

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Технічної механіки та сільськогосподарських машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка методу визначення вмісту мікропластику в ґрунтах
сільськогосподарського призначення з дослідженням заходів
його мінімізації

Виконав: студент 2 курсу, групи МГм-61
спеціальності 208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

	Бубняк Р.І. (підпис)	Бубняк Р.І. (прізвище та ініціали)
Керівник	Мартинюк В.В. (підпис)	Мартинюк В.В. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	Сташків М.Я. (підпис)	Сташків М.Я. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	Бабій А.В. (підпис)	Бабій А.В. (прізвище та ініціали)
Рецензент	Хорошун Р.В. (підпис)	Хорошун Р.В. (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Технічної механіки та сільськогосподарських машин

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Бубняку Ростиславу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка методу визначення вмісту мікропластику в ґрунтах
сільськогосподарського призначення з дослідженням заходів його мінімізації

Керівник роботи Мартинюк Вікторія Валентинівна, PhD.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-969

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи методика визначення вмісту мікропластику в антропогенно навантажених ґрунтах; аналіз отриманих результатів. Дослідження сучасних методів мінімізації мікропластикових забруднень у сільському господарстві, а саме зменшення розміру баків обприскувачів.

4. Зміст роботи. Реферат. Вступ. 1. Загально технічний розділ. 2 Аналітико-дослідницький розділ.

3. Проектно-рекомендаційний розділ. 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точних зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Мета, предмет, об'єкт, завдання. 2. Забруднення мікропластиком середовища.

3. Дослідження ґрунту 4. Виявлення мікропластику у досліджуваному середовищі

5. Залежність кількості мікропластику від площі контакту рідини. 6 Графік кількісного забруднення одиниці площі в залежності від ємностей баків.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Сенчишин В.С., к.т.н., доц. каф. МТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання

15 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін етапів виконання роботи	Примітка
1	Теоретико-методологічний етап Аналіз ступеня дослідження проблеми у світовій та вітчизняній літературі.	до 18.11.2025	
2	Аналітико-дослідницький розділ. Розробка методики та визначення мікропластику в ґрунтах. Аналіз отриманих результатів.	до 28.11.2025	
3	Проектно-рекомендаційний розділ. Визначення факторів, що впливають на забруднення ґрунтів мікропластиком. Розробка підходу зменшення викидів мікропластику.	до 08.12.2025	
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	до 10.12.2025	
5	Реферат. Вступ. Загальні висновки	до 10.12.2025	
6	Ілюстративний матеріал	до 10.12.2025	

Студент

(підпис)

Бубняк Р.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Мартинюк В. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Автор роботи – Бубняк Ростислав Іванович

Тема роботи – «Розробка методу визначення вмісту мікропластику в ґрунтах сільськогосподарського призначення з дослідженням заходів його мінімізації». Робота виконана на кафедрі технічної механіки та сільськогосподарських машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Керівник роботи – Мартинюк Вікторія Валентинівна, доктор філософії, старший викладач кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, переліку посилань (33 найменувань). Загальний обсяг текстової частини – 52 сторінки на яких є 11 рисунків.

Актуальність теми роботи. Мікропластик є одним із найпоширеніших нових забруднювачів довкілля, який потрапляє у ґрунтові екосистеми внаслідок руйнування полімерних матеріалів, використання агроплівки, добрив у полімерних оболонках, систем зрошення та через побутові відходи. У ґрунтах мікропластик накопичується, змінює їх фізико-хімічні властивості, впливає на мікробіоту та може потрапляти в рослинну продукцію, створюючи ризики для здоров'я людей.

Попри зростаючу увагу до цієї проблеми, уніфіковані методики визначення мікропластику в агроґрунтах відсутні, а існуючі підходи потребують адаптації до складної структури ґрунту. Це ускладнює отримання достовірних даних про масштаби забруднення. Тому розробка методики визначення мікропластику в ґрунтах сільськогосподарського призначення та дослідження шляхів його мінімізації є важливими для екологічної безпеки, збереження родючості й сталого розвитку агросфери.

Мета роботи: розробити методику визначення мікропластику в ґрунті та оцінити його кількісний вміст, а також дослідити заходи зменшення

надходження мікропластику в ґрунтове середовище шляхом удосконалення технологій обприскування та зменшення об'єму пластикових баків обприскувачів.

Об'єкт дослідження. Ґрунти сільськогосподарського призначення, та процеси надходження і накопичення мікропластику в агроєкосистемах.

Предмет дослідження: концентрація мікропластику в ґрунтах сільськогосподарського призначення та методи його мінімізації, зокрема через зменшення об'єму пластикових баків обприскувачів.

Методи дослідження: літературний аналіз, фізико-хімічні методи виділення мікропластику – фільтрування та очищення зразків від органічних та мінеральних домішок. Аналітичні методи визначення мікропластику – візуальна ідентифікація під мікроскопом. Статистична обробка даних. Аналітичні розрахунки вмісту пластику та забруднення поля.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методика визначення мікропластику дозволяє точно оцінювати рівень забруднення ґрунтів сільськогосподарського призначення, що є основою для подальших екологічних та агротехнічних досліджень.

Запропоновані практичні заходи з мінімізації мікропластику, зокрема зменшення об'єму пластикових баків обприскувачів, можуть бути впроваджені у фермерських господарствах для зниження забруднення ґрунтів.

Отримані результати можуть слугувати науковою та практичною основою для розробки нормативних документів і рекомендацій щодо управління пластиковими матеріалами в сільському господарстві.

Ключові слова: мікропластик, ґрунт, пластикові баки обприскувачів, агроєкосистема.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
I. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1. Огляд баків польових обприскувачів сільськогосподарських угідь	9
1.2. Конструкція та вимоги до великогабаритних баків польових обприскувачів	11
1.3. Характеристика великогабаритних причіпних обприскувачів та їх баків	12
1.4. Аналітичні аспекти вибору місткості бака	15
1.5. Огляд баків агродронів-обприскувачів	16
1.6. Класифікація баків агродронів-обприскувачів	17
1.7. Матеріали баків та утворення мікропластику	18
1.8. Порівняння агродронів-обприскувачів і наземних обприскувачів	20
1.9. Мікропластик як глобальна екологічна загроза	22
II АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	29
2.1. Методика дослідження та відбору ґрунту	29
2.2. Аналіз отриманих результатів	31
III ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	33
3.1. Аналіз обприскування сільськогосподарських культур пестицидами ...	33
3.2. Загальна кількість мікропластику при витратах робочої рідини	36
3.3. Інноваційний підхід до зменшення викидів мікропластику	38
IV ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	41
4.1. Загальні вимоги безпеки під час проведення досліджень	41
4.2. Екологічна безпека та поводження з відходами	43
4.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях	44
4.4. Заходи мінімізації впливу мікропластику в агроєкосистемах	45
ВИСНОВКИ	48
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	49
ДОДАТКИ	53

ВСТУП

Пластмаси – це сполуки, які з'явилися в середині ХХ століття й формуються з полімерів різного хімічного складу. Протягом останніх десятиліть вони стали невід'ємною частиною повсякденного життя. Пластикові матеріали, переважно отримані з вуглеводнів, характеризуються широким спектром властивостей – від жорсткості до гнучкості та еластичності, від малої ваги до високої механічної та хімічної міцності. Завдяки цьому пластмаси широко застосовуються в промисловості, будівництві, транспорті, медицині, електроніці та сільському господарстві.

У аграрному виробництві пластики використовуються для зберігання та транспортування продукції, поливу, пакування, а також у конструкціях обприскувачів. Водночас масштабне застосування пластикових матеріалів створює глобальну екологічну проблему – забруднення довкілля пластиком. Через стійкість до біологічного розкладу пластики накопичуються в екосистемах і поступово руйнуються на дрібні частинки – мікропластик (менше 5 мм), який може потрапляти у воду, ґрунт та живі організми.

Ґрунт є одним із основних резервуарів мікропластику, особливо в аграрних районах, де використовуються пластикові плівки, пакування, контейнери та баки обприскувачів. Під час експлуатації та очищення обприскувачів мікрочастинки пластику можуть потрапляти у ґрунт разом із залишками робочих розчинів або миючих засобів, а також внаслідок механічного зношування внутрішніх поверхонь баків. З часом ці частинки накопичуються, змінюють фізико-хімічні властивості ґрунту, впливають на його мікробіоту та можуть через харчові ланцюги надходити до організму людини.

У зв'язку з цим особливо важливими є дослідження, спрямовані на визначення вмісту мікропластику в ґрунтах і розробку заходів його мінімізації, зокрема через вдосконалення конструкції та експлуатації пластикових баків

обприскувачів, а саме зменшення їхнього об'єму, використання альтернативних матеріалів або впровадження багаторазових екологічно безпечних рішень може суттєво знизити рівень пластикового забруднення в сільському господарстві та сприяти формуванню більш сталих технологій виробництва.

Розроблена методика дозволяє оцінювати рівень забруднення ґрунтів сільськогосподарського призначення пластиком, що є основою для подальших екологічних та агротехнічних досліджень.

Запропоновані практичні заходи з мінімізації мікропластику, зокрема зменшення об'єму та використання пластикових баків обприскувачів, можуть бути впроваджені у фермерських господарствах для зниження забруднення ґрунтів.

Отримані результати можуть бути використані як науково-практичне підґрунтя для створення нормативних актів і рекомендацій з управління пластиковими матеріалами у сфері сільського господарства.

Апробація. Окремі результати роботи доповідались VIII Міжнародній студентській конференції «Природничі та гуманітарні науки», Тернопіль, 24-25 квітня 2025 року.

Студенська науково-дослідна робота. Методологія визначення мікропластику в ґрунті та стратегії його мінімізації. Центральнуукраїнський національний технічний університет. Кропивницький. 2025.

I. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Огляд баків польових обприскувачів сільськогосподарських угідь

Функціональне призначення баків для польових обприскувачів. Сучасні технології захисту рослин вимагають застосування високопродуктивної техніки, здатної забезпечити точне та рівномірне внесення засобів захисту рослин (ЗЗР) на великих площах. Центральне місце у цьому комплексі посідають великогабаритні польові обприскувачі – причіпні та самохідні машини з великими баками, широкими штангами та розвиненими системами автоматизації. Від конструкції обприскувача, типу та параметрів його бака залежить ефективність технологічного процесу, рівень витрат ЗЗР, екологічна безпека й економічні показники господарства. [6;7;8]

Збільшення площ сільськогосподарських угідь у користуванні окремих господарств, а також зростання вимог до оперативності та якості виконання робіт зумовили появу обприскувачів із баками місткістю від 3000-4000 до 8000-12000 л, штангою шириною 24-48 м, високопродуктивними насосами й системами точного дозування. Водночас посилюються вимоги до конструкції баків: вони мають бути хімічно стійкими, механічно міцними, ергономічними щодо заправки, промивання та обслуговування, а також забезпечувати мінімальні залишки робочого розчину після спорожнення.

Великогабаритні польові обприскувачі з великими баками та широкими штангами є ключовим елементом інтенсифікованих технологій захисту рослин у середніх і великих сільськогосподарських підприємствах. [6;8]

Конструкція бака обприскувача визначає не лише місткість машини, а й зручність її експлуатації, рівень залишків робочого розчину, ефективність

промивання та екологічну безпеку. Сучасні баки виконуються переважно з поліетилену, склопластику або нержавіючої сталі з урахуванням вимог хімічної стійкості та механічної міцності. [9]

Українські виробники пропонують широкий спектр причіпних обприскувачів із баками об'ємом 2000-4000 л, які відповідають потребам більшості фермерських господарств і відзначаються доступністю та ремонтпридатністю.

Європейські компанії (AMAZONE, KUHN, BERTHOUD) та світові виробники самохідних обприскувачів (John Deere, Lite-Trac, DAMMANN) задають високі стандарти місткості баків, рівня автоматизації та точності внесення ЗЗР, що може бути орієнтиром для подальшої модернізації вітчизняної техніки. [9]

Отже, раціональний вибір обприскувача та місткості його бака є важливим етапом планування технологічних операцій у рослинництві. Для того щоб техніка працювала ефективно та економічно, необхідно враховувати площу й конфігурацію полів, особливості сівозміни та заплановані технологічні операції. Не менш важливими є умови логістики – доступність джерел води, можливість швидкого підвозу робочого розчину та забезпечення засобами захисту рослин. Вибір техніки також залежить від фінансових можливостей господарства, вартості обслуговування та наявності сервісних центрів. Збалансоване врахування цих факторів дозволяє підібрати обприскувач, який забезпечить високу продуктивність, мінімізує витрати та сприятиме підвищенню ефективності рослинницького виробництва.

1.2. Конструкція та вимоги до великогабаритних баків польових обприскувачів

Бак обприскувача є ключовим елементом рідинної системи. Сучасні виробники переважно застосовують три основні групи матеріалів: поліетилен, склопластик та нержавіючу сталь. Поліетиленові баки відзначаються малою масою, стійкістю до більшості пестицидів, простотою формування складних геометричних форм та високою ударостійкістю. Склопластикові резервуари мають гладку внутрішню поверхню та добру хімічну стійкість, однак складніші в ремонті. Нержавіючі сталеві баки використовуються переважно у самохідних обприскувачах преміум-класу та забезпечують максимальну механічну міцність і довговічність, але мають більшу масу та вищу вартість. [7]

Вибір матеріалу бака впливає не лише на довговічність машини, а й на її масу, розподіл навантаження по осях та поведінку обприскувача на полі. Для самохідних обприскувачів із баком 6000–8000 л оптимальною є комбінація легкого шасі, продуманої компоновки агрегатів та бака з низьким центром мас.

Номінальний об'єм бака визначається вимогами до продуктивності машини, інтенсивністю робіт та можливостями логістики води й робочого розчину. Для причіпних обприскувачів поширені об'єми 3000-4000, 5000-6000 та 7000–8000 л. Самохідні машини середнього класу мають баки 4500-5000 л, високопродуктивні – до 8000-12000 л при використанні спеціалізованих шасі.

Геометрія бака повинна забезпечувати мінімальний залишок робочого розчину після спорожнення, відсутність «мертвих» зон та ефективну роботу індукційних пристроїв і внутрішніх мішалок. Внутрішні перегородки виконують подвійну функцію: запобігають різким переміщенням маси рідини під час руху та сприяють організації потоків під час перемішування. Сучасні баки оснащуються внутрішніми інжекторними мішалками, які забезпечують однорідність розчину навіть при низьких рівнях заповнення. [2;8]

1.3. Характеристика великогабаритних причіпних обприскувачів та їх баків

В Україні функціонує кілька вітчизняних виробників польових обприскувачів, серед яких провідні позиції займає ПрАТ «Богуславська сільгосптехніка», а також низка компаній, що виготовляють причіпні машини з баками місткістю 2000-4000 л і більше. На ринку також присутні причіпні обприскувачі серій Spray Expert, Spray Master та інші моделі, які орієнтовані на фермерські та середні за розміром господарства. [1]

Причіпний обприскувач серії ОР (TITAN 3000-24) (рис. 1.1) українського виробництва оснащується основним баком місткістю 3000 л та штангою шириною 24 м.



Рисунок 1.1 – Причіпний обприскувач українського виробництва з баком 3000 л (серія ОР/TITAN 3000-24). [33]

Така конфігурація дозволяє ефективно обробляти значні площі за один заїзд, мінімізуючи кількість дозправок. Конструкція шасі та розташування бака забезпечують необхідну стійкість машини на полі, а геометрія резервуара – повне спорожнення робочого розчину. [2;30]

До групи українських причіпних обприскувачів належать також моделі Spray Flagman-3000-28 з баком 3000 л і штангою 28 м, а також обприскувачі Spray Expert і Spray Master (рис. 1.2), що виготовляються для різних регіонів України. Їх бакові системи спроектовані з урахуванням роботи у складних

польових умовах, мають посилену раму, оптимізовану форму резервуара для зменшення залишків робочого розчину та інтегровані баки для промивання.



Рисунок 1.2 – Причіпний обприскувач
Spray Flagman-3000-28 із штангою 28 м. [33]

Лінійка причіпних обприскувачів AMAZONE UX 01 Super та UX Super (рис. 1.3) представлена моделями з місткістю баків 4200, 5200, 6200, 7600, 8600 і понад 11000 л залежно від модифікації. Штанги Super-L2 і Super-L3 забезпечують ширину захвату від 21 до 48 м, що дозволяє комбінувати великі об'єми бака з високою продуктивністю. Баки виготовляються з високоміцного поліетилену, мають обтічну форму, внутрішні перегородки та інжекторні мішалки. [33]



Рисунок 1.3 – Причіпний обприскувач AMAZONE UX 01 Super з баком 5200 л. [33]

Причіпні обприскувачі KUNN METRIS 2 (рис. 1.4) оснащуються баками місткістю 3200 або 4100 л та штангами шириною 18-38 м. Старша серія OCEANIS має резервуари об'ємом до 7700 л і штанги до 48 м. Конструкція баків передбачає чотирирівневу систему фільтрації розчину, прозорі елементи для контролю забрудненості фільтрів, а також інтегровані системи перемішування й промивання. Такі рішення спрямовані на підвищення точності дозування та зменшення ризику засмічення форсунок. [9;33]



Рисунок 1.4 – Причіпний обприскувач KUHN METRIS 2
з баком 4100 л. [33]

1.4. Аналітичні аспекти вибору місткості бака

Вибір місткості бака обприскувача є компромісом між продуктивністю, навантаженням на ґрунт, маневровістю та вартістю машини. Зі збільшенням об'єму бака зменшується кількість необхідних дозаправок і простоїв, проте зростає маса агрегату, збільшується радіус розвороту, підвищується ризик ущільнення ґрунту, а також ускладнюються транспортні операції.

У спрощеному вигляді теоретична продуктивність польових робіт Q , га/год, може бути оцінена за формулою:

$$Q = (B \cdot v \cdot \eta) / 10,$$

де B – робоча ширина штанги, м;

v – швидкість руху, км/год;

η – коефіцієнт використання часу зміни (0,6-0,8).

При збільшенні об'єму бака коефіцієнт η зростає за рахунок скорочення непродуктивних простоїв на дозаправку, однак надмірне збільшення маси машини може знижувати середню робочу швидкість та погіршувати умови роботи. [8;9]

Для господарств із площею до 200-300 га доцільно застосовувати причіпні обприскувачі з баком 3000-4000 л та штангою 18-24 м. Такі машини достатньо продуктивні та не потребують надпотужних тракторів.

Для середніх і великих фермерських господарств (300-1000 га) оптимальними є причіпні обприскувачі з баками 5000-6000 л і штангами 24-36 м, що забезпечують високу продуктивність при збереженні прийнятної маневровості.

Для великих агрохолдингів із великими масивами орних земель (понад 1000-2000 га) доцільно розглядати самохідні обприскувачі з баками 5000-8000 л і штангами 36-48 м, які забезпечують максимальну інтенсивність обробки з мінімальними простоями. [8]

При виборі конкретної моделі слід враховувати доступність сервісної мережі, вартість запасних частин, рівень автоматизації системи внесення, наявність GPS-навігації, секційного відключення форсунок, а також конструкцію та матеріал баків, зручність їх очищення та промивання.

1.5. Огляд баків агродронів-обприскувачів

За останнє десятиріччя агродрони-обприскувачі перейшли зі стадії експериментальної техніки у категорію повноцінних робочих машин, що широко застосовуються у рослинництві. Вони використовуються для внесення засобів захисту рослин, рідких мінеральних добрив, мікроелементів та біопрепаратів на посівах польових культур, в садах і виноградниках, на рисових

чеках, а також на важкодоступних, гірських або заболочених ділянках. Ключова конструктивна відмінність агродронів від традиційних наземних обприскувачів полягає у поєднанні літальної платформи та компактного, але технологічно досконалого баку робочого розчину. [7;29]

Об'єм баків агродронів є на порядок меншим, ніж у причіпних чи самохідних наземних обприскувачів, проте компенсується високою маневровістю, відсутністю залежності від рельєфу, можливістю роботи відразу кількох дронів у «рої» та широким використанням цифрових технологій: GPS/RTK-навігації, автоматичного планування маршрутів, змінної норми внесення (VRA) та хмарних платформ обліку. Це змінює підхід до організації процесу обприскування, структури логістики робочого розчину та вимог до матеріалів баків, які працюють у значно більш динамічному режимі, ніж баки наземних машин.

1.6. Класифікація баків агродронів-обприскувачів

За місткістю баків агродрони-обприскувачі умовно поділяють на три класи. До малих належать апарати з об'ємом бака 10-20 л, які переважно використовуються на невеликих полях, у фермерських господарствах, для локальної обробки вогнищ шкідників або бур'янів, а також у науково-дослідних установах. Середній клас (20-40 л) є найпоширенішим: саме такі платформи забезпечують прийнятний компроміс між продуктивністю, масою апарата та спрощеними вимогами до наземної інфраструктури. До великого класу відносять дрони з баками 40-70 л і більше, орієнтовані на роботу на значних площах, часто – у складі флоту з декількох апаратів. [7;29]

Типовими представниками середнього класу є агродрони DJI Agras T30 та T40 з баком 30 і 40 л відповідно, а також XAG P100 із «розумним» баком на

40 л. До великого класу належать XAG P150 із баком 70 л та окремі моделі інших виробників з об'ємами до 70-90 л. Для практики рослинництва саме діапазон 30-40 л сьогодні вважається «золотою серединою», що забезпечує високу продуктивність при відносно невеликій масі апарата.

Переважає більшість баків агродронів виготовляється з високощільного поліетилену із додаванням ультрафіолетових стабілізаторів та модифікаторів ударної в'язкості. Такий матеріал дозволяє отримати легку, ударостійку та хімічно стійку ємність складної форми. У деяких моделях застосовуються композиційні матеріали на основі армованих полімерів, що забезпечують підвищену жорсткість тонкостінних конструкцій. Товщина стінок баків, як правило, невелика, оскільки робочий надлишковий тиск невисокий, а масова інерція при зльоті та посадці має вирішальне значення. [7;25]

До основних експлуатаційних вимог належать: стійкість до широкого спектра ЗЗР і рідких добрив, збереження механічних властивостей при багаторазових циклах заповнення/спорожнення, відсутність тріщиноутворення під впливом коливальних навантажень, а також стабільність геометрії в інтервалі робочих температур. Водночас саме полімерний характер матеріалу баків створює потенційну загрозу вивільнення мікропластикових частинок у разі інтенсивного зносу внутрішньої поверхні.

1.7. Матеріали баків та утворення мікропластику

З погляду екологічної безпеки полімерні баки агродронів розглядаються як потенційне джерело мікропластикового забруднення агроландшафтів. Механізми вивільнення мікропластичних частинок включають абразивний знос внутрішньої поверхні під дією турбулентних потоків, твердих включень у робочому розчині, кавітаційних явищ у зоні роботи насоса, а також

термомеханічну деградацію полімеру під дією ультрафіолетового випромінювання й коливальних навантажень. Хоча площа внутрішньої поверхні баків агродронів є відносно невеликою, кількість циклів заповнення/спорожнення протягом сезону може бути дуже високою. [7;30]

Кількісно умовний потенціал вивільнення мікропластику з поверхні бака можна описати спрощеною залежністю:

$$m_{\text{мк}} = k \cdot A \cdot N,$$

де $m_{\text{мк}}$ – маса мікропластика, що відокремилася за період експлуатації;

A – площа внутрішньої поверхні бака;

N – кількість робочих циклів (заповнення–спорожнення);

k – коефіцієнт інтенсивності зносу, що залежить від матеріалу полімеру, режимів течії, типів препаратів, температурного та ультрафіолетового навантаження.

До ключових факторів, які визначають інтенсивність утворення мікропластику в баках агродронів, належать:

- гранулометричний склад і чистота робочого розчину (наявність піску, нерозчинених частинок);
- тип і концентрація ЗЗР, їх агресивність відносно полімеру;
- гідродинамічний режим течії (швидкість потоку, наявність кавітаційних зон у насосі та патрубках);
- температура експлуатації та інтенсивність ультрафіолетового опромінення корпусу і бака;
- режим мийки (тиск, використання миючих засобів, механічні дії при очистці).

Особливої уваги потребує експлуатація баків з агресивними препаратами та у регіонах із високою інсоляцією, де старіння полімеру пришвидшується. Регламентована періодична перевірка стану внутрішньої поверхні баків, а також регулярна заміна фільтрів і дотримання технологічних карт

приготування робочих розчинів є важливим елементом зменшення мікропластикового навантаження на агроєкосистему.

Порівняно з великими поліетиленовими баками наземних обприскувачів (об'ємом 3000-8000 л і більше) баки агродронів мають значно меншу товщину стінки, але й суттєво менші габарити. Питома площа поверхні по відношенню до об'єму (A/V) у малих баків є вищою, що потенційно підвищує частку мікропластика, який може потрапити до кожної одиниці об'єму робочого розчину. З іншого боку, загальна маса полімеру в одному баку дрона на порядок менша, ніж у баку наземної машини. [29]

При оцінці екологічного ефекту слід враховувати не лише одиничний бак, а й сукупну кількість техніки, інтенсивність її використання, а також способи приготування розчину. У багатьох схемах агродрони заправляють із стаціонарних наземних ємностей великого об'єму, які самі є джерелом мікропластику. Таким чином, у системі «станція приготування – бак наземного обприскувача – бак агродрона» джерелами мікропластика виступають усі полімерні елементи, і завдання інженера полягає у мінімізації сумарного навантаження.

1.8. Порівняння агродронів-обприскувачів і наземних обприскувачів

Наземні причіпні та самохідні обприскувачі з баками 3000-8000 л і штангами 24-48 м забезпечують надзвичайно високу продуктивність на великих масивах при сприятливих ґрунтових умовах. Агродрони, навпаки, мають обмежений об'єм баків (20-70 л) і значно менший запас ходу за часом (обмежений ємністю акумуляторів), але компенсують це відсутністю залежності від несучої здатності ґрунту й можливістю працювати відразу кільком апаратам паралельно.

У середньому сучасні агродрони середнього й великого класу забезпечують змінну продуктивність на рівні 10–30 га/год при невисоких нормах внесення та оптимальній організації процесу заправки. Це нижче, ніж у провідних самохідних обприскувачів, однак достатньо для спеціалізованих культур, складних рельєфів та операцій, де наземна техніка працює неефективно або взагалі не може бути застосована. [7;8;29]

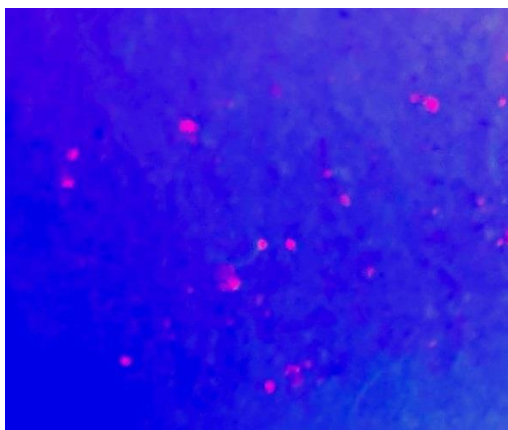
Для наземних машин бак є основною ємністю, з якої безпосередньо здійснюється внесення ЗЗР по всьому полю. Кількість дозаправок протягом зміни відносно невелика, а логістика зосереджена на підвезенні води й концентратів до обприскувача. В агродронних технологіях схема інша: дрони регулярно повертаються до мобільної станції заправки з ємностями великого об'єму. Тому роль баків дронів – забезпечувати точне дозування на коротких циклах роботи, тоді як основна логістика зосереджена на наземних резервуарах.

З інженерної точки зору це означає, що на бак дрона покладаються вимоги до точності вимірювання рівня, мінімізації залишків розчину, швидкості заповнення та промивання, тоді як великий наземний бак може бути оптимізований під енергетичну ефективність мішалок і можливість довготривалого зберігання розчину. Таким чином, при порівнянні екологічного впливу необхідно аналізувати всі баки в технологічному ланцюгу, а не лише один тип машин. [1;29]

З точки зору ризику прямого контакту оператора із ЗЗР агродрони мають перевагу: людина перебуває на безпечній відстані від зони розпилення, а заправка здійснюється із застосуванням засобів індивідуального захисту на стаціонарній станції. Для наземних обприскувачів оператор часто працює безпосередньо біля машини та штанги, що підвищує ризики. Водночас мікропластикове навантаження від полімерних баків і магістралей є спільним викликом як для наземної техніки, так і для агродронів.

1.9. Мікропластик як глобальна екологічна загроза

Мікропластик – це дрібні частинки пластику розміром від 100 нм до 5 мм, які сьогодні становлять серйозну глобальну екологічну загрозу. Потенційні небезпеки, пов’язані з його переміщенням у морських та наземних екосистемах, уже ґрунтовно вивчені. Нині мікропластик знаходять у всіх складових довкілля – у ґрунтах (див. рис. 1.5а), водних екосистемах (див. рис. 1.5б) і навіть у повітрі.



а



б

Рисунок 1.5 – а – виявлений мікропластик у ґрунті з удобрювальних ділянок за допомогою оптичного мікроскопа з додатковим УФ освітленням, пофарбовані Нілом червоним, видно як яскраву структуру; та у воді
б – частинки пластику розміром 0,1-0,5 мм під металографічним мікроскопом (при збільшенні 125×).

Наземні екосистеми зазнають суттєвого впливу мікропластику через побутові відходи, а також через застосування очищених стічних вод та їх осаду у сільському господарстві. Хоча нинішні знання про те, як мікропластик впливає на властивості ґрунту, все ще обмежені, сучасні дослідження показують, що ці частинки можуть змінювати фізичні параметри ґрунту –

зокрема його здатність утримувати вологу, структуру агрегатів і активність мікроорганізмів. [1;12;16]

Розуміння концентрації, різновидів і морфологічних особливостей мікропластику є ключовим для оцінки його взаємодії з ґрунтовим середовищем і прогнозування довготривалих екологічних наслідків. [1;31]

Пластикові матеріали сьогодні є невід’ємною складовою агровиробництва завдяки своїй універсальності, довговічності та функціональності. Вони використовуються на всіх етапах аграрного циклу – від вирощування розсади до післязбиральної обробки продукції та ґрунтів.

На етапі вирощування розсади пластикові контейнери, касети та стаканчики забезпечують ефективну організацію процесу вирощування молодих рослин. Пластикові теплиці та плівки створюють оптимальні умови для росту, захищаючи розсаду від несприятливих погодних умов і шкідників.

Для захисту рослин широко використовуються пластикові плівки для мульчування та агроволокно. Вони зберігають вологу в ґрунті, запобігають росту бур’янів та служать бар’єром від шкідників і хвороб. Пластикові обплетення і покриття також використовуються для створення тепличних умов або захисних бар’єрів для рослин. [1;23;28]

У системах поливу та зрошення пластикові матеріали, зокрема крапельні системи, є важливими для економії води та забезпечення рослин оптимальною кількістю вологи. Це особливо актуально для великих площ, де точне і економне зрошення є критично важливим.

На етапі збору врожаю пластикові контейнери і ящики допомагають мінімізувати пошкодження продукції, зберігаючи її цілісність під час транспортування. Легкість, міцність і зручність пластикових контейнерів дозволяють ефективно транспортувати урожай до місць обробки або продажу.

Для післязбиральної обробки використовуються пластикові пакети, контейнери та тара для зберігання та транспортування продукції. Вони

допомагають зберігати свіжість товару та захищати його від негативних зовнішніх впливів.

Також пластикові матеріали активно застосовуються для обробки ґрунтів. Пластикові плівки та покриття допомагають створювати потрібний мікроклімат для рослин, покращують структуру ґрунтів та оптимізують тепличні умови для росту.

Пластмаси – це полімерні матеріали, утворені з макромолекулярних ланцюгів різної довжини, що складаються з мономерів. Вони мають широке застосування в багатьох сферах, у тому числі й у сільському господарстві. Найпоширенішими видами пластмас, що використовуються в аграрному секторі, є поліпропілен (ПП), поліетилен (ПЕ), поліетилентерефталат (ПЕТ), полістирол (ПС), та полівінілхлорид (ПВХ). [1;9;22]

Пластики поділяють на первинні – спеціально виготовлені для певних цілей (наприклад, гранули для виробництва пластикових виробів чи абразивні мікросфери), і вторинні – ті, що утворюються внаслідок розпаду матеріалів, їхнього стирання або потрапляння пластикових відходів у довкілля. [1]

Залежно від своїх хімічних характеристик пластмаси можуть бути нерозкладними, легкорозкладними, біорозкладними або такими, що мають контрольований механізм розкладу. У сільськогосподарських умовах швидкість і характер їхнього розкладу визначаються низкою чинників:

- фактори довкілля – інтенсивність ультрафіолетового випромінювання, температура, рівень вологості, атмосферні впливи та погодні умови;
- агрохімікати, що застосовуються в агровиробництві й можуть прискорювати руйнування пластмас;
- хімічний склад матеріалу та наявність добавок;
- умови середовища – біорозкладання може відбуватися за участю бактерій, грибів, лишайників, а також завдяки діяльності комах, птахів і гризунів. [26]

Усі зазначені чинники сприяють формуванню мікрочастинок (до 5 мм) і наночастинок ($<0,1$ мкм), які можуть тривалий час зберігатися в довкіллі, особливо після фізичного руйнування пластикових виробів, що потрапляють у ґрунт. Пластики вирізняються високою стійкістю до зовнішніх впливів і тривалим строком служби, адже спочатку їх розробляли для довготривалого використання. Повний період їхнього розкладу може бути значно довшим за результати лабораторних чи польових досліджень, що створює істотну невизначеність щодо прогнозування тривалості їхнього існування в навколишньому середовищі. [1;28]

Хоча промислове виробництво пластмас почалося лише близько 70 років тому, полімерні мікрочастинки вже широко присутні в довкіллі. Це вказує на те, що процес їхнього утворення відбувається досить швидко – упродовж лише кількох десятиліть. [1;15]

Мікрочастинки пластмас мають велику питому поверхню та виражені гідрофобні властивості, що дає змогу легко адсорбувати на собі широкий спектр забруднювачів, зокрема поліхлоровані біфеніли, поліциклічні ароматичні вуглеводні, хлорорганічні пестициди, антибіотики, інші пестициди та важкі метали. [1;18]

Ці токсичні речовини здатні взаємодіяти між собою, формуючи комбінований токсичний ефект, що значно ускладнює їхнє вивчення та оцінку впливу на довкілля й здоров'я людини. Через інтенсивне накопичення мікропластикових частинок у природних екосистемах та їхню здатність зв'язувати небезпечні сполуки проблема пластикового забруднення стає дедалі гострішою, особливо для екології та аграрного сектору.

Основні шляхи надходження мікропластику в ґрунт включають:

- мульчування полів пластиковими плівками, які з часом розпадаються на дрібні частинки [1;13];

- атмосферні випадання поблизу сміттєзвалищ та місць зберігання відходів;

- зрошення сільськогосподарських угідь водою, забрудненою пластиковими фрагментами [1;19; 20];

- внесення біотвердих речовин – побічних продуктів очищення стічних вод; а також використання добрив у пластикових оболонках. [1;23]

Одним із найбільш поширених джерел надходження мікропластику в ґрунт є мікрокапсульовані добрива, пластикові труби, баки, мульчувальні плівки та полімерні оболонки добрив. Зокрема, полімерно покриті добрива, створені для поступового вивільнення поживних речовин, водночас можуть ставати джерелом мікропластикового забруднення агроґрунтів.

Потрапляння мікропластику в ґрунт через застосування пестицидів – важливий, але недостатньо досліджений шлях його надходження. Це забруднення може виникати через кілька механізмів. Один із них пов'язаний із використанням пластикової тари для пестицидів. Багато засобів захисту рослин продаються в контейнерах із ПЕ, ПП, ПВХ та інших полімерів. Після використання такі упаковки можуть опинятися в навколишньому середовищі через неналежну утилізацію або спалювання, що сприяє потраплянню мікропластикових частинок у ґрунт. Якщо пластикові контейнери не переробляються належним чином, частинки пластмаси можуть потрапляти в довкілля під час транспортування, розкривання тари або зберігання пестицидів на відкритих майданчиках, де уламки контейнерів легко розсіюються у ґрунт. [1;21]

Ще одним механізмом потрапляння мікропластику в ґрунт є його наявність безпосередньо у складі агрохімікатів. Останніми роками зафіксовано використання полімерних мікрочастинок, таких як полістирол чи поліетилен, у виробництві гербіцидів і фунгіцидів. Ці частинки можуть входити до формули препаратів для контролю вивільнення активних речовин або підвищення ефективності дії. Зокрема, полімерні покриття застосовують для уповільненого вивільнення пестицидів або для формування стабільних гранул із полімерними

оболонками. З часом такі гранули руйнуються, що призводить до виділення мікропластику в ґрунт під час використання препаратів. [1;27]

Мікропластики, що потрапляють у ґрунт через обприскування пестицидами або використання пластикової упаковки, можуть переміщуватися водою під час дощів або злив. Опади сприяють змиванню частинок із поверхні ґрунту або полів, що призводить до їх потрапляння в річки, озера та інші водні екосистеми. Частина мікропластиків також може проникати у підземні води через процеси вилугування.

Сукупна дія цих факторів призводить до накопичення мікрочастинок у ґрунті, що становить загрозу для ґрунтових організмів і може негативно впливати на продовольчу безпеку. Тривале застосування пластикових матеріалів – таких як мульчувальні плівки, труби та контейнери, а також часте обприскування рослин і ґрунтів пестицидами й добривами з пластиковими баками (до 10 разів на рік) – сприяє забрудненню ґрунту мікрочастинками, які з часом потрапляють у харчові ланцюги. [1;25]

Мікропластик може впливати на всі складові екосистеми як безпосередньо, так і опосередковано, змінюючи їхні властивості та функціонування. Накопичення мікрочастинок у ґрунті потенційно негативно впливає на його фізичні, хімічні та біологічні характеристики, а також на рівень біорізноманіття. Дослідження показують, що мікропластики здатні змінювати структуру ґрунту, його пористість, щільність, водоутримувальну здатність, а також впливати на рН і вміст органічних речовин. [1;10]

Крім того, мікропластики можуть впливати на активність ґрунтових організмів, зокрема дощових черв'яків, нематод та інших безхребетних. Літературні джерела вказують, що наявність мікропластику у ґрунті може підвищувати його рН і знижувати активність мікроорганізмів, що негативно відбивається на кругообігу поживних речовин. Переміщення мікропластику в ґрунті визначається низкою факторів, зокрема розміром, формою, гідрофобністю частинок та їхньою здатністю до агрегації, що впливає на

просторовий розподіл мікрочастинок. Вертикальний транспорт частинок відбувається через біопори, створені ґрунтовими організмами, або тріщини, тоді як горизонтальний рух зумовлюють оранка та інші агротехнічні операції.

Концентрація мікропластику в ґрунті може значно варіюватися залежно від типу землекористування. Дрібні частинки можуть поглинатися рослинами, тоді як більші фрагменти залишаються на поверхні коренів і можуть потрапляти до організму людини під час споживання коренеплодів. Нанопластики (<1 мкм) здатні долати клітинні бар'єри рослин, переважно апопластичним шляхом, хоча можливий і симпластичний транспорт. [1;24;27]

Крім того, мікропластики можуть впливати на активність ґрунтових організмів, таких як дощові черви, нематоди та інші безхребетні. За даними літератури, присутність мікропластику у ґрунті може підвищувати його рН і знижувати активність мікроорганізмів, що негативно впливає на кругообіг поживних речовин. Глибше розуміння процесів накопичення мікропластику та вилучених з нього добавок у рослинах, а також механізмів їх потрапляння до харчового ланцюга є надзвичайно важливим для забезпечення харчової безпеки. Вплив пластмас, що потрапляють у продукти харчування, на здоров'я людини поки залишається недостатньо вивченим, тому подальші дослідження, спрямовані на вивчення їхнього транспорту через біологічні бар'єри, засвоєння органами та можливих негативних наслідків, є необхідними. [24]

II АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Методика дослідження та відбору ґрунту

Аналіз ґрунту є важливою складовою оцінки його стану та родючості, оскільки дозволяє визначити якість земель і їх придатність для сільськогосподарського використання. У рамках цього дослідження було проведено відбір та лабораторний аналіз зразків ґрунту з різних точок обстежуваної ділянки. Основною метою аналізу було встановлення фізико-хімічних властивостей ґрунту, виявлення можливих забруднень, зокрема наявності мікропластику, а також оцінка впливу антропогенних факторів на стан ґрунтового середовища. [1;17;26]

Відбір зразків здійснювався на територіях, що зазнають регулярного антропогенного впливу і за результатами візуального обстеження можуть бути класифіковані як зони підвищеного навантаження. Такі ділянки інтенсивно використовуються для промислових, сільськогосподарських, транспортних або урбаністичних цілей. До характерних ознак таких територій належать: близьке розташування інфраструктурних об'єктів (доріг, фермерських будівель), часте застосування обприскувачів з пластиковими баками для внесення агрохімікатів (добрив, пестицидів), використання полімерних матеріалів у сільському господарстві (мульчувальні плівки, крапельне зрошення), а також ознаки деградації або зміни природного стану ґрунту. Саме такі умови сприяють накопиченню мікропластику, що обумовлює актуальність дослідження щодо вмісту полімерних частинок у зразках ґрунту з цих ділянок. [1;17;19]

1. Відбір зразків ґрунту проводиться з п'яти точок обраної ділянки на глибину до 30 см, при цьому з кожної точки береться по 100 г ґрунту. Кількість точок і маса наважки визначаються прагненням забезпечити репрезентативність

зразка. Ґрунт навіть на невеликій площі може бути неоднорідним за складом, структурою, вологістю та вмістом забруднень. Тому взяття зразків із кількох місць і подальше їхнє змішування в один комбінований зразок дозволяє отримати більш об'єктивну оцінку стану забруднення ґрунту на всій ділянці.

2. Відібрані зразки очищуються та висушуються при температурі 40 °С, після чого подрібнюються.

3. Отриманий зразок ґрунту змішують з дистильованою водою у співвідношенні 1:3 (маса/об'єм), ретельно перемішують і інкубують протягом 1 години для екстракції мікропластикових частинок у водне середовище.

4. Після інкубації надосад обережно відбирають, уникаючи збурення осаду, і фільтрують через нітроцелюлозний фільтр з розміром пор 5 мкм для відокремлення мікропластикових частинок від рідкої фази.

5. Отриманий фільтрат фарбують барвником Nile Red, після чого зразок досліджують за допомогою мікроскопа з додатковим УФ-освітленням для виявлення мікропластикових включень. [1;9;17]

Nile Red – це флуоресцентний барвник, який широко застосовується для виявлення та кількісного визначення гідрофобних частинок, зокрема мікропластику, у різних середовищах, таких як водні розчини, ґрунт або біологічні зразки. Барвник має здатність вибірково адсорбуватися на гідрофобних матеріалах, зокрема на полімерних частинках, що дозволяє відокремлювати їх від органічних та мінеральних компонентів зразка. При збудженні світлом певної довжини хвилі Nile Red флуоресціює, завдяки чому мікропластикові частинки стають видимими під мікроскопом, особливо при використанні додаткового ультрафіолетового освітлення. У контексті аналізу ґрунту застосування Nile Red дозволяє виявляти мікропластикові частинки розміром від кількох мікрометрів, оцінювати їхню кількість і просторове розподілення, а також проводити подальший кількісний аналіз, забезпечуючи точну та надійну оцінку забруднення ґрунту мікропластиком.

2.2. Аналіз отриманих результатів

Мікропластик є дрібними частинками пластику розміром менше 5 мм, що потрапляють у навколишнє середовище з численних джерел, таких як пластикові упаковки, синтетичний одяг, шини, сільськогосподарські плівки, добрива та інші матеріали. Ці частинки накопичуються в ґрунті, воді, повітрі та живих організмах, зокрема у людині. Найпоширенішими шляхами їх потрапляння є атмосферне перенесення, стічні води, агрохімікати та органічні добрива. Мікропластик має здатність порушувати структуру ґрунту, впливати на мікроорганізми, затримувати токсичні речовини і навіть потрапляти в харчовий ланцюг. У цьому контексті важливо детально проаналізувати наслідки цього забруднення та вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. [1;17]

Проаналізовано 5 зон (рис. 2.1). У зонах 1 та 2 рівень забруднення мікропластиком коливався від 10 до 18 одиниць, що можна вважати порівняно низьким і характерним для територій із мінімальним антропогенним впливом. Варто відзначити, що у третій повторності спостерігалися як зниження, так і підвищення показників, що свідчить про певну неоднорідність забруднення. Ймовірно, це пов'язано з локальними особливостями ґрунту, мікрорельєфом, напрямком вітру або водними потоками, які впливають на накопичення частинок пластику. [1]

У зонах 3, 4 та 5 відзначається підвищений рівень забруднення як мікропластиком (частинки <5 мм), так і мезопластиком (розміром 5 мм – 2 см). Це, ймовірно, пов'язано з інтенсивною сільськогосподарською діяльністю, зокрема тривалим використанням обприскувачів та інших засобів, що містять пластикові компоненти. При розкладанні цих матеріалів у ґрунті утворюються дрібні частинки, які поступово накопичуються у ґрунтовому середовищі. Наявність значної кількості мезопластика може свідчити про нещодавнє надходження пластикових відходів, що ще не повністю деградували до

мікропластикової фракції, а також про низький рівень утилізації чи переробки пластикових матеріалів на території господарства.

Загалом отримані результати підтверджують актуальність проблеми поширення пластикових частинок у ґрунтовому середовищі та підкреслюють необхідність удосконалення системи поводження з пластиком, підвищення екологічної культури виробництва та впровадження більш сталих технологій у аграрному секторі.

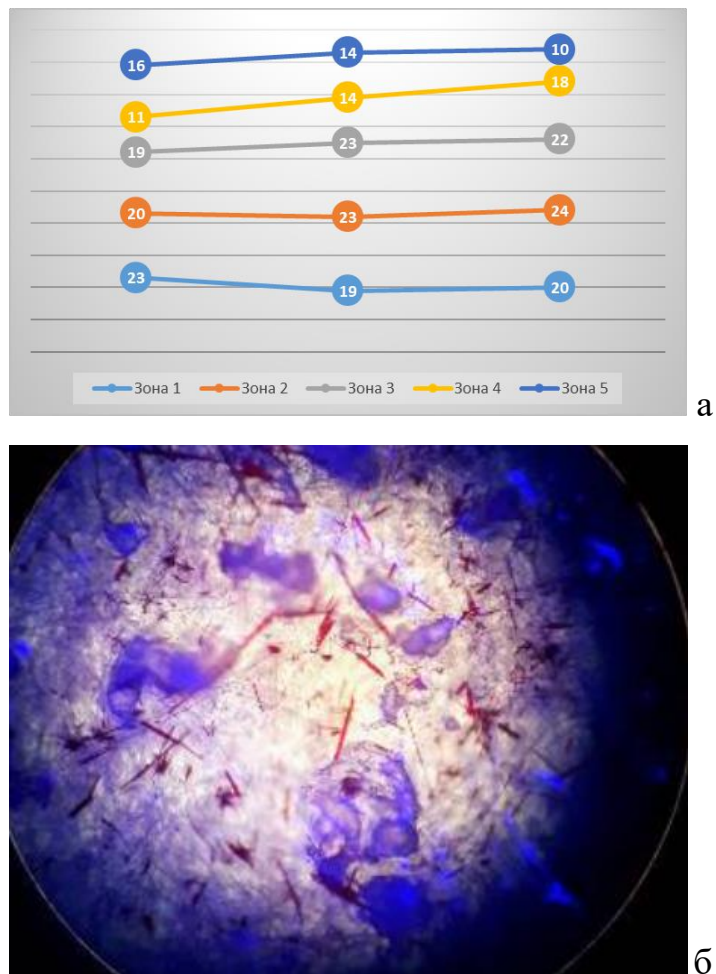


Рисунок 2.1 – Мікропластик

а – концентрація мікропластику у досліджуваному середовищі,
б – мікропластик в експериментальному середовищі збільшення 40×)
частинки пластику розміром 0,1-0,5 мм.

III ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Аналіз обприскування сільськогосподарських культур пестицидами

Досягнення високих врожаїв сільськогосподарських культур значною мірою залежить від їх ефективного захисту від хвороб, шкідників і бур'янів. Зазначене забезпечується своєчасною обробкою пестицидами в оптимальні строки для запобігання негативним впливам [1;29].

Для цього застосовують різні методи обприскування: наземне, авіаційне та з використанням агродронів.

Наземне обприскування зазвичай здійснюють великогабаритною технікою з пластиковими баками об'ємом 500-2000 л і більше. При цьому концентрація діючих речовин зазвичай невисока, а витрата розчину становить 100-300 л/га. Великогабаритні наземні обприскувачі оснащені розпилювачами, що утворюють краплини середнього та великого розміру з діаметром від 100 до 400 мкм.

В останні десятиліття в агровиробництві з'явилася інноваційна технологія обприскування сільськогосподарських культур – використання агродронів. Її впровадження стало можливим завдяки поєднанню розробки нових літальних апаратів та застосуванню висококонцентрованих препаратів захисту рослин. Баки агродронів виготовляються з пластику й мають об'єм 10-50 л, при цьому норма витрати розчину становить 3-8 л/га. У таких апаратах застосовується ультрамалооб'ємне внесення висококонцентрованих розчинів, де об'єм води зменшено до 100 разів, а розмір краплин становить менше 100 мкм. Для авіаційної обробки використовуються розчини з більшою концентрацією, при цьому витрата становить 25-50 л/га. [1;29]

Експериментальні дослідження показали, що в 1 л води, яка зберігається в пластиковій тарі, міститься в середньому 10,4 частинки мікропластику. [28].

Обґрунтуємо залежність кількості мікропластику від площі поверхні пластикового бака (поверхню контакту рідини з пластиком, вважаємо, що бак заповнений повністю).

На рисунку 3.1 наведено схематизацію розмірів бака.

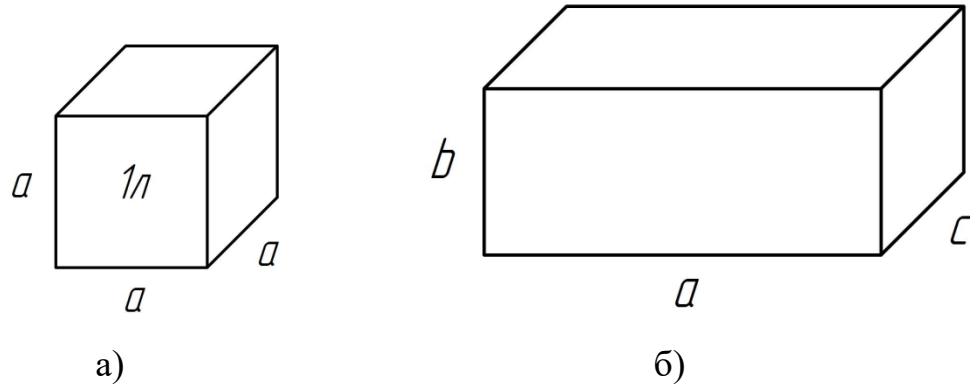


Рисунок 3.1 – Схематизація розмірів бака, а – кубічна форма, б – прямокутний паралелепіпед

$$1л = 10^3 см^3 = 10^{-3} м^3, \quad 1м^3 = 10^6 см^3.$$

Для заданого прямокутного пластикового бака приймаємо такі співвідношення:

$$b = k_1 \cdot a; \quad c = k_2 \cdot a.$$

Тоді об'єм бака дорівнює:

$$V = a \cdot b \cdot c = a \cdot a \cdot k_1 \cdot a \cdot k_2 = a^3 \cdot k_1 \cdot k_2, \text{ звідки}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{V}{k_1 \cdot k_2}}.$$

Таким чином площа поверхні бака:

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot a \cdot c + 2 \cdot b \cdot c = 2 \cdot a^2 \cdot k_1 + 2 \cdot a^2 \cdot k_2 + 2 \cdot a^2 \cdot k_1 \cdot k_2 = \\ &= 2 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{V}{k_1 \cdot k_2}} \right)^2 \cdot (k_1 + k_2 + k_1 \cdot k_2). \end{aligned}$$

Площа поверхні пластикового 1л бака, якщо $k_1 = k_2 = 1$, дорівнює

$$A = 2 \cdot \left(\sqrt[3]{10^{-3}} \right)^2 \cdot (1+1+1 \cdot 1) = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Експериментально, для води, площа поверхні 1 л бака виділяє $n_0 = 10,4$ частинок мікропластику. Отже 1 м² поверхні пластикового бака виділяє:

$$n = \frac{n_0}{6 \cdot 10^{-2}} = \frac{10,4}{6 \cdot 10^{-2}} = 173,3 \frac{\text{шт}}{\text{м}^2}.$$

Виділення мікропластику з поверхні бака залежить від площі його поверхні.

На рисунку 3.2 показано залежність площі поверхні бака від його об'єму, при $k_1 = k_2 = 1$,

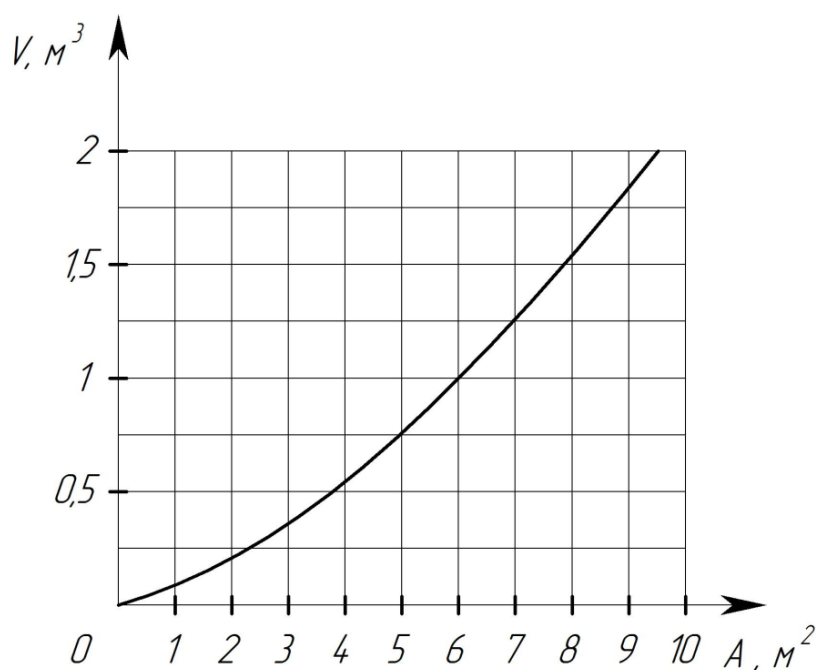


Рисунок 3.2 – Залежність площ поверхонь бака від його об'єму

Забруднення ґрунту мікропластиком залежить від декількох факторів, а саме: площі поверхні бака розпилювача; кількості мікрочастинок пластику, яка виділяється з одиниці площі цієї поверхні; об'єму розчину розпиленого на одиницю площі угіддя.

Забруднення мікропластиком 1 га сільськогосподарських угідь залежить від об'ємів баків, норм витрат рідини розчину на одиницю площі.

Кількість мікропластику N_i , яка знаходиться в баках різної ємності описується залежністю.

$$N_i = \frac{A_i \cdot n}{V_i} \left[\frac{\text{шт.}}{\text{м}^3} \right],$$

де A_i - площа поверхні i -го бака з об'ємом V_i .

n - кількість частинок мікропластику, виділена з площі поверхні 1 л бака, шт/м³. [1;17;18]

3.2. Загальна кількість мікропластику при витратах робочої рідини

Загальна кількість мікропластику при витратах робочої рідини на 1 га оброблюваної площі $Q_{\text{ср}}, \frac{\text{л}}{\text{га}} \left[\frac{10^{-3} \text{ м}^3}{\text{га}} \right]$, дорівнює:

$$N_0 = N_i \cdot Q_{\text{ср}} = \frac{A_i \cdot n}{V_i} \cdot Q_{\text{ср}} \left[\frac{\text{шт.}}{\text{га}} \right], \text{ або } N_{01} = \frac{A_i \cdot n}{V_i} \cdot Q_{\text{ср}} \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{шт.}}{\text{м}^2} \right].$$

Результати розрахунків кількості мікропластику, в залежності від норм витрат робочої рідини та об'ємів баків обприскуючої техніки наведені на рисунках 3.3, 3.4. [1]

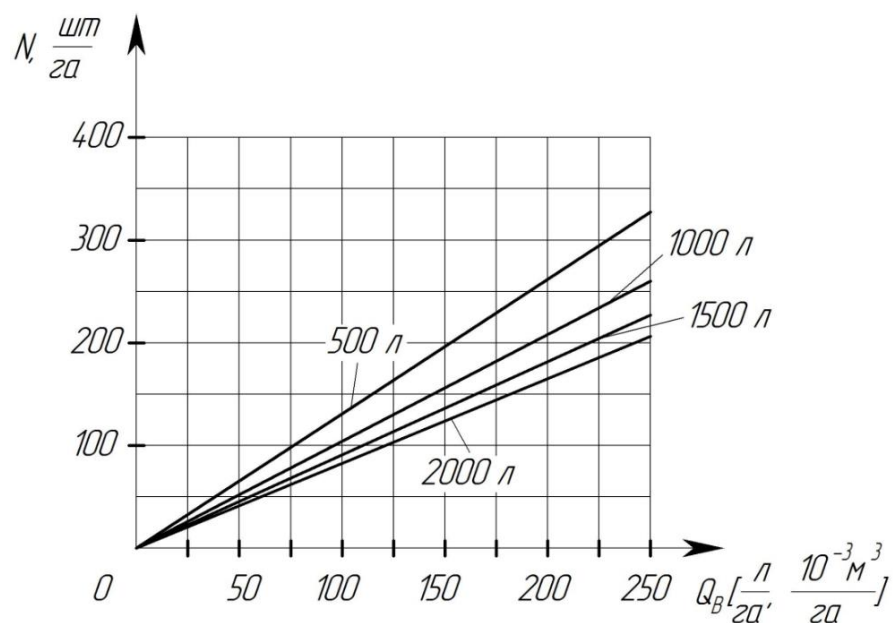


Рисунок 3.3 – Кількісне забруднення одиниці площі мікропластиком в залежності від ємностей баків великогабаритної техніки та норм витрат робочої рідини

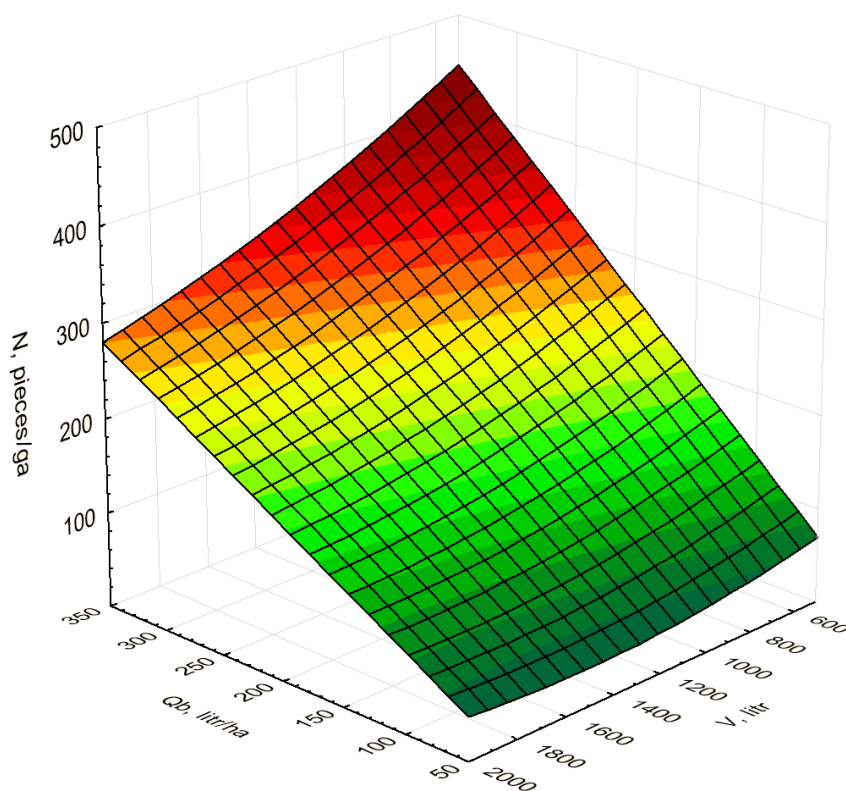


Рисунок 3.4 – Універсальний графік кількісного забруднення одиниці площі мікропластиком в залежності від ємностей баків великогабаритної техніки та норм витрат робочої рідини

Інноваційним методом зменшення негативних викидів мікропластику – це застосування малогабаритної техніки з малими об'ємами баків для розчинів висококонцентрованих пестицидів з ультрамалооб'ємним їх внесенням. Такою технікою є літальні апарати – агродрони з об'ємом бака для рідини 10-50 л, нормою витрат 3-8 л/га. [1]

3.3. Інноваційний підхід до зменшення викидів мікропластику

Інноваційним підходом до зменшення викидів мікропластику є використання малогабаритної техніки з невеликими баками для висококонцентрованих пестицидних розчинів та ультрамалооб'ємним їх внесенням. До такої техніки належать літальні апарати – агродрони, баки яких мають об'єм 10–50 л, а норма витрати розчину становить 3-8 л/га.

Проведено аналогічні аналітичні дослідження по забрудненню мікропластиком з використанням агродронів, результати наведені на рисунку 3.5.

Аналіз експериментально-аналітичних досліджень вказує на те, що вміст мікропластику при обприскуванні 1 га рослинного угіддя залежить від його методу, а саме: великогабаритною технікою з об'ємом баків 500-2000 л, з нормою витрат розчину пестицидів 50-350 л/га чи малогабаритною технікою (агродронами) з об'ємом баків 10-50 л, з нормою витрат 5-8 л/га.

На рис. 3.4, рис. 3.5. графічно наведено аналітичні результати забруднення мікрочастинками пластику одиниці площі (га) в залежності від об'єму баків та нормою витрат. Кількісне зменшення частинок при умові обробітку поля однотипним пестицидом агродроном в порівнянні з великогабаритною наземною технікою складає від 10 до 15 разів. [1]

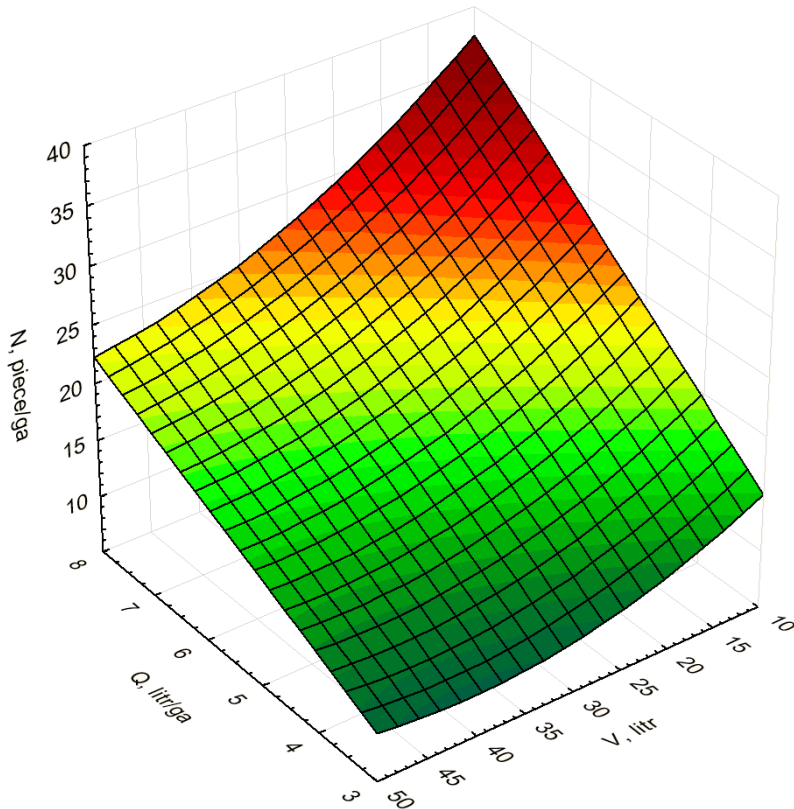


Рисунок 3.5 – Універсальний графік кількісного забруднення одиниці площі мікропластиком в залежності від ємностей баків агродронів та норм витрат робочої рідини

Приклад 1: Бак наземного обприскувача $V = 1 \text{ м}^3$, $k_1 = k_2 = 1$ розхід

$$Q_{\text{в}} = 200 \frac{\text{л}}{\text{га}} = 200 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{га}}; n = 173,3 \frac{\text{шт}}{\text{м}^2}.$$

1) Визначаємо площу контакту поверхні бака з рідиною:

$$A = 2 \cdot \left(3 \sqrt[3]{1} \right)^2 \cdot (1 + 1 + 1) = 6 \cdot \left(\sqrt[3]{1} \right)^2 = 6 \text{ м}^2.$$

2) Визначаємо кількість мікропластику в 1 м^3 , рідини:

$$N = \frac{6 \cdot n}{V} = \frac{6 \cdot 173,3}{1} = 1040 \frac{\text{шт}}{\text{м}^3}.$$

3) Визначаємо кількість мікропластику вивільненого з бака обприскувача на 1 га оброблюваної площі:

$$N_0^H = N \cdot Q_{\theta} = 1040 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 208 \frac{\text{шт}}{\text{га}};$$

Приклад 2: Бак агродрона обприскувача $V = 40 \text{ л} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;

$$k_1 = k_2 = 1_{\text{розхід}} \quad Q_{\theta} = 5 \frac{\text{л}}{\text{га}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{га}}. \quad n = 173,3 \frac{\text{шт}}{\text{м}^2}.$$

1) Визначаємо площу контакту поверхні бака з рідиною:

$$A = 2 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{40 \cdot 10^{-3}}{1}} \right)^2 \cdot (1+1+1) = 6 \cdot \left(\sqrt[3]{40 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 0,702 \text{ м}^2.$$

2) Визначаємо кількість мікропластику в 1 м^3 рідини:

$$N = \frac{0,702 \cdot 173,3}{40 \cdot 10^{-3}} = 3040 \frac{\text{шт}}{\text{м}^3}$$

3) Визначаємо кількість мікропластику вивільненого з бака обприскувача на 1 га оброблюваної площі:

$$N_0^{a2p} = N \cdot Q_B = 3040 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 15,2 \frac{\text{шт}}{\text{га}}.$$

Для наведених прикладів при обприскуванні однаковими речовинами кількість мікропластику зменшено в 13,7 раз. [1]

IV ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Загальні вимоги безпеки під час проведення досліджень

Забезпечення безпечних умов праці під час обробки сільськогосподарських культур пестицидами та проведення досліджень мікропластику є важливим аспектом агровиробництва. Дотримання правил охорони праці та заходів безпеки в надзвичайних ситуаціях дозволяє мінімізувати ризики для працівників та навколишнього середовища під час роботи з хімічними препаратами та пластиковим обладнанням.

Під час наземного обприскування з використанням великогабаритної техніки важливо дотримуватися правил безпечного поводження з пластиковими баками об'ємом 500–2000 л. Робота повинна проводитися в спеціальному захисному одязі, рукавицях і респіраторах, щоб уникнути контакту з пестицидами та випадкового розпилення розчинів на шкіру або слизові оболонки. Також слід забезпечити стабільне розміщення техніки на полях і контроль за герметичністю баків, щоб уникнути розливів та пошкоджень пластикових ємностей.

При використанні авіаційного та агродронового обприскування важливо дотримуватися правил безпечного запуску та польоту літальних апаратів. Агродрони з баками об'ємом 10-50 л та нормою витрати 3-8 л/га працюють із висококонцентрованими розчинами та ультрамалооб'ємним внесенням, що зменшує загальний об'єм води і контакт із пестицидами. Проте під час заправки баків, їх обслуговування та зберігання необхідно використовувати захисні засоби і контролювати стан пластикових ємностей, щоб уникнути витоку речовини та забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами.

Під час лабораторного аналізу мікропластику в зразках ґрунту, води та рослин обов'язковим є дотримання правил охорони праці та заходів безпеки. Використання засобів індивідуального захисту – рукавичок, лабораторного халата та захисних окулярів що мінімізує контакт із частинками пластику та хімічними реагентами.

Робота повинна проводитися у добре вентиляованих приміщеннях або під витяжною шафою на чистих робочих поверхнях, що запобігає перехресному забрудненню зразків. Особлива увага приділяється цілісності пластикових контейнерів та контролю за їх використанням, щоб уникнути додаткового утворення мікропластику.

У разі розливу зразків або пошкодження тар зразки слід негайно локалізувати та зібрати спеціальними засобами, а відходи утилізувати відповідно до лабораторних протоколів. Всі маніпуляції з зразками документуються для забезпечення простежуваності та безпеки проведення досліджень.

Дотримання цих заходів забезпечує безпечну роботу персоналу та зменшує ризик додаткового забруднення навколишнього середовища мікропластиком.

Під час аналізу вмісту мікропластику у середовищі використовуються спектроскопічні прилади, мікроскопи, магнітні мішалки та інше обладнання.

Основні вимоги:

- система заземлення повинна бути справною;
- щоденна перевірка кабелів та вилок на наявність пошкоджень;
- заборонено працювати з обладнанням мокрими руками;
- у разі несправності прилад негайно відключається та передається фахівцю з обслуговування.

У лабораторії мають бути:

- вуглекислотні чи порошкові вогнегасники;
- вільний доступ до евакуаційних виходів;

- чіткі інструкції щодо дій при пожежі.

Особливу увагу слід звернути на роботу з легкозаймистими речовинами (спирти, органічні розчинники). Необхідно уникати їх нагрівання відкритим полум'ям, не допускати їх проливання та накопичення парів. [3;5]

4.2. Екологічна безпека та поводження з відходами

Екологічна безпека в агровиробництві та лабораторних дослідженнях мікропластику є важливим аспектом сучасного сільського господарства. Використання пластикового обладнання, баків для пестицидних розчинів та пакувальних матеріалів може стати джерелом забруднення ґрунту та води дрібними частинками пластику, які накопичуються у довкіллі при їх розкладанні або пошкодженні.

Для мінімізації негативного впливу необхідно впроваджувати системи сортування та класифікації відходів за типом і розміром: мікропластик, мезопластик та великі фрагменти. Це дозволяє визначити подальший шлях їх утилізації або переробки. Тимчасове зберігання пластикових відходів здійснюється в герметичних контейнерах з відповідним маркуванням, що запобігає випадковому розповсюдженню частинок у навколишнє середовище.

Важливим елементом є утилізація та переробка: великі пластикові елементи та залишки баків підлягають механічній переробці або спеціальній утилізації відповідно до стандартів екологічної безпеки, тоді як мікропластик і дрібні фрагменти збираються й утилізуються як небезпечні відходи, що запобігає їх потраплянню в ґрунт і водні об'єкти. Для запобігання вторинному забрудненню всі роботи з пластиковими матеріалами та зразками проводяться в контрольованих умовах із застосуванням витяжних шаф, захисного одягу та регулярною дезінфекцією робочих поверхонь. [3]

Регулярний моніторинг рівня пластикового забруднення, контроль дотримання правил поводження з відходами та документування всіх процедур дозволяють забезпечити екологічну безпеку та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Дотримання цих заходів підвищує ефективність агротехнічних і лабораторних досліджень і сприяє розвитку сталих технологій у сільському господарстві. [3]

4.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою організації робіт у агровиробництві та лабораторних дослідженнях мікропластику. До таких ситуацій належать розливи пестицидних розчинів, пошкодження пластикових баків або контейнерів із зразками, несправності техніки та випадкове поширення частинок мікропластику у довкілля.

Для мінімізації ризиків необхідно дотримуватися встановлених процедур реагування: своєчасно локалізувати розливи, застосовувати спеціальні абсорбенти та герметичні контейнери для збору матеріалів, що забруднені. Всі дії виконуються із застосуванням засобів індивідуального захисту — рукавичок, захисного одягу, окулярів та респіраторів.

Особливу увагу слід приділяти аварійним ситуаціям під час роботи з агродронами, наземними та авіаційними обприскувачами. У разі технічних несправностей або випадкових розливів речовин працівники повинні діяти відповідно до розроблених інструкцій, які передбачають ізоляцію зони, оперативну нейтралізацію небезпечних речовин та повідомлення відповідних служб.

У лабораторних умовах надзвичайні ситуації включають пошкодження пластикових контейнерів із зразками, розливи води або реагентів, а також ризик

розповсюдження мікропластику. Реагування передбачає негайне припинення роботи в зоні розливу, локалізацію частинок, їх збір і утилізацію за встановленими протоколами. Всі випадки документуються, що дозволяє відстежувати джерела ризиків та вдосконалювати процедури безпеки.

Дотримання цих заходів забезпечує безпеку персоналу, зменшує ризик забруднення довкілля та підвищує ефективність агротехнічних і лабораторних робіт у сфері досліджень мікропластику. [3;5]

4.4. Заходи мінімізації впливу мікропластику в агроєкосистемах

Мікропластик є однією з актуальних проблем сучасного агровиробництва, оскільки його накопичення в ґрунті та водних системах може негативно впливати на родючість, біорізноманіття та екологічну стійкість агроєкосистем. Для мінімізації його впливу застосовуються комплексні заходи, що поєднують технологічні, організаційні та екологічні підходи.

По-перше, важливим заходом є оптимізація технологій обприскування. Використання малогабаритної техніки, таких як агродрони з невеликими баками для висококонцентрованих розчинів та ультрамалооб'ємним внесенням, дозволяє зменшити обсяг використаної води та контакт з пластиковими ємностями, що знижує ризик утворення мікропластику. Також ефективним є контроль стану баків і розпилювачів, своєчасне їх технічне обслуговування та використання стійких до руйнування матеріалів.

По-друге, необхідно впроваджувати системи поводження з відходами та переробки пластику. Сортування відходів за типом і розміром, тимчасове герметичне зберігання, механічна переробка великих елементів та утилізація мікропластику як небезпечних відходів дозволяє запобігти його потраплянню в ґрунт і водні об'єкти.

По-третє, доцільним є моніторинг і контроль забруднення. Регулярне відстеження рівня мікропластику у ґрунті та водних об'єктах дозволяє своєчасно виявляти джерела забруднення та коригувати технологічні та організаційні заходи.

Крім того, важливу роль відіграє екологічно свідоме виробництво та підвищення екологічної культури серед агровиробників. Це включає зменшення використання одноразових пластикових матеріалів, впровадження стійких технологій пакування, застосування біорозкладних матеріалів та навчання персоналу правилам поводження з пластиком. [3;5;9]

Комплексне впровадження цих заходів забезпечує зменшення негативного впливу мікропластику на агроєкосистеми, підвищує ефективність агротехнічних заходів та сприяє розвитку сталого сільського господарства.

ВИСНОВКИ

У роботі висвітлено результати досліджень процесів надходження, розподілу та накопичення мікропластику в ґрунтовому середовищі за умов інтенсивного сільськогосподарського використання територій. Отримані експериментальні дані дали змогу здійснити кількісну оцінку вмісту мікропластикових частинок у ґрунтах, проаналізувати їх просторові особливості, а також ідентифікувати ключові джерела та чинники формування і поширення мікропластику в агроєкосистемах.

1. Розроблено методику для точного кількісного визначення мікропластику в ґрунті, що дає змогу виявляти пластикові частинки різних розмірів. Ця методика є важливою для ефективного моніторингу забруднення, оскільки дозволяє отримувати точні й надійні дані про концентрацію пластикових частинок у ґрунті. Завдяки цьому стає можливим глибше розуміння рівня забруднення та оцінка його впливу на навколишні екосистеми.

2. Дослідження підтвердили, що в зонах із інтенсивним сільськогосподарським та іншими антропогенними навантаженнями рівень забруднення ґрунтів мікропластиком є значним. Це свідчить про необхідність контролю за використанням пластикових матеріалів та обприскувачів, а також за утилізацією пластикових відходів у сільському господарстві.

3. Аналіз конструкційних особливостей баків обприскувачів показав, що матеріали, з яких виготовлені баки, а також їхнє покриття, впливають на швидкість деградації та утворення мікропластикових частинок. Зношені пластикові баки сприяють більш інтенсивному виділенню мікропластику у ґрунт.

4. Запропоновані заходи, такі як зменшення об'єму баків обприскувачів та впровадження новітніх технологій обприскування, дозволяють зменшити контакт агрохімікатів з пластиковими поверхнями, що

знижує інтенсивність утворення мікропластикових частинок. Це також сприяє зменшенню забруднення ґрунту мікропластиком

Реалізація запропонованих заходів дозволить значно знизити кількість мікропластику в ґрунті, що сприятиме поліпшенню стану мікробіоти та загальної екологічної рівноваги в агроєкосистемах. Це також сприятиме зменшенню забруднення водних ресурсів і покращенню здоров'я рослин, а в перспективі – і людей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бубняк Р.І. Студенська науково-дослідна робота. Методологія визначення мікропластику в ґрунті та стратегії його мінімізації. Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький. 2025.
2. Довбуш Т. А., Хомик Н. І., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш А. Д. Опір матеріалів : навч. посіб. до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 220 с.
3. Заплатинський В. М. Безпека життєдіяльності людини : навч. посіб. – Київ : Центр учбової літератури, 2020. – 408 с.
4. Олексюк В. П., Бабій А. В., Сташків М. Я., Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Цьонь Г. Б., Мартинюк В. В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія». Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. 93 с.
5. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
6. Хомик Н. І., Мартинюк В. В., Бабій А. В., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Довбуш А. Д. Агрозахист : навч. посіб. / за заг. ред. Н. І. Хомик. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 520 с.
7. Хомик Н. І., Цьонь Г. Б., Довбуш Т. А., Олексюк В. П. Основи агрономії : навч. посіб. (курс лекцій). Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 232 с.
8. Cuebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Art. 686.

9. Dou Q., Wei Z., Li R., Xue X., Sun Y., Zhang S., Li Q., Chang C., Zhang Z., Sun Y. Research status, methods and prospects of air-assisted spray technology. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 5. Art. 1407
10. Dey S., Veerendra G. T. N., Babu P. A., Manoj A. P., Nagarjuna K. Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials & Devices*. 2024. Vol. 2, No. 1. P. 70–112.
11. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017. Vol. 3, No. 7. Article e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
12. Gianico A., Braguglia C. M., Gallipoli A., Montecchio D., Mininni G. Land application of biosolids in Europe: possibilities, constraints and future perspectives. *Water*. 2021. Vol. 13, No. 1. P. 103.
13. Huang Y., Liu Q., Jia W., Yan C., Wang J. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 260. Article 114096.
14. Kinigopoulou V., Pashalidis I., Kalderis D., Anastopoulos I. Microplastics as carriers of inorganic and organic contaminants in the environment: A review of recent progress. *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 350. Article 118580.
15. Koelmans A. A., Redondo-Hasselerharm P. E., Nor N. H. M., de Ruijter V. N., Mintenig S. M., Kooi M. Risk assessment of microplastic particles. *Nature Reviews Materials*. 2022. Vol. 7, No. 2. P. 138–152.
16. Lakhari, I. A., Yan, H., Zhang, J., Wang, G., Deng, S., Bao, R., ... & Wang, X.. Plastic pollution in agriculture as a threat to food security, the ecosystem, and the environment: an overview. *Agronomy*. 2024. Vol 14(3), 548.
17. 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. Vol 9(1), 20.

18. Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A. G. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, No. 1. Article 44501.

19. Martyniuk V. V. Accumulation of microplastics in the bivalve mollusc *Unio tumidus* under experimental and field exposures. *Studia Biologica*. 2022. Vol. 16, No. 4. P. 33–44. DOI: 10.30970/sbi.1604.694.

20. Mason S. A., Welch V. G., Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry*. 2018. Vol. 6. Article 389699.

21. Mohasin M., Habib K., Rao P. S., Ahmad M., Siddiqui S. Microplastics in agricultural soils: sources, impacts, and mitigation strategies. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2025. Vol. 197, No. 6. Article 684.

22. Mukherjee A., Koller M. Polyhydroxyalkanoate (PHA) biopolyesters – emerging and major products of industrial biotechnology. *EuroBiotech Journal*. 2022. Vol. 6, No. 2. P. 49–60.

23. Oshingbade O. S., Moda H. M., Akinsete S. J., Adejumo M., Hassan N. Determinants of safe pesticide handling and application among rural farmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2025. Vol. 22, No. 2: 211.

24. Rillig M. C., Lehmann A. Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*. 2020. Vol. 368, No. 6498. P. 1430–1431.

25. Sa’adu I., Farsang A. Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environmental Sciences Europe*. 2023. Vol. 35, No. 1. Article 13.

26. Shah A. A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 2008. Vol. 26, No. 3. P. 246–265.

27. Sopeña F., Maqueda C., Morillo E. Controlled release formulations of herbicides based on micro-encapsulation. *Ciencia e Investigación Agraria*. 2009. Vol. 36, No. 1. P. 27–42.
28. Tong H., Zhong X., Duan Z., Yi X., Cheng F., Xu W., Yang X. Micro- and nanoplastics released from biodegradable and conventional plastics during degradation: Formation, aging factors, and toxicity. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 833. Article 155275.
29. Tson H., Dovbush T., Martyniuk V., Khomyk N., Stashkiv M., Dovbush A. Development of highly productive technological schemes for the use of agrodrones for plant protection. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. Vol. 118, No. 2. P. 66–78.
30. Weldelessie T., Naz H., Singh B., Oves M. Chemical contaminants for soil, air and aquatic ecosystem. In: Modern Age Environmental Problems and Their Remediation. Cham : *Springer International Publishing*. 2017. P. 1–22.
31. Zhang G. S., Zhang F. X., Li X. T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 670. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.149.
32. Zhang Y., Gao T., Kang S., Sillanpää M. Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 254. Article 112953.
33. Spray Flagman-3000-28 : ST-Agro [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://st-agro.com/uk/product/spray-flagman-3000-28/> (дата звернення 20.11.2025) .

ДОДАТКИ