовлених зразках води. На 4-у добу проростання здійснюють вимірювання довжини коренів та епикотилів (визначаючи середні значення ростових параметрів), а також відношення довжини коренів до довжини епикотилів: Цей показник використовувався для оцінки координації росту органів паростків, які є чутливими до токсичних речовин.

3.4 Методи виявлення та ідентифікація Мікро- та Нанопластику

Виявлення МП (частинок розміром 0.1 мкм до 5 мм) та НП (< 0.1 мкм) є критично важливим етапом гігієнічної оцінки продуктів, оскільки ці частинки можуть утворюватися внаслідок деградації пакувальних матеріалів і становити фізичну та хімічну загрозу для організму. Основна мета пробопідготовки — ізолювати полімерні частинки від органічної матриці

частини харчового продукту, яка може створювати перешкоди під час спектрального аналізу [7, 8, 16].

Початковим етапом є фільтрування рідких зразків або екстрактів. Проби пропускаються через мембранні фільтри (зазвичай виготовлені з анодованого алюмінію або золота, з розміром пор 0.2-0.45 мкм). Цей процес виконує подвійну функцію: збір та концентрування всіх частинок МП на поверхні фільтра. Вибір матеріалу фільтра є важливим, оскільки він сам не повинен створювати спектральних перешкод під час аналізу. Після фільтрування фільтрат піддається інтенсивній хімічній обробці, спрямованій на деструкцію органічної матриці (білків, жирів, целюлози). Для цього використовуються сильні окисники, такі як пероксид водню (H_2O_2), реагенти Фентона або концентровані луги (KOH) при підвищених температурах. Ця процедура є обов'язковою для запобігання інтерференції від органічних речовин під час спектрального аналізу та для полегшення доступу світла до полімерних частинок.

Завершальним етапом перед інструментальним аналізом є сушіння. Фільтри з ізольованими частинками МП висушуються в ексікаторі або у спеціальних умовах при низькій температурі. Це необхідно для повного видалення вологи, оскільки вода є потужним поглиначем в інфрачервоному діапазоні і створює значні перешкоди, які можуть спотворити або повністю замаскувати спектри полімерів. Для ідентифікації хімічної природи виділених частинок використовуються методи молекулярної спектроскопії з мікроскопією.

FTIR-мікроскопія (Фур'є-трансформаційна інфрачервона спектроскопія) є основним методом для якісної ідентифікації полімерної природи частинок розміром понад 10 мкм. Метод ґрунтується на реєстрації поглинання інфрачервоного випромінювання. Кожен полімер (наприклад, PET, PP, PE) має унікальний спектральний «відбиток пальця», що дозволяє ідентифікувати тип пластику шляхом порівняння отриманого спектра з бібліотеками даних.

Раман-мікроскопія використовується для додаткової верифікації результатів та аналізу ультрадрібних частинок (менше 10 мкм), включаючи нанопластик. Метод ґрунтується на явищі розсіювання лазерного світла (ефект Рамана). Раман-мікроскопія забезпечує високу просторову роздільну здатність і має перевагу завдяки слабкій чутливості до водної інтерференції. Це дозволяє розширити діапазон виявлення забруднення до нанорозміру, що є критичним для адекватної гігієнічної оцінки ризиків.

Після хімічної ідентифікації проводиться кількісний аналіз: визначається числова концентрація частинок (шт/л або шт/кг), здійснюється вимірювання їх розмірів та подальша класифікація за хімічним складом (наприклад, відсоткове співвідношення PET до PP). Вимірюється розмір кожної частинки та будуються діаграми розподілу за розмірними класами (> 100 мкм, 10-100 мкм, 1-10 мкм). Встановлюється відсоткове співвідношення виявлених типів полімерів (PET, PE, PP тощо) [7, 8, 16].

Висновки до розділу 3

У розділі систематизовано та обґрунтовано комплекс сучасних методів збору, підготовки та аналізу проб для гігієнічної оцінки безпечності пакувальних матеріалів і продуктів харчування. Встановлено, що коректна пробопідготовка, зокрема стандартизація площі контакту, вибір адекватних імітаторів харчових середовищ та дотримання нормативних умов експозиції, є ключовою передумовою достовірності отриманих результатів.

Встановлено, що визначення загальної міграції відповідно до вимог ДСТУ EN 1186 є базовим етапом оцінки безпечності пластикових матеріалів, оскільки дозволяє отримати інтегральну характеристику міграції нелетких речовин та порівняти її з гігієнічними нормативами. Водночас специфічна міграція токсикологічно значущих сполук, зокрема бісфенолу А та фталатів, потребує застосування високочутливих інструментальних методів, таких як LC-MS/MS та GC-MS, що забезпечують точну ідентифікацію та кількісне визначення мігрантів на рівні слідових концентрацій.

Продемонстровано, що результати специфічної міграції мають безпосереднє гігієнічне значення, оскільки їх порівняння з лімітами SML дозволяє об'єктивно оцінити потенційний ризик для здоров'я споживачів. Окремо обґрунтовано доцільність використання біотестування як інтегрального методу оцінки впливу екстремальних умов зберігання, що дає змогу виявляти сумарний біологічний ефект міграції компонентів пластику, який не завжди фіксується фізико-хімічними показниками.

Доведено, що виявлення та ідентифікація мікро- та нанопластику потребують багатоступеневої пробопідготовки та застосування сучасних спектроскопічних методів, зокрема FTIR- та Раман-мікроскопії, які дозволяють не лише ідентифікувати хімічну природу частинок, але й провести їх кількісну та розмірну характеристику.

Таким чином, використання комплексного підходу, що поєднує хімічні, фізико-хімічні, біологічні та спектроскопічні методи, є найбільш ефективним для повноцінної гігієнічної оцінки безпечності пластикової упаковки та її впливу на якість і безпеку харчових продуктів.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Аналіз фільтрів для Раманівського дослідження

Дані, отримані в результаті проведеного дослідження, підтверджують, що в аналізованому зразку присутні нерозчинні компоненти, які не можуть виникнути виключно в результаті лабораторного забруднення. Незважаючи на повну розчинність сахарози у воді, сторонні тверді домішки, включно з мікропластиковими частинками, органічними та мінеральними включеннями, зберігаються у фільтраті та осідають на поверхні фільтра.

На рис. 4.1 наведено оптичні мікроснімки кремнієвих фільтрів після фільтрації розчину зразка цукру та відповідних контрольних проб. Візуальний аналіз поверхні фільтрів свідчить про суттєву різницю між дослідним і контрольним зразками. На фільтрі, отриманому після фільтрації розчину цукру, спостерігається значно вища щільність частинок різної морфології порівняно з аналітичним бланком (контролем).

В ході аналізу не спостерігалось критичного перевантаження фільтрів, яке могло б ускладнити спектроскопічну ідентифікацію частинок через перекриття сигналів. Це свідчить про коректно підібрані умови пробопідготовки та адекватну концентрацію зразка для подальшого раманівського аналізу.

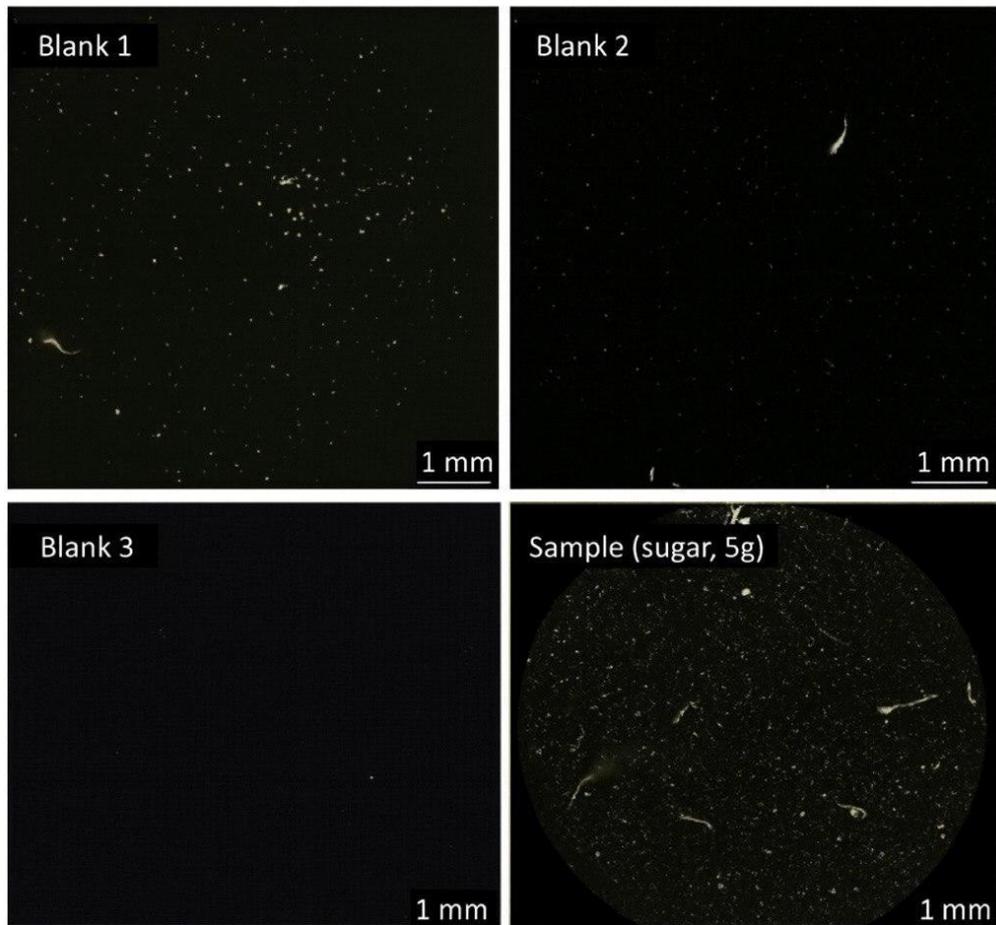


Рис. 4.1 Оптичні мікрознімки кремнієвих фільтрів

Узагальнені результати хімічної ідентифікації частинок, отримані методом раманівської спектроскопії, представлені на рис. 4.2(а). Для спрощення інтерпретації результатів усі частинки неpolімерної природи (целюлоза, білкові залишки, мінеральні частинки, жирні кислоти, аморфний вуглець) були об'єднані в узагальнену категорію «непластики».

Частинки, для яких індекс відповідності HQI був нижчим за порогове значення 60 %, віднесено до групи «аномальні». У цих випадках отримані спектри характеризувалися або інтенсивною флуоресценцією, що унеможлилювала коректну ідентифікацію, або домінуванням сигналів кремнієвої підкладки, або ж не відповідали спектральній бібліотеці полімерів.

Кількість полімерних частинок, виявлених у зразку цукру, суттєво перевищувала відповідні показники контрольних проб.

Це дозволяє зробити висновок, що присутність мікропластику у досліджуваному продукті є реальною характеристикою зразка, а не наслідком вторинної контамінації на етапах підготовки або аналізу.

Розподіл ідентифікованих мікропластикових частинок за еквівалентним діаметром наведено на рис. 4.2(б). Встановлено, що переважна більшість частинок має розміри менше 20 мкм, що є принципово важливим з точки зору гігієнічної оцінки ризиків.

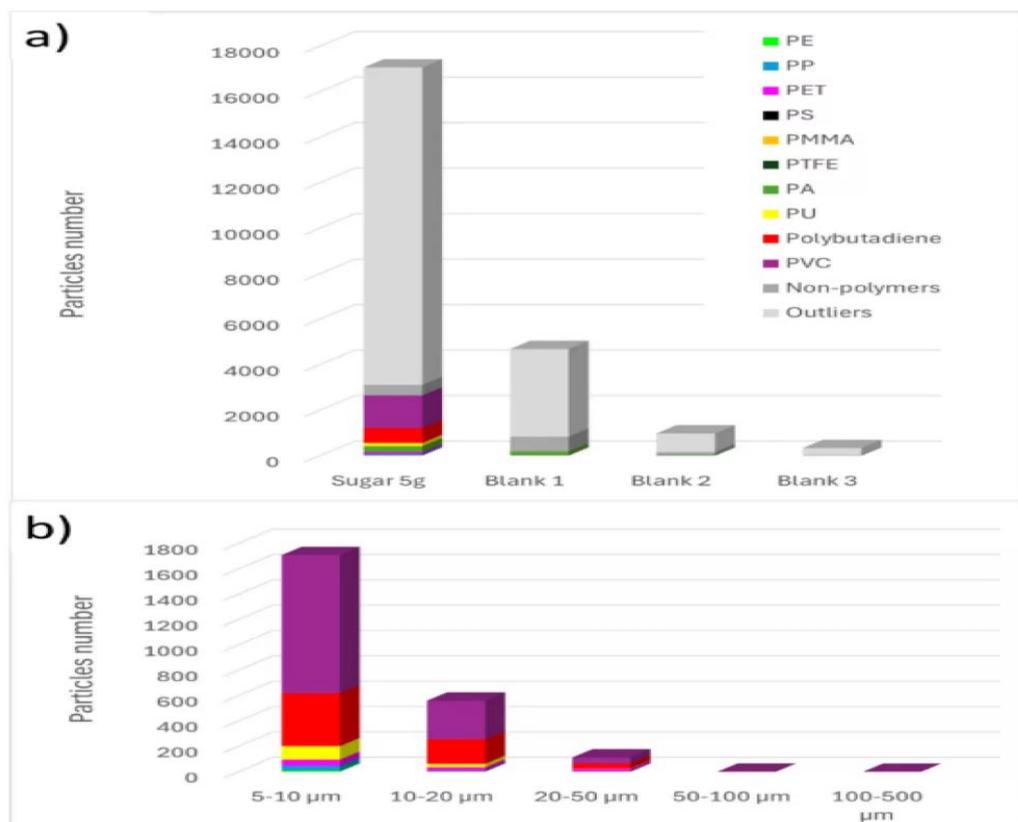


Рис. 4.2 Результати хімічної ідентифікації частинок

Частинки такого розміру перебувають нижче межі виявлення багатьох традиційних оптичних і FTIR-методів, межа чутливості яких зазвичай становить 20–50 мкм. Водночас саме дрібнодисперсні частинки характеризуються підвищеною біодоступністю, здатністю долати біологічні

бар'єри, проникати крізь клітинні мембрани та потенційно мігрувати до різних органів і тканин після потрапляння в організм.

Отримані результати підтверджують доцільність використання раманівської спектроскопії як одного з небагатьох методів, що дозволяють не лише виявляти, а й достовірно ідентифікувати мікропластик у субмікронному та дрібномікронному діапазоні.

З метою забезпечення статистичної достовірності результатів і відокремлення реального забруднення зразка від фонових лабораторного сигналу було проведено багаторазовий аналіз холостих проб. Лабораторією надано середні значення кількості частинок та стандартні відхилення для кожного полімеру, виявленого у контрольних зразках.

На основі цих даних для кожного полімеру було розраховано межу виявлення (LOD) за формулою:

LOD = середнє значення (бланки) + 3 × стандартне відхилення (контроль)

Межа виявлення (LOD) слугує статистичним порогом. Якщо кількість частинок, виявлена у зразку цукру, перевищує відповідний LOD, це означає, що присутність полімеру є статистично значущою і не може бути пояснена лише випадковим забрудненням під час аналізу.

Отримані значення LOD та кількість частинок, ідентифікованих у зразку цукру, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення LOD та кількість частинок, ідентифікованих у зразку цукру

| Polymer | LOD Particles number | Sugar Particles number |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Polyethylene | 2 | 14 |
| Polypropylene | 14 | 45 |
| Polyethylene terephthalate | 20 | 93 |
| Polystyrene | 4 | 2 |
| Polyamide | 289 | 262 |
| Polyvinyl chloride | 6 | 1442 |
| Polyurethane | 2 | 139 |
| Polytetrafluoroethylene | 1 | 1 |
| Polymethyl methacrylate | 1 | 0 |
| Polycarbonate | 1 | 0 |
| Polybutadiene | 2 | 651 |

Порівняння кількості ідентифікованих частинок із відповідними значеннями LOD свідчить про статистично значущу присутність у зразку цукру таких полімерів, як поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), полівінілхлорид (PVC), поліуретан (PU) та

полібутадієн. Найбільший внесок у загальну кількість мікропластику мали PVC, полібутадієн та PU, що може бути пов'язано з особливостями технологічного обладнання, пакувальних матеріалів або транспортної тари.

Окремої уваги заслуговує випадок поліаміду (PA). Хоча абсолютна кількість виявлених частинок PA у зразку була відносно високою, вона не перевищила відповідного значення LOD. Це свідчить про відсутність статистично значущої різниці між дослідним зразком і холостими пробами, а отже дозволяє припустити, що виявлений поліамід є наслідком фонового лабораторного забруднення, а не реальним контамінантом цукру.

Застосований підхід із розрахунком індивідуальних LOD для кожного полімеру забезпечив високий рівень наукової обґрунтованості результатів та дозволив уникнути хибнопозитивних висновків щодо наявності мікропластику у продукті.

Висновки до розділу 4

Проведене дослідження продемонструвало ефективність застосування Раманівської мікроспектроскопії для виявлення, ідентифікації та кількісного визначення мікропластику в харчових продуктах.

У зразку цукру ми підтвердили наявність кількох типів полімерів, включаючи полівінілхлорид (PVC), поліуретан (PU) та полібутадієн. Особливу увагу привертає той факт, що більшість виявлених частинок мала розмір менше 20 мкм. Виявлення фракції менше 20 мкм є особливо важливим, оскільки це узгоджується з рекомендаціями ВООЗ 2022 року щодо необхідності поглиблення вивчення даних про вплив на людину та розробки стандартизованих аналітичних методів для цієї критичної категорії розмірів.

Наші рекомендації ґрунтуються на запровадженні регулярного моніторингу сировинних матеріалів та виробничого середовища при виробництві продуктів харчування, що забезпечить найвищі стандарти якості та гігієнічної безпечності продукції.

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу сучасних наукових публікацій встановлено, що мікропластик є поширеним забруднювачем харчових продуктів і напоїв, а його надходження до організму людини відбувається переважно пероральним шляхом. За даними наукових досліджень, мікропластик може чинити потенційний негативний вплив на здоров'я людини, зокрема через механічну дію частинок та міграцію хімічних компонентів полімерів.

2. Аналіз нормативної бази EFSA, FDA та WHO показав, що питання безпеки полімерних матеріалів для контакту з харчовими продуктами регламентується, однак проблема мікропластику як окремого чинника ризику залишається недостатньо врегульованою та потребує подальших наукових досліджень і уточнення гігієнічних нормативів.

3. Встановлено, що рівень міграції хімічних компонентів із пластикової тари у харчові продукти залежить від температури, кислотності середовища та тривалості зберігання. Підвищені температури та тривалий контакт з упаковкою можуть сприяти збільшенню надходження компонентів мікропластику в їжу та напої.

4. Проведене гігієнічне дослідження зразка цукру, придбаного в торгівельній мережі України, дозволило оцінити можливу наявність компонентів мікропластику в продукті масового споживання, що підтверджує актуальність контролю харчових продуктів на даний вид забруднення.

5. На основі отриманих результатів сформульовано гігієнічні рекомендації, спрямовані на мінімізацію шкідливого впливу компонентів мікропластику на здоров'я людини, зокрема шляхом раціонального вибору пакувальних матеріалів, дотримання умов зберігання харчових продуктів та підвищення обізнаності споживачів.

6. Отримані результати свідчать про необхідність подальших комплексних досліджень мікропластику в харчових продуктах і напоях, а

також удосконалення гігієнічного контролю з метою зниження потенційних ризиків для здоров'я населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ:

1. EU REACH Annex XVII: Amendment of phthalate restriction published. December 2018 – Relevant for: electrical electronics, hardlines, softlines, toys children's products. *TÜV SÜD*. 2018. URL: <https://www.tuvsud.com/en-id/e-ssentials-newsletter/consumer-products-and-retail-essentials/e-ssentials-23-2018/eu-reach-annex-xvii-amendment-of-phthalate-restriction-published> (Date of access: 12.11.2025).
2. Barboza L. G. A., Dick Vethaak A. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Opinion in Food Science*. 2018. Vol. 22. P. 75–81.
3. Bisphenol A (BPA): Use in Food Contact Application. *U. S. Food Drug Administration*. 2014. URL: <https://www.fda.gov/food/food-packaging-other-substances-come-contact-food-information-consumers/bisphenol-bpa-use-food-contact-application> (Date of access: 12.11.2025).
4. Bisphenol A in Batch 2 of the Challenge. *Government of Canada*. 2021. URL: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/chemical-substances/challenge/batch-2/bisphenol-a.html> (Date of access: 12.11.2025).
5. Bisphenol A in food is a health risk. *EFSA*. 2023. URL: <https://www.efsa.europa.eu/en/news/bisphenol-food-health-risk> (Date of access: 10.11.2025).
6. Commission Regulation (EU) 2018/2005 of 17 December 2018 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), dibutyl phthalate (DBP), benzyl butyl phthalate (BBP) and diisobutyl phthalate (DIBP). *EUR-Lex*. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/2005/oj/eng> (Date of access: 12.11.2025).

7. Cox K. D., Covernton G. A., Davies H. L. Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science Technology*. 2019. Vol. 53. P. 7068–7074.
8. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Statement on the presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*. 2020. Vol. 18, № 6. P. 1–52.
9. Garrido Gamarro E., Costanzo V. Microplastics in food commodities: A food safety review on human exposure through dietary sources. Rome : FAO, 2022. 124 p. (Food Safety and Quality Series ; № 18).
10. Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea / L. M. Hernandez et al. *Environmental Science Technology*. 2019. Vol. 53, № 21. P. 12300–12310.
11. Microplastics exposure and gut microbiota: evidence from animal studies / L. Hou et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 428. P. 128216.
12. The presence of microplastics in commercial salts / A. Karami et al. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 46173.
13. Pet Market In Europe. State Of Play. Production, Collection Recycling Data 2022 / ICIS. 2022. URL: <https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2024/05/PET-Market-in-Europe-State-of-Play-2022-Data-V3.pdf> (Date of access: 12.11.2025).
14. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta / A. Ragusa et al. *Environ. Int.* 2021. Vol. 146. P. 106274. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106274.
15. Prüst M., Meijer J., Westerink R. H. S. The plastic brain: neurotoxicity of micro- and nanoplastics. *Part. Fibre Toxicol.* 2020. Vol. 17, № 1. P. 24.
16. Occurrence and health risk assessment of microplastics in beverages / A. Soudavari et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 23584. DOI: 10.1038/s41598-025-08821-6.

17. Potential human health impacts of microplastics: updated technical report / WHO. Geneva : WHO, 2022. 89 p.
18. Microplastics in drinking-water / World Health Organization. Geneva : WHO Press, 2019. 124 p.
19. Wright S. L., Kelly F. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 51. P. 6634–6647.
20. Чи варто непокоїтися через мікропластик? Що відомо про його вплив на людину. *Тексту.org.ua*. 2025. URL: <https://texty.org.ua/fragments/114418/chy-var-to-nepokoyitysya-cherez-mikroplastyk-sho-vidomo-pro-joho-vplyv-na-lyudynu/> (дата звернення: 12.11.2025).
21. Директива ЄС 2019/904 Європейського Парламенту та Ради про зменшення впливу окремих пластикових виробів на довкілля від 5 червня 2019 року. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj> (дата звернення: 12.11.2025).
22. Директива (ЄС) 2020/2184 Європейського Парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року від якості води, призначеної для вживання в їжу. 2020. URL: <https://acsb.org.ua/2022/12/22/директива-єс-2020-2184> (дата звернення: 12.11.2025).
23. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Офіц. вид. Вперше ; чинний від 01.02.2015. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 26 с. URL: http://iccwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf (дата звернення: 12.11.2025).
24. ДСТУ EN 1186-1:2022 (EN 1186-1:2002, IDT). Матеріали та вироби, що контактують із продуктами харчування. Пластмаси. Ч. 1. Посібник щодо вибору умов та методів випробувань для загальної міграції. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_1186-1_2022.pdf (дата звернення: 12.11.2025).
25. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій. Офіц. вид.

На заміну ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 (ISO/IEC 17025:2017, IDT) ; чинний від 01.01.2021. URL: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_iso_iec_17025_2019.pdf (дата звернення: 12.11.2025).

26. Забруднення мікропластиком: що це і чим загрожує здоров'ю. *Центр громадського здоров'я МОЗ України*. 2025. URL: <https://phc.org.ua/news/zabrudnennya-mikroplastikom-scho-ce-i-chim-zagrozhuє-zdorovyyu> (дата звернення: 12.11.2025).

27. Про технічні регламенти та оцінку відповідності : Закон України від 28 лют. 2018 р. № 151. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/151-2018-п#Text> (дата звернення: 12.11.2025).

28. Про матеріали і предмети, призначені для контакту з харчовими продуктами : Закон України від 03 листоп. 2022 р. № 2718–ІХ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2718-20#Text> (дата звернення: 15.11.2025).

29. Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України : Закон України від 01 черв. 2021 р. № 1489–ІХ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1489-20#Text> (дата звернення: 15.11.2025).

30. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України від 23 груд. 1997 р. № 771/97–ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр#Text> (дата звернення: 15.11.2025).

31. Мікропластик і його вплив на організм. *Онкологічна клініка «Інновація»*. 2025. URL: <https://innovacia.com.ua/media/shho-take-mikroplastik-vpliv-zdorov-ya-ta-profilaktika/> (дата звернення: 15.11.2025).

32. Ковальова А. Мікропластик у наших тілах: що наука вже знає і чого варто боятися. *The Page*. 2025. URL:

<https://thepage.ua/ua/news/mikroplastik-u-nashih-tilah-sho-nauka-vzhe-znaye-i-chogo-varto-boyatysya> (дата звернення: 12.11.2025).

33. Клопотенко Є. Науковці застерігають! У яких харчових продуктах міститься мікропластик та чому він небезпечний. *Klopotenko*. 2025. URL: <https://klopotenko.com/naukovczi-zasterigayut-u-yakuh-harchovyh-produktah-mistytsya-mikroplastyk-ta-chomu-vin-nebezpechnyj/> (дата звернення: 12.11.2025).

34. Мікропластик: невидимий ворог у нашому повсякденному житті. *Державна екологічна інспекція Південно-Західного округу* : офіційний веб-портал Державної екологічної інспекції України. 2025. URL: <https://sw.dei.gov.ua/post/4752> (дата звернення: 12.11.2025).

35. Мокієнко А. В. Актуальні водні проблеми. *Інноваційні водні технології* : монографія. Острог, 2024. 379 с.

36. ДСТУ 4518:2008. Продукти харчові. Маркування для споживачів. Загальні правила. Офіц. вид. На заміну ДСТУ–П 4518:2006 ; чинний від 4 серп. 2008 р. URL: https://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY1/dstu_4518-2008.pdf (дата звернення: 12.11.2025).

37. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» : Наказ МОЗ України від 12.05.2010 р. № 400. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 12.11.2025).

38. Проць Б. М., Василів О. Б. Мікропластики у питній воді. *Вода в харчовій промисловості* : зб. тез доповідей XII Всеукр. наук.-практ. конф. Одеса : Одеська національна академія харчових технологій, 2021. С. 122–126.

39. Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. *EUR-Lex*.

2011. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/10/oj/eng> (Date of access: 12.11.2025).

40. Павлюк С. К., Костенюк В. Ю., Суха І. В. Дослідження властивостей вторинного поліетилентерефталату. *Питання хімії та хімічної технології*. 2025. № 5. С. 154–159. DOI: 10.32434/0321-4095-2025-162-5-154-159.

41. Тарасюк Г. М., Чагайда А. О., Прилипко О. І. Дослідження міграції синтетичних речовин із пакувальних матеріалів у харчові продукти і воду: соціальний та управлінський аспекти. *Економіка управління та адміністрування*. 2024. № 2(108). С. 57–64. DOI: 10.26642/jep-2024-2(108)-57-64.

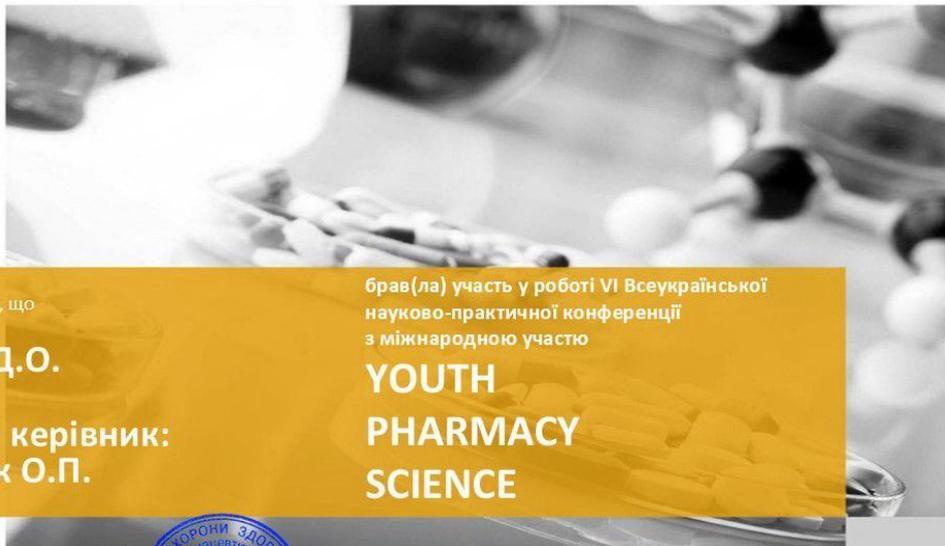
42. Чагайда А. О., Тарасов Г. М. Тенденції зростання у навколишньому середовищі мікропластику та його вплив на споживачів послуг індустрії гостинності. *Економіка, управління та адміністрування*. 2023. № 1(103). С. 76–87.

ДОДАТКИ



Міністерство
охорони здоров'я
України

Національний
фармацевтичний
університет



СЕРТИФІКАТ

Цим засвідчується, що

Куценко Д.О.

**Науковий керівник:
Матвійчук О.П.**

брав(ла) участь у роботі VI Всеукраїнської
науково-практичної конференції
з міжнародною участю

**YOUTH
PHARMACY
SCIENCE**

Ректор НФаУ,
д. фарм. н., проф.



Олександр КУХТЕНКО

10-11 грудня 2025 р.
м. Харків
Україна