

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ О.О. БОГОМОЛЬЦЯ**

БОРИСЕНКО АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 613:632.95:632.982.001.76

**ПОРІВНЯЛЬНА ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА ТА НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
ПІДХОДІВ ДО ГІГІЄНИЧНОЇ РЕГЛАМЕНТАЦІЇ ІННОВАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ**

14.02.01 – гігієна та професійна патологія

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора медичних наук

Київ – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному медичному університеті імені О.О. Богомольця МОЗ України

Офіційні опоненти:

доктор медичних наук, старший науковий співробітник **Бабій Віталій Филімонович**, Державна установа "Інститут громадського здоров'я імені О.М. Марзєєва НАМН України", завідувач лабораторії гігієни канцерогенних факторів та наноматеріалів;

доктор медичних наук, професор **Кузьмінов Борис Павлович**, Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького МОЗ України, директор науково-дослідного інституту епідеміології та гігієни;

доктор медичних наук, професор **Онул Наталія Михайлівна**, Дніпровський державний медичний університет, Директор Науково-дослідного інституту медико-біологічних проблем Дніпровського державного медичного університету.

Захист відбудеться 19.09.2024 року об 13.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.003.01 при Національному медичному університеті імені О.О. Богомольця МОЗ України за адресою м. Київ, бул. Т. Шевченка, 13, конференц-зала.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного медичного університету імені О.О. Богомольця МОЗ України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Зоологічна, 1.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат медичних наук, доцент**

Є.М. Анісімов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування хімічних речовин для захисту рослин є ключовим елементом в аграрному секторі, який суттєво сприяє стабільному економічному зростанню та досягненню цілей національного розвитку (Jallow M.F. et al., 2017; Moser F. and Dondi F., 2016). Пестициди відіграють вирішальну роль у запобіганні втратам врожаю, тим самим безпосередньо впливаючи на врожайність і загальну продуктивність агропромислового виробництва (Damalas C.A. et al., 2017). Використання хімічних засобів захисту рослин (ХЗЗР) має суттєві економічні наслідки. З одного боку, це сприяє підвищенню ефективності сільськогосподарського сектора, зміцнюючи тим самим економічну стабільність і зростання прибутків. З іншого боку, це узгоджується з ширшими цілями розвитку держави, забезпечуючи продовольчу безпеку – ключову складову соціально-економічного розвитку будь-якої нації (Boedeker W. et al., 2020; Kim K.H. et al., 2017; Moser F. and Dondi F., 2016).

Однак необхідно розглянути можливість використання пестицидів у рамках сталої сільськогосподарської практики з використанням інноваційних технологій застосування, оскільки їх нерегульоване або надмірне внесення може призвести до шкідливого впливу на навколишнє середовище, включаючи забруднення ґрунту та водних ресурсів і порушення місцевих екосистем. Крім того, не можна не помічати потенційні ризики для здоров'я як працівників сільського господарства, так і споживачів, пов'язані з неправильним використанням ХЗЗР (Anderson S.E. and Meade V.J., 2014; Evaristo A. et al., 2022; Tarone R.E., 2018).

Згідно з відомостями, наданими Міжнародною організацією праці (International Labor Organization, 2021), аграрний сектор відзначається як один із найбільш ризикованих у плані безпеки життя та здоров'я працівників, і це стосується як розвинутих країн, так і тих, що розвиваються. Працівники сільського господарства становлять майже половину всієї робочої сили на планеті, що складає 1,3 мільярда осіб. Впровадження удосконалених ХЗЗР, інноваційних технологій їх внесення, а також інтеграція хімічних, фізичних і біологічних методів буде сприяти оптимізації використання пестицидів (Directive 2009/127/EC, 2009; Fargnoli M. et al., 2019; Omelchuk S.T. et al., 2019; Whithaus S. and Blecker L., 2016).

Всебічна оцінка умов праці і розрахункове прогнозування ризику потенційного негативного впливу пестицидних препаратів на аграріїв, задіяних в їх застосуванні, є одним з обов'язкових етапів передреєстраційних випробувань таких формуляцій, в тому числі вже раніше вивчених та зареєстрованих, але які планується застосовувати за допомогою інноваційних агротехнологій внесення (Borysenko A. et al., 2021; Omelchuk S.T. et al., 2019).

Сучасне цифрове сільське господарство знаходиться на шляху постійного вдосконалення і сьогодні актуальним є внесення пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), технології обробки та висіву насіння 3Rive 3D і використання інжекторних форсунок. Ці технології є або абсолютно новими для аграрного сектору нашої держави, або ж знаходяться на ранній стадії впровадження у практику (інжекторні розпилювачі) (3RIVE 3D® Application System Program, 2021; Albeaino G. et al., 2021; McManus B.L. and Fuller B.W., 2017; Pappas R., 2016).

Вищезазначені інноваційні технології внесення хімічних засобів захисту рослин є маловивченими в науковому плані з позиції безпечності умов праці задіяних робітників, вживання продукції, вирощеної при їх застосуванні, та впливу на об'єкти навколишнього середовища. Такі технології малоапробовані на практиці і потребують окремої медико-санітарної та екологічної регламентації. Відсутня нормативно-правова база з питань проведення гігієнічної оцінки професійних ризиків та обґрунтування регламентів безпечного застосування засобів захисту рослин з їх допомогою.

Вищезазначене диктує необхідність глибокого та всебічного вивчення даної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є фрагментом ініціативно-пошукових науково-дослідних тем кафедри: «Гігієнічне обґрунтування наукових основ моніторингу різних груп та хімічних класів пестицидів у воді водойм господарсько-питного та культурно-побутового використання» (№ держреєстрації 0118U100472, 2019-2021); «Порівняльна гігієнічна оцінка та наукове обґрунтування підходів до гігієнічної регламентації інноваційних технологій застосування пестицидів» (№ держреєстрації 0122U000634, 2022-2024); госпдоговірних науково-дослідних робіт №№ держреєстрації: 0120U104013; 0121U111495; 0120U104013; 0121U111499; 0119U100292; 0119U103450; 0118U001296; 0118U001055; 0116U005961; 0117U006030; 0114U006506; 0116U005960; 0117U006021; 0113U000644.

Робота виконана відповідно до законів України «Про пестициди і агрохімікати» від 2 березня 1995 року № 86/95-ВР, «Про безпечність та якість харчових продуктів» від 23 грудня 1997 року № 771/97-ВР, «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» від 24 лютого 1994 року № 4004-ХІІ, «Про систему громадського здоров'я» від 06 вересня 2022 року № 2573-ІХ.

Мета дослідження: порівняльна гігієнічна оцінка та наукове обґрунтування підходів до гігієнічної регламентації інноваційних технологій застосування пестицидів для мінімізації потенційного ризику для здоров'я працівників сільського господарства і населення та зниження пестицидного навантаження на об'єкти довкілля.

Завдання дослідження:

1. Узагальнити дані та провести порівняльну еколого-гігієнічну оцінку інноваційних технологій застосування пестицидів за допомогою інжекторних розпилювачів, 3Rive 3D технології та внесення їх з повітря за допомогою БПЛА.

2. Проаналізувати та систематизувати пестициди, дозволені до використання в сучасному сільськогосподарському виробництві України, з позицій їх можливого використання в досліджуваних інноваційних технологіях.

3. Вивчити динаміку, проаналізувати особливості міграції в навколишньому середовищі та оцінити залишкові кількості ципроконазолу, диквату диброміду, біфентрину та азоксистробіну в об'єктах довкілля, оцінити їх ризик для навколишнього середовища при застосуванні препаратів Амістар Екстра 280 SC, КС, Реглон Ейр 200 SL, РК, Альфа-Дикват Форте, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС на їх основі.

4. Провести оцінку ризику для непрофесійних контингентів при вживанні контамінованої пестицидами води та сільськогосподарської продукції, вирощеної при застосуванні інноваційних технологій внесення ХЗЗР.

5. Провести оцінку та порівняльний аналіз умов праці та ризику для професійних контингентів ципроконазолу, диквату диброміду, біфентрину та азоксистробіну при застосуванні препаратів Амістар Екстра 280 SC, КС, Реглон Ейр 200 SL, РК, Альфа-Дикват Форте, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС на їх основі за допомогою інжекторних розпилювачів, 3Rive 3D технології та внесення їх з повітря з БПЛА у відповідності до існуючих методичних підходів.

6. Розробити та впровадити в практику застосування ХЗЗР інструкції та методичні рекомендації щодо створення безпечних умов при внесенні пестицидів за допомогою інжекторних розпилювачів та БПЛА.

7. Розробити розрахункові моделі для забезпечення оптимальних умов внесення та безпечного дрейфу крапель пестицидних препаратів при обробці сільськогосподарських культур з використанням БПЛА.

8. Науково обґрунтувати методичні підходи до медико-санітарної оцінки та розрахунків потенційного ризику для професійних контингентів при використанні БПЛА для внесення ХЗЗР.

9. Обґрунтувати вимоги, розробити гігієнічні регламенти безпечного використання та рекомендації щодо контролю за застосуванням пестицидних препаратів за допомогою інжекторних розпилювачів, 3Rive 3D технології та внесення їх з повітря з БПЛА.

Об'єкт дослідження: гігієнічні аспекти та особливості медико-санітарної регламентації хімічних засобів захисту рослин при їх застосуванні в інноваційних технологіях (3Rive 3D технологія, внесення з повітря за допомогою БПЛА та інжекторному внесенні).

Предмет дослідження: поведінка в об'єктах навколишнього та виробничого середовища, небезпечність для працюючих, населення та довкілля ципроконазолу, диквату диброміду, біфентрину та азоксистробіну при застосуванні препаратів Амістар 280 SC, КС, Реглон Ейр 200 SL, РК, Альфа-Дикват Форте, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС на їх основі в інноваційних технологіях, а саме динаміка залишкових кількостей ципроконазолу, диквату диброміду, біфентрину та азоксистробіну в повітряному середовищі, ґрунті, воді, зелених рослинах; вміст досліджуваних діючих речовин в зерні та олії; умови праці та професійний ризик, ризик забруднення ґрунтових та поверхневих вод, ризик для населення при споживанні сільськогосподарської продукції.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті проведеного дослідження вперше в Україні було:

- здійснено порівняльну еколого-гігієнічну оцінку інноваційних технологій застосування пестицидів за допомогою інжекторних розпилювачів, 3Rive 3D технології та внесення їх з повітря за допомогою БПЛА;

- систематизовано пестициди, дозволені до використання в сучасному сільськогосподарському виробництві України, з позицій їх можливого застосування в інноваційних технологіях внесення;

– визначено особливості поведінки діючих речовин досліджуваних пестицидів в об'єктах агроценозу, оцінена їх екотоксикологічна небезпечність, персистентність у ґрунтах України та ризик забруднення ними ґрунтових вод при їх застосуванні в інноваційних технологіях внесення;

– оцінено умови праці та професійні ризики ципроконазолу, диквату диброміду, біфентрину та азоксистробіну при застосуванні препаратів Амістар Екстра 280 SC, КС, Реглон Ейр 200 SL, РК, Альфа-Дикват Форте, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС на їх основі за допомогою інжекторних розпилювачів, 3Rive 3D технології та внесення їх з повітря з БПЛА у відповідності до існуючих методичних підходів;

– розроблено та впроваджено в практику застосування ХЗЗР інструкції та методичні рекомендації щодо створення безпечних умов при внесенні пестицидів за допомогою інжекторних розпилювачів та БПЛА;

– науково обґрунтовано методичні підходи до медико-санітарної оцінки та розрахунків потенційного ризику для професійних контингентів при використанні БПЛА для внесення ХЗЗР та запропоновано доповнення до методичних рекомендацій щодо оцінки та зменшення ризиків для працівників, які виконують внесення пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів;

– розроблено спосіб оцінки нових технологій внесення ХЗЗР з використанням заміника пестицидного препарату – синтетичного барвника Діамантового синього Е 133, та розроблений спосіб визначення його вмісту в сорбційному матеріалі (фільтрувальному папері), що включає вилучення барвника з сорбційного матеріалу дистильованою водою, твердофазову екстракцію та кількісне визначення Діамантового синього Е 133 методом обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії із спектрофотометричним детектуванням;

– на підставі проведеного комп'ютерного моделювання внесення пестицидів з повітря за допомогою БПЛА встановлено закономірності формування та поведінки аеродисперсних систем ХЗЗР;

– обґрунтовано розрахункові моделі прогнозування щільності покриття поверхні та радіусу розпилення пестицидного препарату при обробці сільськогосподарських культур з використанням БПЛА.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані доповнення до методичних рекомендацій щодо оцінки та зменшення ризиків для працівників, які виконують внесення пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів, дозволять забезпечити більш коректну оцінку професійних ризиків, пов'язаних із використанням цієї технології. Такий підхід сприяє створенню більш повного та збалансованого набору рекомендацій для операторів БПЛА, що в результаті забезпечує безпеку, ефективність та сталість використання цієї технології у сільському господарстві.

Розроблено спосіб визначення вмісту синтетичного барвника Діамантового синього Е 133 в сорбційному матеріалі (фільтрувальному папері), який може бути одним з етапів попередньої оцінки ефективності та безпечності застосування будь-яких пестицидних препаратів з різних моделей БПЛА, із різноманітними агротехнічними характеристиками, на етапі передреєстраційних випробувань та наукових досліджень.

Розроблено гігієнічні рекомендації з безпечного та ефективного використання розпилювачів для обробки сільськогосподарських культур пестицидами для зниження ризиків для здоров'я працівників, задіяних у обробці, а також зменшення пестицидного навантаження на довкілля. Особлива увага приділяється правильному вибору та налаштуванню обладнання, що знижує ймовірність неконтрольованого розповсюдження ХЗЗР. Сучасні підходи до безпечного застосування пестицидів допомагають відповідати міжнародним нормам і стандартам у сфері аграрного виробництва, що важливо для експорту та міжнародної торгівлі.

Розроблено, затверджено та опубліковано «Методичні рекомендації для безпечного використання пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА)», що регламентують використання безпілотних літальних апаратів коптерного типу для внесення пестицидів. Цей документ є важливим інструментом для забезпечення безпеки та ефективності використання агродронів у сільському господарстві, що сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки навколишнього природного середовища та здоров'я населення, позитивно вплине на розвиток технологій та їх впровадження, і в цілому на ведення бізнесу в Україні та створення для нього нових можливостей. Розроблені методичні рекомендації відображено в Інформаційному листі та видано у вигляді брошури.

Результати дослідження використані в навчальному процесі на гігієнічних кафедрах Національного медичного університету імені О.О. Богомольця, впроваджено у науково-дослідну роботу: ДУ «Вінницький обласний Центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України», Головного управління Держпродспоживслужби у Вінницькій області, Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва НАМНУ», Наукового центру превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки ім. Л.І. Медведя МОЗ України, Інституту гігієни та екології Національного медичного університету імені О.О. Богомольця.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 42 наукові праці, в яких відображені основні їх положення. Серед них – 21 стаття у фахових виданнях України та закордонних фахових виданнях, з яких – 7 статей у виданнях, що цитовані в SCOPUS, та 17 тез доповідей на конференціях і конгресах. Матеріали дисертації відображені у 2 інформаційних листах та 2 брошурах.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу та 6 розділів, які включають огляд літератури, матеріали і методи дослідження, результати власних досліджень (3 розділи), аналіз і узагальнення результатів дослідження, висновки, список використаних джерел (372 найменування – 142 кирилицею, 230 – латиницею) та додатки. У роботі наведено 37 таблиць, 25 рисунків та 40 додатків. Основний зміст викладено на 329 сторінках машинописного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Програма, об'єкти та методи дослідження. Для досягнення визначеної мети та реалізації поставлених завдань дисертаційної роботи була розроблена програма, яка передбачала проведення експертно-аналітичних досліджень, лабораторних експериментів і натурних спостережень. Узагальнена інформація про етапи, об'єкти, методи та обсяг досліджень наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Етапи, об'єкти, методи та обсяг досліджень

№ з/п	Етап	Об'єкт	Методи	Обсяг
1	Порівняльна гігієнічна оцінка сучасних технологій внесення пестицидів та класичних методів обробки сільськогосподарських культур	Технологічні особливості, метеорологічні умови, гігієнічні та екологічні аспекти сучасних технологій внесення	Аналіз даних літератури та інтернет-ресурсів	134
2	Експертно-аналітична оцінка асортименту пестицидів в Україні	Асортимент та кількісне співвідношення пестицидів в Україні	Аналіз даних літератури та інтернет-ресурсів	7
3	Натурні експерименти з гігієнічної оцінки умов праці при застосуванні досліджуваних препаратів	Препарати Реглон Ейр 200 SL, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС, Амістар Екстра 280 SC, КС, Альфа-Дикват Форте, РК, повітря атмосферне та робочої зони, працівники, ґрунт, нашивки на спецодязі, змиви зі шкіри працівників	1. Фізичні: температура повітря, вологість, швидкість руху повітря та атмосферний тиск 2. Високоєфективна рідинна хроматографія 3. Газорідинна хроматографія 4. Спектрофотометричний метод 5. Розрахунок коефіцієнту можливості інгаляційного отруєння 6. Розрахунок коефіцієнтів вибіркості дії 7. Розрахунок професійного ризику	1. 27 2. 258 3. 298 4. 276 5. 18 6. 36 7. 150

Продовження таблиці 1

№ з/п	Етап	Об'єкт	Методи	Обсяг
4	Розрахунок і оцінка ризиків для людини при споживанні контамінованої сільськогосподарської продукції, води	Ципроконазол, азоксистробін, дикват дибромід, біфентрин, зелена маса досліджуваних рослин, плоди, ґрунт	1. Розрахунок інтегрального показника небезпечності при вживанні контамінованих продуктів харчування (ІПНВП) 2. Розрахунок інтегрального показника небезпечності при вживанні контамінованої води (ІПНВ)	1. 20 2. 12
5	Розробка способу визначення вмісту синтетичного барвника Діамантового синього Е 133 в сорбційному матеріалі методом високоефективної рідинної хроматографії	Барвник Діамантовий синій Е 133, сорбційний матеріал	1. Твердофазова екстракція 2. Дериватизація 3. Обернено-фазова високоефективна рідинна хроматографія 4. Метод абсолютного калібрування шляхом побудови градууювальних залежностей 5. Статистичний метод 6. Метод математичного моделювання	1. 40 2. 40 3. 40 4. 1 5. 6 6. 1
6	Моделювання натурального експерименту з визначення щільності розподілу та зносу пестицидів при застосуванні з БПЛА	БПЛА, барвник Діамантовий синій Е 133, сорбційний матеріал	1. Фізичні: температура повітря, вологість, швидкість руху повітря та атмосферний тиск 2. Високоефективна рідинна хроматографія	1. 33 2. 2244

Продовження таблиці 1

№ з/п	Етап	Об'єкт	Методи	Обсяг
			3. Математичне моделювання	3. 20
7	Комп'ютерне моделювання потоків руху повітря та дрейфу пестицидів при застосуванні БПЛА	3D-моделі агродрону, програмне забезпечення SolidWorks	1. Інтеграція технічних характеристик агродрону 2. 3D-моделювання руху потоків повітря та дрейфу пестицидів 3. Візуалізація руху потоків повітря та дрейфу пестицидів	1. 9 2. 2 3. 2
8	Натурні та лабораторні дослідження з вивчення поведінки досліджуваних д.р. в об'єктах довкілля	Сполуки ципроконазол, азоксистробін, дикват дибромід, біфентрин, зелена маса досліджуваних рослин, плоди, ґрунт, повітря, вода	1. ВЕРХ 2. Газорідинна хроматографія 3. Спектрофотометричний метод 4. Математичне моделювання 5. Розрахунок очікуваної концентрації у підземних водах (SCI-GROW) 6. Розрахунок індексу потенційного вимивання (GUS) 7. Розрахунок індексу потенційного вимивання (LEACH)	1. 156 2. 165 3. 156 4. 9 5. 12 6. 12 7. 12
9	Аналіз та статистична обробка одержаних результатів	Цифрові масиви	1. Варіаційна статистика 2. Оцінка достовірності розходжень 3. Кореляційний аналіз 4. Регресійний аналіз	1. 2404 2. 557 3. 25 4. 22

Статистичну обробку результатів проводили з використанням пакету статистичних програм IBM SPSS StatisticsBase v.23, MedStat v.5.2 (Copyright © 2003-2019) та Microsoft® Excel® для Microsoft 365 MSO (версія 2305 збірка 16.0.16501.20074) (Ідентифікатор ліцензії: CWW_0071e48a-250c-4bdb-9013-b8daf357b5e9_b5685e92-c95d-4399-9b83-449d76a26fb6_79f3b2da2f9adcda29).

При статистичному аналізі отриманих даних використано описову статистику (визначення середнього значення (медіани) та похибки середнього (медіани), дисперсії вибірок, середнього квадратичного відхилення, визначення частки); порівняння середніх значень змінних здійснювали за допомогою параметричного методу (t-критерію Ст'юдента) при нормальному розподілі ознак, що виражені в інтервальній шкалі; при розподілі, що відрізняється від нормального, порівняння вибірок здійснювали за T- та W-критерієм Вілкоксона. Достовірними вважали відмінності з рівнем значущості більше 95 % ($p < 0,05$).

Перевірку відповідності емпіричних даних закону нормального розподілу здійснювали за критерієм W Шапіро-Уїлка.

Основні результати дослідження та їх обговорення.

На сьогоднішній день існує багато технологій внесення пестицидів, таких як штангова обробка, вентиляторна, ранцева, авіаційна тощо. Основними їх недоліками є використання великих об'ємів робочого розчину, втрати врожаїв від механічного пошкодження, нецільові втрати пестициду, залучення великої кількості працівників при обробці, високі ризики забруднення об'єктів навколишнього середовища.

В той же час все більшого поширення набувають гідравлічні інжекторні розпилювачі, які, за даними фірм-виробників та літературними джерелами, мають ряд суттєвих переваг в ефективності застосування ХЗР, економічному та гігієнічному аспектах.

3Rive 3D технологія внесення пестицидів від компанії FMC є революційною платформою для захисту рослин від шкідників, бур'янів, хвороб, що дає агропідприємцям можливість екстенсивніше вести господарство. Система інтегрує технологію формуляцій, технологію внесення та активні інгредієнти для ефективного охоплення більшої площі обробки за короткий проміжок часу з меншою кількістю заправок, заощаджуючи воду, паливо, робочу силу та час. Система підходить для більшості основних марок сівалок і забезпечує точний захист кожної рослини.

Цифрове сільське господарство стало однією з найперспективніших технологій, що забезпечить стійке використання ресурсів при одночасному задоволенні глобальних потреб у кількості та якості. Одним із інноваційних витків його розвитку є використання БПЛА. Експерти стверджують, що Україна – один з найпривабливіших та найбільших ринків для використання сільськогосподарських БПЛА у Європі. Ця технологія має ряд суттєвих переваг технічного, економічного, біологічного характеру (Rejeb A. et al., 2022; Tsouros D.C. et al., 2019), які наведено в таблиці 2.

**Порівняльна оцінка «традиційних» технологій внесення ХЗЗР
та за допомогою БПЛА**

«Традиційні» технології внесення	БПЛА
Трудомісткий і менше ефективний процес.	Зручно, швидко і високоефективно.
Високий ризик впливу пестициду на оператора задіяного при ранцевому, тракторному чи авіаційному внесенні.	Відсутність / мінімальний вплив під час внесення пестициду.
Пестицидне навантаження на об'єкти навколишнього середовища більше.	Пестицидне навантаження на об'єкти навколишнього середовища нижче.
Неправильне внесення та нерівномірне покриття, спричинене некваліфікованими діями професійного контингенту (висота штанги, темп ходьби та ін.).	Автономна робота дрону з постійною швидкістю та висотою польоту; наявність RTK/GPS забезпечує точне розпилення з рівномірним покриттям.
Більші витрати ХЗЗР та води.	Менші витрати ХЗЗР та води.
Низька рентабельність інвестицій (трудомісткість, більше споживання води, збільшення вартості праці).	Краща рентабельність інвестицій.

Реєструючи хімічні засоби захисту рослин для використання з БПЛА, важливо переконатися, що препарати включені до переліку дозволених засобів для внесення з повітря. Це гарантує, що продукти безпечні для застосування з повітря та відповідають нормативним вимогам для цього методу обробки. При аналізі динаміки асортименту хімічних засобів захисту рослин в Україні спостерігалось значне зростання обсягів їх використання і ця тенденція не має ознак сповільнення. Загальна кількість зареєстрованих засобів захисту рослин за період 2010-2022 років зросла з 779 до 2023 (з них комбінованих: з 157 до 655). Серед них для внесення авіаційним методом: абсолютний приріст за 12 років становить 5,3%, складений середньорічний темп зростання – 27,4 % на рік, а темп приросту – 198,6 %. На момент початку наших досліджень в Україні не було зареєстровано жодного препарату для застосування за допомогою безпілотних літальних апаратів (рис. 1).

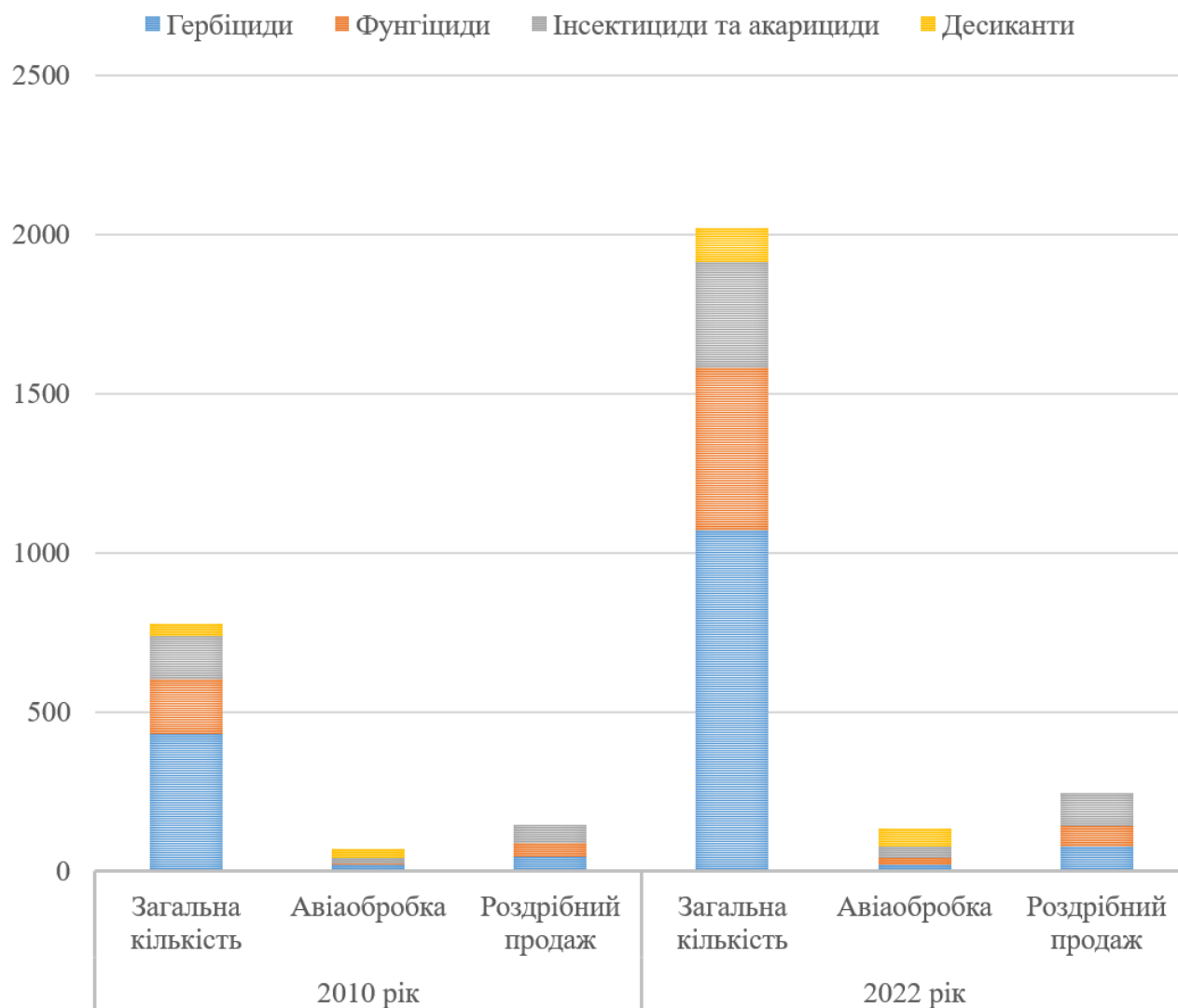


Рис. 1. Зареєстровані хімічні засоби захисту рослин в Україні

В результаті проведених натурних експериментів встановлено, що діючі речовини препаратів Альфа-Дикват Форте, РК; Амістар Екстра 280 SC, КС; Реглон Ейр 200 SL, РК; Брігейд 3Rive 3D, КС мають низьку здатність до накопичення в об'єктах навколишнього середовища та руйнуються протягом одного вегетаційного періоду при внесенні їх за допомогою БПЛА, інжекторних форсунок і 3Rive 3D технології. Відмінності серед показників деградації представлених діючих речовин, котрі були розраховані для штангової обробки з повітряно-інжекторними форсунками та за допомогою БПЛА, можна пов'язати із різними типами ґрунтів та клімато-погодними умовами (достовірно швидше зникали азоксистробін та ципроконазол під час внесення із повітря за допомогою БПЛА: за критерієм Ст'юдента $t=10,3$; $p<0,001$ та $t=4,32$; $p=0,012$ відповідно). Необхідно зазначити той факт, що швидкість зникнення активних хімічних сполук в ґрунті залежить від значення його рН, метеорологічних параметрів, вологості та температури ґрунту, сонячної активності (інтенсивності ультрафіолетового випромінювання), а також від внесеної кількості діючої речовини, а саме використання ультрамалооб'ємного та малооб'ємного внесення.

Результати проведених натурних досліджень з використанням інноваційних технологій внесення ХЗР (повітряно-інжекторні форсунки, БПЛА, 3Rive 3D технологія) в агрокліматичних умовах України з визначення стійкості в ґрунті азоксистробіну, ципроконазолу, диквату дибромід та біфентрину свідчать про їх персистентність, що відповідає нижнім рівням або навіть і меншим від раніше встановлених діапазонів в ґрунтах інших країн в умовах даних обробок.

Обов'язковою частиною нашого дослідження була оцінка міграційної здатності досліджуваних д.р. по профілю ґрунту та аналіз ризиків вживання потенційно забрудненої води населенням. Встановлено, що за значенням константи сорбції дикват дибромід та біфентрин відносяться до немобільних сполук у ґрунті (5 клас), азоксистробін – мало мобільний (4 клас), ципроконазол – помірно мобільний (3 клас) (табл. 3).

Таблиця 3

Мобільність в ґрунтово-кліматичних умовах України

Критерії оцінки	LEACH _{mod} [*] у.о.*	GUS*	K _{oc} , мг/л	S _w [*] мг/л	τ ₅₀ у ґрунті, діб*	SCI- GROW, мкг/л	τ ₅₀ у воді, діб
азоксистробін							
Величина показника	7,2×10 ⁻²	0,96	589	6,7	6,4	3,83×10 ⁻¹	6,1
Клас небезпечності	3	5	4	-	IV	-	II
ципроконазол							
Величина показника	4,1×10 ⁻¹	0,28	364	93	1,6	3,46×10 ⁻¹	40
Клас небезпечності	3	5	3	-	IV	-	I
дикват дибромід							
Величина показника	2,9×10 ⁻⁸	-1,2	236610	0,001	7,0	5,35×10 ⁻³	1
Клас небезпечності	3	6	5	-	IV	-	III
біфентрин							
Величина показника	1,2	-1,4	2184750	718000	3,6	5,35×10 ⁻³	8
Клас небезпечності	2	6	5	-	IV	-	II

Примітки: LEACH_{mod} – індекс вилуговування; у.о. – умовні одиниці; GUS – ground ubiquity score (індекс потенційного вимивання); K_{oc} – константа сорбції органічним вуглецем; S_w – розчинність речовини у воді; τ₅₀ – період напівруйнування речовини, SCI-GROW – скринінг концентрації пестицидів у ґрунтових водах, мкг/л; * – власні дані.

Для досліджуваних сполук існує дуже низький (азоксистробін та ципроконазол) та надзвичайно низький (дикват дибромід та біфентрин) ризик вимивання в ґрунтові води за індексом GUS. Однак, ризик вимивання в поверхневі води за індексом LEACH_{mod} для надзвичайно високорозчинного у воді біфентрину помірний (2 клас), для решти сполук – низький (3 клас) (табл. 3). За інтегральним показником безпеки споживання води (Антоненко А.М., 2016) ципроконазол відноситься до надзвичайно небезпечних сполук (1А клас); біфентрин – до небезпечних сполук (2 клас); азоксистробін та дикват дибромід є помірно небезпечними (3 клас).

Отримані в результаті проведення натурних гігієнічних експериментів дані дозволяють стверджувати, що залишкові кількості досліджуваних діючих речовин в сільськогосподарських культурах, вирощених з використанням інноваційних технологій, поступово знижувались і при зборі врожаю їх рівні в рослинній продукції були нижче межі кількісного визначення відповідного методу і не перевищували встановлені для сполук максимально допустимі рівні (МДР) (рис. 2, 3, 4).

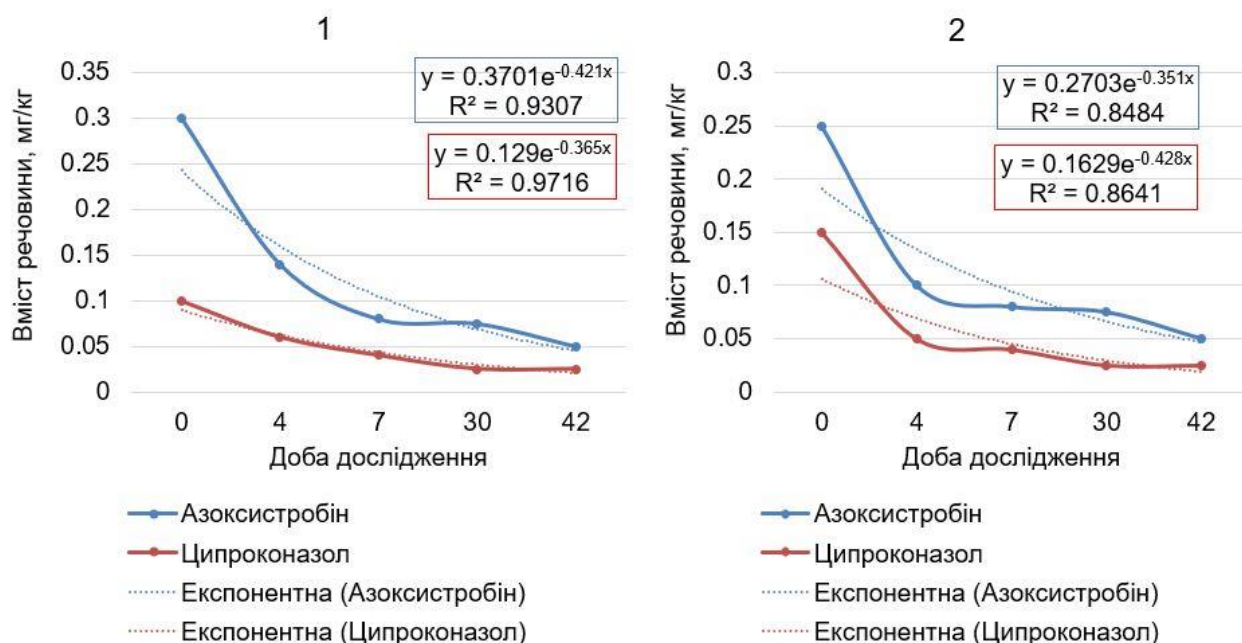


Рис. 2. Динаміка вмісту азоксистробіну та ципроконазолу в сої при внесенні препарату Амістар Екстра 280 SC, КС з використанням інжекторних розпилювачів (1) та БПЛА (2)

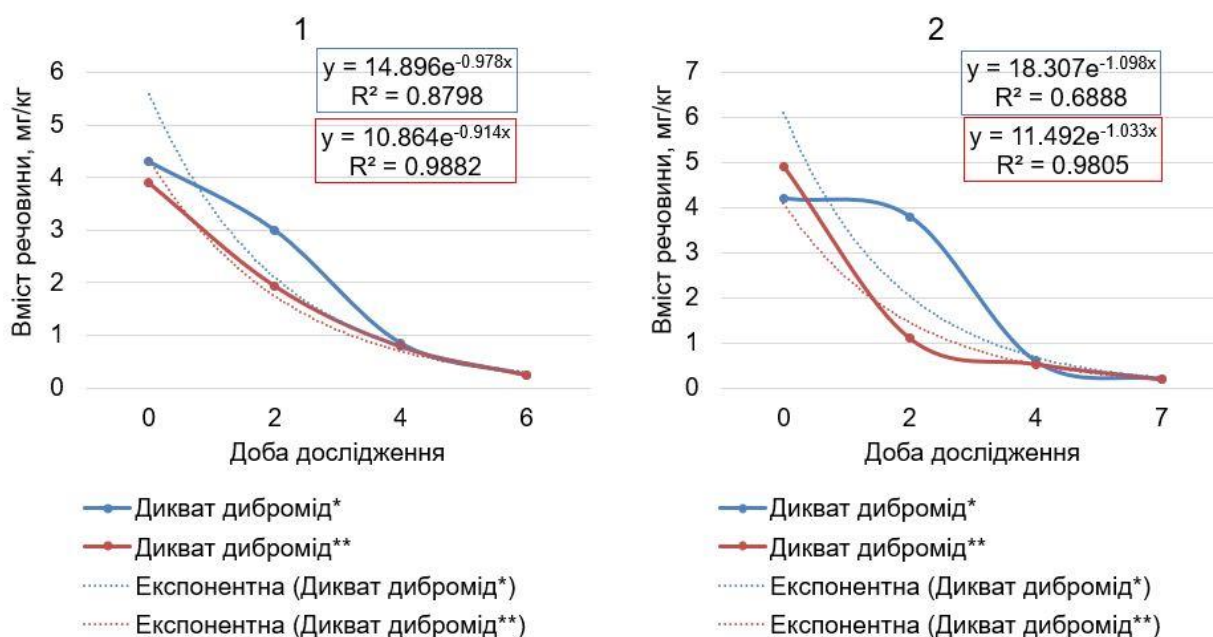


Рис. 3. Динаміка вмісту диквату диброміду в соняшнику (1) та ріпаку (2) при внесенні препаратів Альфа-Дикват Форте, РК (*) та Реглон Ейр 200 SL, РК (**) з використанням БПЛА

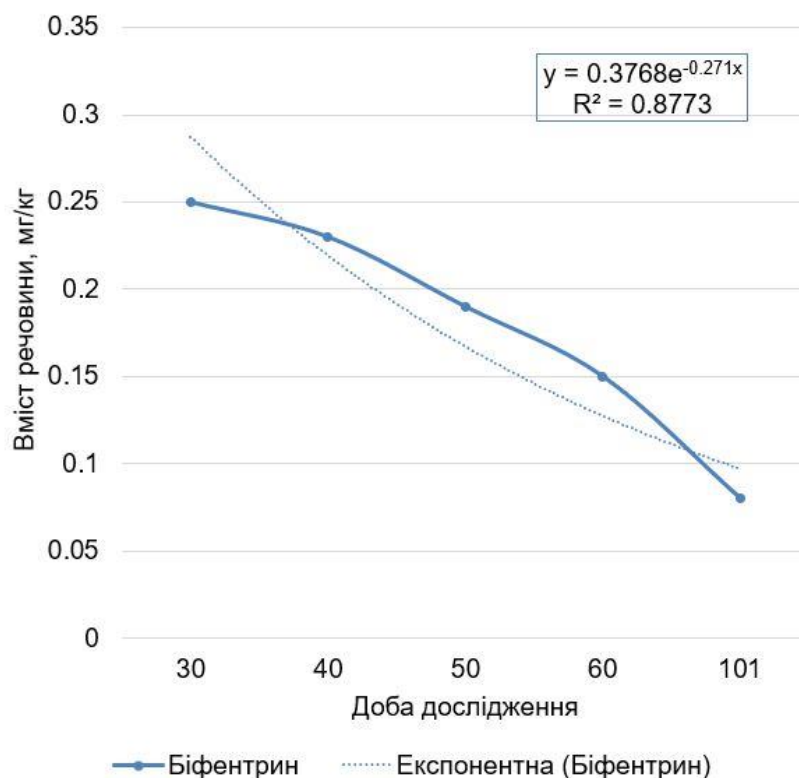


Рис. 4. Динаміка вмісту біфентрину в кукурудзі при застосуванні препарату Брігейд 3Rive 3D, КС з використанням 3Rive 3D технології

При розрахунку коефіцієнтів швидкості руйнування діючих речовин досліджуваних пестицидів при внесенні їх різними способами було встановлено, що середні значення τ_{50} азоксистробіну при штанговій обробці з використанням повітряно-інжекторних форсунок, становлять 22,2 доби, τ_{95} – 96,1 доби і τ_{99} – 147,8 доби, константа швидкості руйнації дорівнює 0,03. Необхідно відмітити, що період напівруйнування азоксистробіну при штанговій обробці з повітряно-інжекторними форсунками порівняно із штанговою обробкою із щільовими форсунками (де застосовувався подібний за складом та нормою витрат препарат Амістар Екстра Голд 280 ОД, МД), достовірно не відрізнявся ($22,2 \pm 0,01$ проти $23,72 \pm 1,5$ доби; за критерієм Ст'юдента: $t=1,01$ при $p=0,342$). Вищезазначені результати дозволяють віднести сполуку за стійкістю у рослинах до небезпечних пестицидів – 2 клас небезпечності.

При штанговій обробці з використанням повітряно-інжекторних форсунок величина τ_{50} в рослинах ципроконазолу становить 17,7 доби, τ_{95} – 76,7 доби і τ_{99} – 118,0 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,04, що також є подібним до значень, отриманих іншими авторами в ЄС (Lewis K.A. et al., 2016). При порівнянні із вітчизняними джерелами (Кондратюк М.В., 2019) було встановлено, що τ_{50} ципроконазолу в рослинах при штанговій обробці із щільовими форсунками за агрокліматичних умов України становить $23,79 \pm 1,2$ доби і це значення є достовірно вищим порівняно із результатами отриманими при штанговій обробці з повітряно-інжекторними форсунками – $17,7 \pm 0,2$ (за критерієм Ст'юдента: $t=5,00$ при $p=0,001$). Вищевикладені дані дозволяють віднести сполуку за стійкістю у рослинах до небезпечних пестицидів – 2 клас небезпечності.

При дослідженні швидкості руйнації діючих речовин в рослинах після внесення препарату Амістар Екстра 280 SC, КС з повітря за допомогою БПЛА, τ_{50} азоксистробіну склала 14,7 доби, τ_{95} – 63,8 доби і τ_{99} – 98,1 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,05. τ_{50} ципроконазолу склала 16,0 доби, τ_{95} – 69,4 доби і τ_{99} – 106,8 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,04. Отримані результати є подібними до тих, які були отримані при традиційній авіаобробці під час застосування препарату Амістар Екстра Голд 280 OD, МД ($16,9 \pm 1,12$ та $16,84 \pm 1,32$ для азоксистробіну та ципроконазолу відповідно) та достовірно не відрізнялися за критерієм Ст'юдента: для азоксистробіну – $t=1,97$ при $p=0,106$; для ципроконазолу – $t=0,64$ при $p=0,550$ (Кондратюк М.В., 2019).

Було проведено порівняння між періодами напівруйнування представлених діючих речовин препарату Амістар Екстра 280 SC, КС, котрі були розраховані для штангової обробки з повітряно-інжекторними форсунками та для БПЛА, і встановлено, що при внесенні з БПЛА спостерігалось достовірно швидше зникнення з рослин (за критерієм Ст'юдента $p=0,001$ для обох діючих речовин).

Після десикації насаджень ріпаку та соняшнику препаратами Альфа-Дикват Форте, РК та Реглон Ейр 200 SL, РК з повітря за допомогою БПЛА відмічається досить швидка деградація діючої речовини в зеленій масі рослини. Отримана величина τ_{50} диквату диброміду в ріпаку склала 2,0 доби, τ_{95} – 8,5 доби і τ_{99} – 13,0 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,4. Швидкість розкладання у зеленій масі соняшнику була подібною до такої як в досліді на ріпаку. Величина τ_{50} диквату диброміду в соняшнику склала 1,5 доби, τ_{95} – 6,5 доби і τ_{99} – 10,0 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,5. Швидкість розкладання у зеленій масі обох рослин не відрізнялася (за критерієм Ст'юдента: $t=1,53$ при $p=0,157$). Отже, відповідно до отриманих результатів, за періодами напіврозпаду дикват диброміду можна віднести до малонебезпечних (4 клас небезпечності).

При внесенні препарату Брігейд 3Rive 3D, КС з використанням 3Rive 3D технології, τ_{50} біфентрину в кукурудзі становила 11,3 доби, τ_{95} – 48,8 доби і τ_{99} – 75,0 доби, константа швидкості руйнації дорівнювала 0,06, що відповідає отриманим середнім величинам в інших дослідженнях (Chauhan R. et al., 2012; Tewary D.K. et al., 2005). Відповідно до ДСанПіН 8.8.1.2.002-98, за показниками стійкості у вегетуючих сільськогосподарських культурах та сільськогосподарській сировині біфентрин можна віднести до помірно небезпечних сполук (3 клас небезпечності).

Розраховані інтегральні показники небезпечності при потенційному надходженні сполук до організму людини з харчовими продуктами, вирощеними з використанням інжекторних форсунок, за допомогою БПЛА, 3Rive 3D технології внесення пестицидів. Азоксистробін належить до сполук 4 класу безпеки, ципроконазол, дикват дибромід та біфентрин до сполук 3 класу безпеки. Результати, які отримані нами стосовно ймовірності забруднення сільськогосподарської продукції досліджуваними пестицидами, корелюють з оцінкою інших фахівців у цій галузі (Антоненко А.М. та ін., 2018; Руда Т.В. та ін., 2017; Chai Y. et al., 2022; Omelchuk S.T. et al., 2019).

Встановлено, що ймовірність виникнення інгаляційного отруєння для працівників діючими речовинами препаратів при їх внесенні за допомогою інноваційних технологій низька, на що вказує показник коефіцієнту можливості

інгаляційного отруєння менше 0,5, за яким сполуки віднесено до IV класу небезпеки – малонебезпечні (табл. 4).

Таблиця 4

**Оцінка небезпеки виникнення гострих токсичних ефектів
при застосуванні інноваційних технологій**

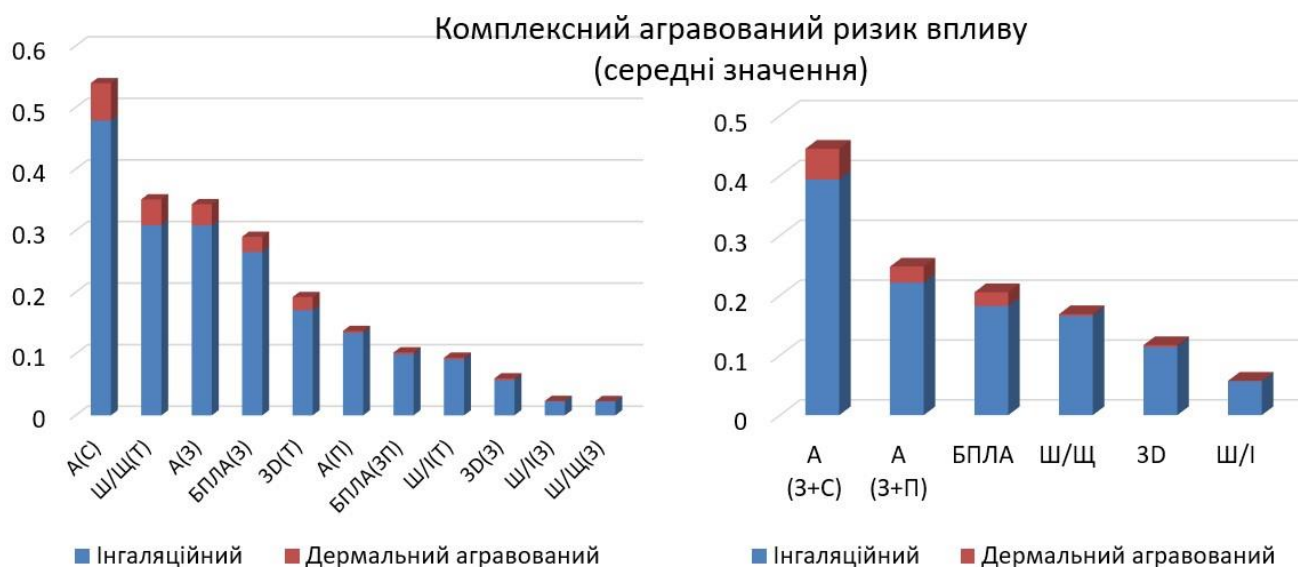
Інноваційна технологія внесення	Назва препарату	Діюча речовина	КМЮ	Діюча речовина		Препаративна форма	
				КВД _{інг.}	КВД _{д.}	КВД _{інг.}	КВД _{д.}
Інжекторні розпилювачі	Амістар Екстра	ципроконазол	$6,4 \times 10^{-9}$	695	1543	24	412
		азоксистробін	$1,9 \times 10^{-11}$	35	617		
БПЛА	Альфа-Дикват Форте	дикват диброміду	$1,2 \times 10^{-6}$	17	82	13	83
	Реглон Ейр	дикват диброміду	$1,2 \times 10^{-6}$	25	124	3	54
3Rive3D технологія	Брігейд 3Rive 3D	біфентрин	$2,8 \times 10^{-6}$	57	645	17	100

Примітки: 1. КМЮ – коефіцієнт можливості інгаляційного отруєння; 2. КВД_{інг.} – коефіцієнт вибіркової дії пестициду при інгаляційному впливі; 3. КВД_{д.} – коефіцієнт вибіркової дії пестициду при дермальному впливі.

Всі досліджувані діючі речовини характеризуються достатньою вибірковістю дії і низькою вірогідністю виникнення гострих дермальних ефектів. Виключенням є дикват дибромід в складі препарату Альфа-Дикват Форте, РК, показник КВД_{д.} якого становить 82 (табл. 4). Значення КВД_{інг.} азоксистробіну, дикват диброміду, біфентрину коливаються в межах 17-57, що свідчить про відносно низьку вибірковість їх дії та більшу небезпеку гострих інгаляційних токсичних ефектів для операторів при проведенні обробок. Досліджувані препаративні форми та їх діючі речовини мають значно вищий КВД_{д.} ніж КВД_{інг.} (в 2,2-17,6 разів), що свідчить про більшу імовірність виникнення гострих інгаляційних отруєнь у працівників, що є приводом для обов'язкового контролю використання ними індивідуальних засобів захисту органів дихання.

Встановлено, що найвищим комплексний аграрований ризик серед технологічних операцій був у сигнальників під час традиційної авіаційної обробки (достовірним порівняно із ризиком впливу у зовнішніх пілотів БПЛА, пілотів традиційної обробки, заправників та трактористів задіяних у штанговій обробці з інжекторними форсунками та заправниками, задіяних в штанговій обробці з щільовими форсунками); найнижчий комплексний аграрований ризик впливу було розраховано у заправників, задіяних у штанговій обробці оснащених як інжекторними, так і щільовими форсунками (недостовірна різниця була лише порівняно із заправниками задіяними в 3RIVE 3D обробці та трактористами при штанговій обробці з обома типами форсунок).

Найвищий комплексний аграрований ризик відмічено під час традиційної авіаобробки (за умови виконання двох технологічних операцій однією особою в комбінаціях заправник+пілот та заправник+сигнальник при традиційній авіаобробці, заправник+зовнішній пілот при застосуванні БПЛА, заправник+тракторист при штанговій обробці та 3RIVE 3D технології), достовірно найнижчим ризик був під час обробки штанговим оприскувачем оснащеним щільовими та інжекторними форсунками. Комплексний аграрований ризик впливу під час виконання технологічних операцій 3RIVE 3D та штангової обробки із щільовими та інжекторними форсунками достовірно не відрізнявся (рис. 5).



Примітки: 1. «3D(З)» – Заправник (обробка з використанням 3Rive3D технології); 2. «3D(Т)» – Тракторист (обробка з використанням 3Rive3D технології); 3. «Ш/Щ(З)» – Заправник (штангова обробка, щільові розпилювачі); 4. «Ш/Щ(Т)» – Тракторист (штангова обробка, щільові розпилювачі); 5. «Ш/І(З)» – Заправник (штангова обробка, інжекторні розпилювачі); 6. «Ш/І(Т)» – Тракторист (штангова обробка, інжекторні розпилювачі); 7. «А(З)» – Заправник (авіаобробка «традиційна»); 8. «А(С)» – Сигнальник (авіаобробка «традиційна»); 9. «А(П)» – Пілот (авіаобробка «традиційна»); 10. «БПЛА(З)» – Заправник (авіаобробка з використанням БПЛА); 11. «БПЛА(ЗП)» – Зовнішній пілот (авіаобробка з використанням БПЛА).

Рис. 5. Порівняння ризиків впливу при виконанні технологічних операцій з внесення пестицидів традиційними та інноваційними технологіями

З метою розробки наукової бази для медико-санітарної оцінки безпечного застосування нової технології внесення пестицидів з повітря за допомогою БПЛА нами було проведено ряд досліджень з використанням найпоширеніших моделей агродронів в експериментальних та реальних клімато-погодних умовах України.

На заміну пестициду нами було експериментально використано харчовий барвник Діамантовий синій Е 133 для спрощення та уніфікації проведення науково-експериментальних досліджень застосування пестицидів за допомогою БПЛА. Тому першим етапом була розробка методу визначення вмісту синтетичного барвника Діамантового синього Е 133 в сорбційному матеріалі методом обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) з спектрофотометричним (СФ) детектуванням. Запропонований спосіб дозволяє визначати вміст барвника в

фільтрувальному папері з точністю 98 % з межею кількісного визначення 0,125 мг/кг, що суттєво спростило оцінку ефективності та безпечності внесення пестицидів з використанням різних моделей БПЛА на етапі передреєстраційних випробувань та наукових досліджень.

Наступним було проведення дослідження за різних змінних параметрів розпилення, таких як тип форсунки, швидкість та висота його руху БПЛА за розробленою схемою. Встановлено, що найвищий вміст досліджуваної сполуки виявлено безпосередньо під проекцією щільових форсунок та пропелерами агродрону і починав спадати на відстані від 80 см, із наступним зниженням до відстані 250 см за висоти обробки 2 та 3 метри та 450 см (за умови обробки з висоти 4 метри), де кількість речовини на одиницю площі мала майже нульове значення. Натомість, за умови застосування повітряно-інжекторних форсунок в центральній зоні спостерігався менший вміст діючої речовини, що збільшувався до відстані 80-120-190 см (внесення з висоти 2 м, 3 м та 4 м відповідно), і потім знижувався до відстані 172-277-330 см (внесення з висоти 2 м, 3 м та 4 м відповідно), що може бути пов'язано із просторовим розташуванням вищезазначених форсунок. В ході перевірки залежності вмісту досліджуваної речовини від висоти руху БПЛА було встановлено позитивний зв'язок слабкої сили ($r = 0,044$). Аналогічна ситуація спостерігалася при встановленні залежності між вмістом Діамантового синього Е 133 та швидкістю руху агродрона ($r = 0,086$).

Відповідно до отриманих результатів, що відображено на рисунку 6, можна зробити попередні висновки, що тип форсунки достовірно не впливав на загальну кількість речовини, що потрапила на одиницю площі по всій ширині покриття, а також, що вміст діючої речовини на досліджуваних інтервалах відстаней від осі прольоту БПЛА не мав достовірної різниці за відстанню (за W-критерієм Вілкоксона $p = 0,459-0,980$).

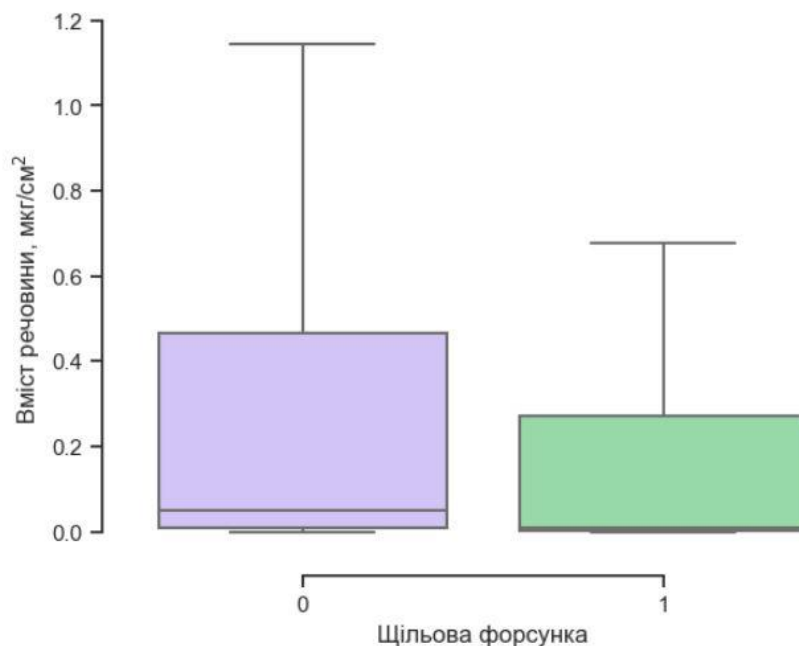


Рис. 6. Залежність вмісту діючої речовини від типу форсунки, де «0» – щільова, «1» – повітряно-інжекторна

На основі отриманих даних нами було побудовано графіки і визначено за допомогою поліноміальної регресії залежність між відстанню від центру прольоту агродрону та вмістом Діамантового синього Е 133; отримано лінію тренду і рівняння, яке цей тренд описує (табл. 5). Разом із цим були встановлені 100 та 95-відсоткові зони покриття під час роботи агродрону.

Таблиця 5

Рівняння лінії тренду, що описує залежність між вмістом діючої речовини та відстанню, на якій ця речовина визначалася (апроксимовані значення)

Дослід №	n	Рівняння регресії	R ²
1	204	$y=9,4E-01 \times x^6 + 1,4E-04 \times x^5 - 6,1E-06 \times x^4 - 3,5E-10 \times x^3 + 1,1E-11 \times x^2 + 5,2E-17 \times x - 4,6E-18$	0,98
2	204	$y=8,8E-01 \times x^6 + 1,6E-05 \times x^5 - 1,7E-05 \times x^4 - 1,7E-10 \times x^3 + 9,8E-11 \times x^2 + 3,9E-16 \times x - 1,7E-16$	0,94
3	204	$y=1,2 \times x^6 + 5,9E-05 \times x^5 - 2,5E-05 \times x^4 - 9,7E-10 \times x^3 + 1,8E-10 \times x^2 + 3,5E-15 \times x - 4,2E-16$	0,98
4	204	$y=6,5E-01 \times x^6 + 9,8E-06 \times x^5 - 4,0E-06 \times x^4 - 7,1E-11 \times x^3 + 8,4E-12 \times x^2 + 1,1E-16 \times x - 5,7E-18$	0,98
5	204	$y=8,4E-01 \times x^6 - 1,6E-05 \times x^5 - 1,1E-05 \times x^4 + 9,5E-11 \times x^3 + 3,6E-11 \times x^2 - 1,2E-16 \times x - 3,5E-17$	0,74
6	204	$y=1,1 \times x^6 + 8,8E-05 \times x^5 - 1,2E-05 \times x^4 - 3,2E-10 \times x^3 + 3,4E-11 \times x^2 + 3,3E-16 \times x - 2,9E-17$	0,86
7	204	$y=1,6 \times x^6 + 1,3E-05 \times x^5 - 1,9E-05 \times x^4 - 7,7E-11 \times x^3 + 6,3E-11 \times x^2 + 9,9E-17 \times x - 6,2E-17$	0,81
8	204	$y=8,3E-01 \times x^6 - 5,7E-06 \times x^5 - 4,3E-06 \times x^4 + 5,9E-12 \times x^3 + 7,4E-12 \times x^2 + 1,9E-17 \times x - 4,1E-18$	0,92
9	204	$y=7,9E-01 \times x^6 + 8,2E-06 \times x^5 - 1,1E-05 \times x^4 - 5,5E-11 \times x^3 + 4,4E-11 \times x^2 + 8,0E-17 \times x - 5,0E-17$	0,71
10	204	$y=8,0E-01 \times x^6 + 1,4E-05 \times x^5 - 9,1E-06 \times x^4 - 8,7E-11 \times x^3 + 3,0E-11 \times x^2 + 1,2E-16 \times x - 3,0E-17$	0,85
11	204	$y=7,3E-01 \times x^6 - 2,7E-05 \times x^5 - 5,2E-06 \times x^4 + 10,0E-11 \times x^3 + 1,1E-11 \times x^2 - 9,2E-17 \times x - 6,9E-18$	0,54

Примітки: n – кількість спостережень (загальна кількість досліджуваних точок із трьох рядів, для побудови рівняння регресії взято 68 середніх значень розрахованих із 204); R² – показник відповідності лінії тренду до фактично отриманих результатів; x – відстань від центру прольоту агродрону в см (-871,3 см – це крайня ліва досліджувана точка, а 871,3 см – це крайня права досліджувана точка); y – вміст д.р. на відстані x в мкг/см².

Здійснено аналіз кореляції між дослідними параметрами та встановлено від'ємну сильну кореляцію між вмістом речовини та відстанню, на якій ця кількість визначається ($r = -0,744$). Це значення свідчить про обернену залежність, а саме: із збільшенням відстані зменшується вміст дослідної речовини. Залежність між вмістом та відстанню, на якій ця кількість речовини визначається, була оцінена

методом найменших квадратів і після введення додаткових коефіцієнтів, нам вдалося отримати модель із кореляційним зв'язком – 0,8 (критерій Фішера – 1748,0).

На підставі даних щодо вмісту речовини та відстані на якій ця кількість речовини визначалася було побудовано фінальне рівняння прогнозування розподілу вмісту речовини в зоні покриття.

Виведене рівняння регресії (формула 1) може бути рекомендованим для прогнозування відстані, на якій може визначатися заданий вміст діючої речовини під час розпилення препаратів ХЗЗР при обробці сільськогосподарських культур за допомогою БПЛА в майбутньому.

$$\text{Distance} = \text{const} + (v_0) \times (X) + (v_1) \times (X)^{0.7} + (v_2) \times (X)^{(2/3)} + (v_3) \times (X)^{(1/3)} + (v_4) \times (X)^{0.3} \quad (1),$$

де Distance = відстань, на якій буде визначено відповідний вміст діючої речовини (см);

$$\text{constant} = 768,6395;$$

$$v_0 = -2339,1631;$$

$$v_1 = 58360,000;$$

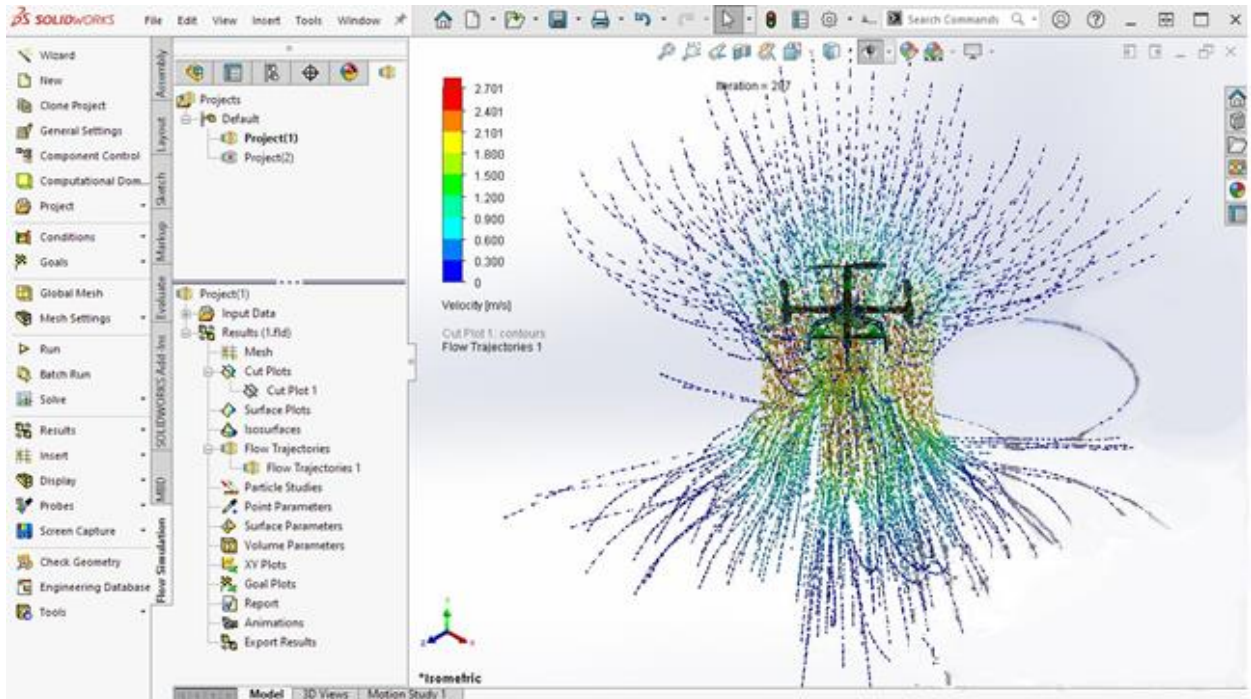
$$v_2 = -60670;$$

$$v_3 = 19310;$$

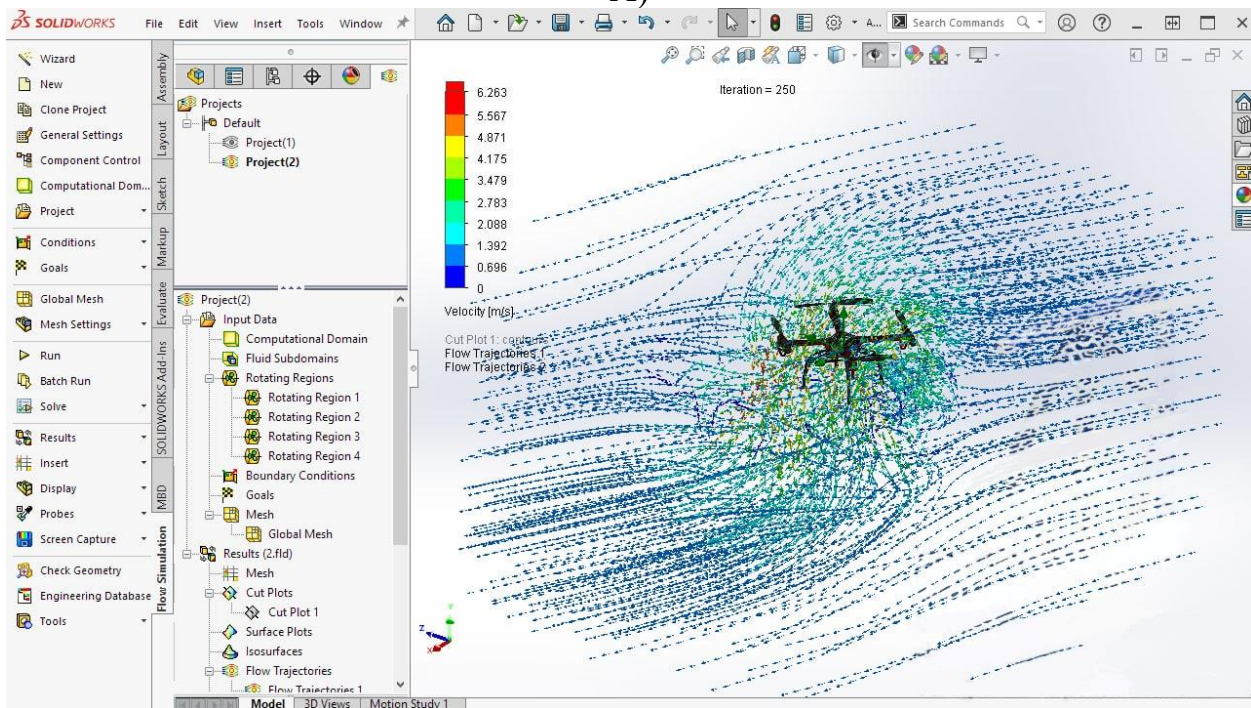
$$v_4 = -15330;$$

X = вміст діючої речовини, яку очікуємо знайти (мкг/см²).

Нами також було зроблено перший крок у розробці комп'ютерної 3D-моделі роботи агродрону (рис. 6), включаючи їхню геометрію, компоненти, розташування резервуарів для пестицидів, розпилювачі та інше обладнання. Було визначено, що потік повітряних мас з-під пропелерів агродрону починає формуватися з шару повітря над ним; найбільша густина потоків пестициду знаходиться безпосередньо під коптером, і значно зменшується при збільшенні відстані від нього. Радіус розпилення навколо самого агродрону невеликий, але він значно залежить від висоти прольоту над культурою. Виявлено залежність між формуванням турбулентних висхідних потоків (відбитих від поверхні) та висотою розпилення. Бічні потоки повітряних мас відіграють роль у формуванні зносу робочого розчину пестицидів. Можливість дрейфу пестицидних формуляцій збільшується із збільшенням відстані низхідного потоку повітря, що формується від гвинтів агродрону. Це обумовлено тим що сила потоку повітряних мас, створених пропелерами БПЛА, зменшується із віддаленням від нього.



A)



Б)

Рис. 7. 3D-модель руху повітряних мас, обумовлених роботою агродрону під час внесення пестицидів: А) без бокового руху повітряних мас; Б) при боковому русі повітряних мас

На основі проведеного нами аналізу літератури, підходів для аналогічної оцінки при даному виді обробок за кордоном, результатів наших власних натурних гігієнічних експериментів (польових досліджень) нами запропоновано варіант адаптації існуючих методичних рекомендацій «Вивчення, оцінка і зменшення ризику інгаляційного і перкутанного впливу пестицидів на осіб, які працюють з ними або

можуть зазнавати впливу під час і після хімічного захисту рослин та інших об'єктів», 2009 р. до умов обробок з повітря за допомогою БПЛА.

Показниками, що мають бути покладені в основу розрахунку ризиків, є норма витрати робочого розчину пестициду, об'єм баку, продуктивність агродрону, розмір крапель, тип форсунок, швидкість обробки, висота польоту агродрону над культурою та ширина захоплення, метеорологічні умови під час обробки (вологість, температура, швидкість і напрямок вітру). А також необхідно зважати на відсутність групи наземної підтримки, знаходження оператора агродрону на відстані від оброблюваного поля, об'єм робочого розчину та тривалість обробки. Враховуючи особливості внесення пестицидів за допомогою БПЛА, нами запропоновано ряд доповнень до пунктів 3.2, 3.3, 3.9.1, 4.7, 4.7.1, 5.1, 5.6 методичних рекомендацій.

На основі результатів кількарічних лабораторних та натурних експериментальних досліджень з використанням мультироторних безпілотних літальних апаратів для обробки сільськогосподарських культур засобами захисту рослин було розроблено методичні рекомендації з безпечного застосування пестицидів з повітря за допомогою БПЛА. Документ складається з рекомендацій по навчанню пілотів агродронів та персоналу наземної підтримки; керування експозицією оператора; проведенню обробок (визначення ризику/вигоди, вибір формуляції, інформація про маркування, буферні (захисні) зони, приготування робочого розчину, проведення обробки); реалізації аспектів безпеки (спостереження за станом здоров'я оператора, заходи безпеки та засоби індивідуального захисту, транспортування та зберігання продукції, поводження з продуктом, управління хімічною тарою, процедури нещасних випадків та перша допомога при отруєннях); веденню обліку (опис польового розпилення, спостереження за станом здоров'я оператора, місцеві екстрені контакти).

Даний документ дозволить досягнути цілей державного регулювання для безпечного внесення пестицидів з повітря із застосуванням агродронів, що сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки навколишнього природного середовища та здоров'я населення, позитивно вплине на розвиток технологій та їх впровадження, і в цілому на ведення бізнесу в Україні та створення для нього нових можливостей.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі аналітичного узагальнення теоретичних даних різних літературних джерел, інтернет-ресурсів, результатів власних лабораторних та натурних експериментів, було проведено порівняльну гігієнічну оцінку особливостей, доведено доцільність та безпечність застосування інноваційних технологій внесення пестицидів з використанням інжекторних розпилювачів, безпілотних літальних апаратів та 3Rive 3D технології, виконано аналіз та порівняння з найбільш поширеними на сьогоднішній день методами внесення (штангове обприскування, авіаобробка). Розроблені теоретико-практичні положення дозволили вирішити актуальну наукову проблему профілактичної медицини, а саме, обґрунтувати підходи і регламенти безпечного застосування нових методів внесення пестицидів, що дозволить знизити ризик негативного

впливу на здоров'я працівників, населення та екосистему при підвищенні ефективності сільськогосподарського виробництва.

1. Встановлено, що в основу підвищення безпечності умов праці робітників та екологічної безпеки повинно бути покладено вивчення механізму впливу технологічного процесу розпилення пестицидів в умовах сільськогосподарського виробництва, здатного чинити пряму чи опосередковану, гостру або віддалену дію на навколишнє середовище і як наслідок – на людину. Саме тому, розробка нормативів і регламентів безпечного застосування препаратів для обробок сільськогосподарських культур за допомогою БПЛА, інжекторних форсунок і 3Rive 3D технології та удосконалення методики оцінки ризику з урахуванням особливостей вказаних способів застосування пестицидів є надзвичайно важливим етапом.

2. Визначено, що в період з 2010 по 2022 рік в Україні спостерігалось значне зростання обсягів використання хімічних засобів захисту рослин. Це відображено в темпі росту – 158,26% і сукупному річному темпі приросту – 8,23% асортименту дозволених до застосування пестицидів. Подібна тенденція властива і для групи пестицидів, призначених для застосування авіаційним методом (зросла майже в 2 рази). Першочерговою групою пестицидів, що рекомендовані до реєстрації для внесення з БПЛА, є пестициди, які вже отримали реєстрацію для внесення традиційним авіаційним способом. Препаративні форми, що зареєстровані для внесення штанговим способом з використанням щільових форсунок, можуть вноситися інжекторними форсунками без обмежень. 3Rive 3D технологія внесення потребує особливої препаративної форми. В Україні зареєстровано тільки препарат Брігейд 3Rive 3D, КС.

3. Встановлено, що діючі речовини препаратів Альфа-Дикват Форте РК, Амістар Екстра 280 SC, КС, Реглон Ейр 200 SL, РК, Брігейд 3Rive 3D, КС мають низьку здатність до накопичення в об'єктах навколишнього середовища та руйнуються протягом одного вегетаційного періоду при внесенні їх за допомогою БПЛА, інжекторних форсунок і 3Rive 3D технології. Періоди напіврозпаду діючих речовин досліджуваних препаратів у ґрунті достовірно нижчі порівняно із даними, що встановлені в країнах ЄС при традиційних способах внесення (за Т-критерієм Вілкоксона $p=0,016$); тоді як в рослинах такої відмінності не виявлено (за Т-критерієм Вілкоксона $p=0,813$). Доведено, що при застосуванні інноваційних технологій внесення пестицидів за показником стійкості у ґрунті ципроконазол, азоксистробін, дикват дибромід та біфентрин можна віднести до малонебезпечних (IV клас небезпечності); за показником стійкості у вегетуючих сільськогосподарських культурах дикват дибромід відноситься до малонебезпечних (IV клас небезпечності), біфентрин можна віднести до помірно небезпечних (III клас небезпечності), азоксистробін, ципроконазол – до небезпечних (II клас небезпечності).

4. Показано, що, за умов дотримання розроблених регламентів застосування досліджуваних препаратів, внесення їх за допомогою БПЛА, інжекторних форсунок і 3Rive 3D технології в максимальних нормах витрат є безпечним для населення та не створює забруднення об'єктів навколишнього середовища. За розрахованими інтегральними показниками небезпечності при потенційному надходженні сполук

до організму людини з харчовими продуктами азоксистробін належить до 4 класу небезпеки (малонебезпечні), ципроконазол, дикват дибромід та біфентрин до 3 класу небезпеки (помірно небезпечні речовини). При застосуванні інноваційних технологій інтегральні показники небезпечності при потенційному надходженні сполук до організму людини з харчовими продуктами є нижчими, проте статистично не відрізняються від таких при застосуванні традиційних технологій (за W-критерієм Вілкоксона $W=10,5$; $p=0,629$). За показниками небезпечності при потраплянні пестицидів у воду при застосуванні інноваційних технологій внесення пестицидів біфентрин належить до небезпечних (2 клас) сполук, азоксистробін та дикват дибромід до помірно небезпечних (3 клас), ципроконазол до надзвичайно небезпечних сполук (1А клас) при споживанні людиною контамінованої ним води, відповідно (під час порівняння цього показника, розрахованого із використанням літературних даних, було встановлено, що при застосуванні інноваційних технологій інтегральні показники небезпечності при потраплянні пестицидів у воду є нижчими, проте статистично не відрізняються (за критерієм Ст'юдента $t=1,73$; $p=0,182$)).

5. Встановлено, що в реальних умовах внесення пестицидів різними інноваційними технологіями (повітряно-інжекторні форсунки, БПЛА та 3Rive 3D) при дотриманні рекомендованих агротехнічних і медико-санітарних регламентів безпечного застосування не спостерігається перевищення медико-санітарних нормативів у повітрі робочої і зони зносу та доведено, що потенційний ризик шкідливого впливу на організм сільськогосподарських працівників при комплексному надходженні через шкіру та дихальні шляхи, а також комбінований ризик надходження всіх діючих речовин препаративних форм не перевищує 1 у.о., що дозволяє визнати умови їх праці допустимими. Всі досліджувані діючі речовини, окрім диквату диброміду в складі препарату Альфа-Дикват Форте, РК (КВД_д – 82, тобто < 100), характеризуються достатньою (КВД_д – 124-1543, тобто > 100) вибірковістю дії на цільовий об'єкт і низькою вірогідністю виникнення гострих дермальних ефектів. Значення КВД_{інг.} азоксистробіну, дикват диброміду, біфентрину коливаються в межах 17-57, що свідчить про відносно низьку вибірковість їх дії та більшу небезпеку гострих інгаляційних токсичних ефектів для операторів при проведенні обробок.

6. Розроблено спосіб визначення вмісту синтетичного барвника Діамантового синього Е 133 в сорбційному матеріалі (фільтрувальному папері), що включає вилучення барвника з сорбційного матеріалу (фільтрувального паперу) дистильованою водою, твердофазову екстракцію та кількісне визначення Діамантового синього Е 133 методом обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) із спектрофотометричним детектуванням, який був в подальшому використаний для оцінки ефективності та безпечності застосування різних моделей БПЛА в комбінації з будь-якими пестицидними препаратами при використанні різноманітних агротехнічних характеристик на етапі передресстраційних випробувань та наукових досліджень.

7. Проведено комп'ютерне моделювання внесення пестицидів з повітря за допомогою БПЛА. Встановлено, що найбільша густина потоків пестициду знаходиться безпосередньо під агродроном і зменшується при збільшенні відстані

від нього. Радіус розпилення навколо агродрону невеликий, але він значно залежить від висоти прольоту над культурою. Бічні потоки повітряних мас відграють роль у формуванні зносу робочого розчину пестицидів. Можливість дрейфу пестицидних формуляцій збільшується із збільшенням відстані низхідного потоку повітря, що формується від гвинтів агродрону.

8. Розроблено методичні рекомендації, які регламентують використання безпілотних літальних апаратів коптерного типу для внесення пестицидів, що дозволить мінімізувати ризики за рахунок прийняття зважених управлінських рішень. Цей документ є важливим інструментом для забезпечення безпеки та ефективності використання агродронів у сільському господарстві, оскільки він надає операторам та персоналу чіткі інструкції та рекомендації щодо безпечного та ефективного використання цієї технології.

9. Запропоновано доповнення до методичних рекомендацій щодо оцінки та зменшення ризиків для працівників, які виконують внесення пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів, що забезпечить більш коректну оцінку професійних ризиків, пов'язаних із використанням цієї технології. Такий підхід сприяє створенню більш повного та збалансованого набору рекомендацій для операторів БПЛА, що в результаті забезпечує безпеку, ефективність та сталість використання цієї технології у сільському господарстві.

10. Обґрунтовано розрахункову модель прогнозування вмісту хімічних засобів захисту рослин та радіусу їх розпилення при обробці сільськогосподарських культур з використанням БПЛА. Доведено, що запропонована розрахункова модель є адекватною з високим коефіцієнтом апроксимації (відкоригований $R^2=0,8$ при $\text{Prob}(F\text{-statistic}) < 0,05$) і може суттєво спростити проведення передреєстраційних випробувань та моніторингових досліджень при проведенні обробок сільськогосподарських культур з використанням даного виду внесення.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Внести доповнення до методичних рекомендацій «Вивчення, оцінка і зменшення ризику інгаляційного і перкутанного впливу пестицидів на осіб, які працюють з ними або можуть зазнавати впливу під час і після хімічного захисту рослин та інших об'єктів 8.8.1.4-162-2009», затверджених наказом МОЗ України від 13.05.2009 № 324, щодо оцінки та зменшення ризиків для працівників, які виконують внесення пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів. Пропонується під час розрахунку ризиків враховувати такі особливості: відсутність групи наземної підтримки; знаходження оператора агродрону на відстані від оброблюваного поля; об'єм робочого розчину; висоту прольоту над культурою та тривалість обробки.

2. На етапі передреєстраційних випробувань та наукових досліджень з медико-санітарної оцінки нових технологій внесення хімічних засобів захисту рослин використовувати (як заміник пестицидного препарату) синтетичний барвник Діамантовий синій Е 133 та розроблений спосіб визначення його вмісту в сорбційному матеріалі (фільтрувальному папері), що включає вилучення барвника з сорбційного матеріалу дистильованою водою, твердофазову екстракцію та кількісне

визначення Діамантового синього Е 133 методом обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії із спектрофотометричним детектуванням.

3. При проведенні навчання осіб за «Програмою навчання працівників, робота яких пов'язана з організацією та безпосереднім проведенням робіт по транспортуванню, зберіганню, застосуванню, торгівлею пестицидами і агрохімікатами» (Наказ Міністерства сільського господарства і продовольства № 158 від 27.05.1996 р.) з дотриманням вимог Постанови КМУ від 18 вересня 1995 р. N 746 «Про затвердження Порядку одержання допуску (посвідчення) на право роботи, пов'язаної з транспортуванням, зберіганням, застосуванням та торгівлею пестицидами і агрохімікатами» використовувати розроблені «Гігієнічні рекомендації з безпечного та ефективного використання розпилювачів для обробки сільськогосподарських культур пестицидами». Брошура. 2023. 9 с. ISBN 978-966-460-164-8.

4. Для забезпечення безпеки та ефективності використання агродронів у сільському господарстві, що сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки навколишнього природного середовища та здоров'я населення рекомендовано проводити навчання з видачею посвідчення на право роботи з пестицидами задіяних осіб (передбачено частиною другою статті 11 Закону України «Про пестициди та агрохімікати») з використанням «Методичних рекомендацій для безпечного застосування пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Брошура. 2023. 35 с. ISBN 978-966-460-176-1.

5. Для проведення передреєстраційних випробувань та моніторингових досліджень акредитованими науково-дослідними установами та Державною службою України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів при проведенні обробок сільськогосподарських культур з використанням БПЛА рекомендовано використовувати розрахункові моделі прогнозування щільності покриття поверхні та радіусу розпилення пестицидного препарату за даного виду обробки.

Ключові слова: пестициди, фактори навколишнього середовища, умови праці, комплексний і комбінований ризик, хімічні забруднювачі повітря, води, ґрунту, параметри токсичності, медико-санітарні нормативи та регламенти, безпека харчових продуктів.

GENERAL CHARACTERISTICS OF THE WORK

Relevance. The use of chemical substances for plant protection is a key element in the agricultural sector, significantly contributing to stable economic growth and the achievement of national development goals (Jallow M.F. et al., 2017; Moser F. and Dondi F., 2016). Pesticides play a crucial role in preventing crop losses, thereby directly impacting yield and overall productivity in agro-industrial production (Damalas C.A. et al., 2017). The use of plant protection products (PPPs) has substantial economic implications. On one hand, it promotes the efficiency of the agricultural sector, thereby strengthening economic stability and increasing profits. On the other hand, it aligns with broader state development goals, ensuring food security – a key component of the socio-economic development of any nation (Boedeker W. et al., 2020; Kim K.H. et al., 2017; Moser F. and Dondi F., 2016).

However, it is essential to consider the use of pesticides within the framework of sustainable agricultural practices using innovative application technologies, as their unregulated or excessive use can lead to harmful environmental impacts, including soil and water resource pollution and disruption of local ecosystems. Additionally, the potential health risks for both agricultural workers and consumers associated with the improper use of PPPs cannot be ignored (Anderson S.E. and Meade B.J., 2014; Evaristo A. et al., 2022; Tarone R.E., 2018).

According to information provided by the International Labor Organization (2021), the agricultural sector is identified as one of the most hazardous in terms of worker safety and health, applicable to both developed and developing countries. Agricultural workers comprise almost half of the global workforce, totaling 1.3 billion people. The implementation of advanced PPPs, innovative application technologies, and the integration of chemical, physical, and biological methods will facilitate the optimization of pesticide use (Directive 2009/127/EC, 2009; Fagnoli M. et al., 2019; Omelchuk S.T. et al., 2019; Whithaus S. and Blecker L., 2016).

A comprehensive assessment of working conditions and calculated risk prediction of potential negative impacts of pesticide preparations on farmers involved in their application is one of the mandatory stages of pre-registration trials of such formulations. This includes those already studied and registered but planned to be applied using innovative agricultural application technologies (Borysenko A. et al., 2021; Omelchuk S.T. et al., 2019).

Modern digital agriculture is constantly improving, and today the application of pesticides from the air using unmanned aerial vehicles (UAVs), the 3Rive 3D seed treatment and sowing technology, and the use of injector nozzles are particularly relevant. These technologies are either entirely new to the agricultural sector of our country or are in the early stages of implementation in practice (injector sprayers) (3RIVE 3D® Application System Program, 2021; Albeaino G. et al., 2021; McManus B.L. and Fuller B.W., 2017; Pappas R., 2016).

The aforementioned innovative technologies for applying plant protection products are poorly studied scientifically in terms of the safety of working conditions for involved workers, the consumption of products grown using these technologies, and their impact on environmental objects. These technologies have been minimally tested in practice and

require separate medical, sanitary, and environmental regulations. There is a lack of regulatory and legal framework for conducting hygienic assessments of occupational risks and justifying the regulations for the safe application of plant protection products using these methods.

Connection of work with scientific programs, plans, and themes. The dissertation is a fragment of the initiative and search scientific research topics of the department: "Hygienic justification of the scientific foundations for monitoring various groups and chemical classes of pesticides in water bodies for economic, drinking, and cultural household use" (State Registration No. 0118U100472, 2019-2021); "Comparative hygienic assessment and scientific justification of approaches to the hygienic regulation of innovative pesticide application technologies" (State Registration No. 0122U000634, 2022-2024); and contract scientific research works under State Registration Nos.: 0120U104013; 0121U111495; 0120U104013; 0121U111499; 0119U100292; 0119U103450; 0118U001296; 0118U001055; 0116U005961; 0117U006030; 0114U006506; 0116U005960; 0117U006021; 0113U000644.

The work was carried out in accordance with the laws of Ukraine "On pesticides and agrochemicals" of March 2, 1995, No. 86/95-VR, "On the safety and quality of food products" of December 23, 1997, No. 771/97-VR, "On ensuring sanitary and epidemiological welfare of the population" of February 24, 1994, No. 4004-XII, and "On the public health system" of September 6, 2022, No. 2573-IX.

The aim of the study is to conduct a comparative hygienic assessment and scientific justification of approaches to the hygienic regulation of innovative pesticide application technologies to minimize the potential health risk to agricultural workers and the population and to reduce the pesticide load on environmental objects.

Research objectives:

1. Summarize data and conduct a comparative environmental and hygienic assessment of innovative pesticide application technologies using injector sprayers, 3Rive 3D technology, and aerial application with UAVs.

2. Analyze and systematize pesticides permitted for use in modern agricultural production in Ukraine from the perspective of their potential use in the studied innovative technologies.

3. Study the dynamics, analyze the migration characteristics in the environment, and assess the residual quantities of cyproconazole, diquat dibromide, bifenthrin, and azoxystrobin in environmental objects. Evaluate their risk to the environment when using Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D preparations based on them.

4. Conduct a risk assessment for non-professional contingents when consuming water and agricultural products contaminated with pesticides grown using innovative PPC application technologies.

5. Evaluate and perform a comparative analysis of working conditions and risks for professional contingents of cyproconazole, diquat dibromide, bifenthrin, and azoxystrobin when using Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D preparations based on them using injector sprayers, 3Rive 3D technology, and aerial application with UAVs according to existing methodological approaches.

6. Develop and implement practical instructions and methodological recommendations for the safe application of PPPs using injector sprayers and UAVs.

7. Develop calculation models to ensure optimal application conditions and safe drift of pesticide droplets when treating agricultural crops using UAVs.

8. Scientifically justify methodological approaches to medical and sanitary assessment and calculations of potential risk for professional contingents when using UAVs for PPPs application.

9. Justify requirements, develop hygienic regulations for safe use, and provide recommendations for controlling pesticide application using injector sprayers, 3Rive 3D technology, and aerial application with UAVs.

Object of research: hygienic aspects and features of medical and sanitary regulation of plant protection products when applied using innovative technologies (3Rive 3D technology, aerial application with UAVs, and injector application).

Subject of research: behavior in environmental and production objects, hazard to workers, the population, and the environment of cyproconazole, diquat dibromide, bifenthrin, and azoxystrobin when using Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D preparations based on them in innovative technologies. Specifically, the dynamics of residual quantities of cyproconazole, diquat dibromide, bifenthrin, and azoxystrobin in the air, soil, water, and green plants; content of the studied active substances in grain and oil; working conditions and professional risk, risk of contamination of groundwater and surface water, and risk to the population when consuming agricultural products.

Scientific novelty of the obtained results. As a result of the conducted research, the following achievements were made for the first time in Ukraine:

- A comparative environmental and hygienic assessment of innovative pesticide application technologies using injector sprayers, 3Rive 3D technology, and aerial application with UAVs was conducted.

- Pesticides permitted for use in modern agricultural production in Ukraine were systematized from the perspective of their potential application in innovative application technologies.

- The behavior of active substances of the studied pesticides in agroecosystem objects was determined, their ecotoxicological hazard, persistence in Ukrainian soils, and the risk of groundwater contamination when using them in innovative application technologies were assessed.

- Working conditions and professional risks of cyproconazole, diquat dibromide, bifenthrin, and azoxystrobin when using Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D preparations based on them with injector sprayers, 3Rive 3D technology, and aerial application with UAVs were evaluated according to existing methodological approaches.

- Practical instructions and methodological recommendations for the safe application of PPPs using injector sprayers and UAVs were developed and implemented.

- Methodological approaches to medical and sanitary assessment and calculations of potential risk for professional contingents when using UAVs for PPPs application were scientifically justified and supplements to methodological recommendations were

proposed to assess and reduce risks for workers applying pesticides from the air using UAVs.

- A method for assessing new PPPs application technologies using a pesticide substitute – the synthetic dye Diamond Blue E 133 – was developed, and a method for determining its content in sorbent material (filter paper) was devised. This method includes extracting the dye from the sorbent material with distilled water, solid-phase extraction, and quantitative determination of Diamond Blue E 133 by reverse-phase high-performance liquid chromatography with spectrophotometric detection.

- Based on computer modeling of aerial pesticide application with UAVs, patterns of formation and behavior of air-dispersed PPPs systems were established.

- Calculation models for predicting surface coverage density and the spray radius of pesticide preparations when treating agricultural crops using UAVs were justified.

Practical significance of the obtained results. The proposed supplements to the methodological recommendations for assessing and reducing risks for workers applying pesticides from the air using UAVs will ensure a more accurate assessment of occupational risks associated with this technology. This approach contributes to creating a more comprehensive and balanced set of recommendations for UAV operators, ultimately ensuring the safety, efficiency, and sustainability of using this technology in agriculture.

A method for determining the content of the synthetic dye Diamond Blue E 133 in sorbent material (filter paper) was developed, which can be a preliminary assessment stage for the effectiveness and safety of any pesticide preparations from different UAV models with various agrotechnical characteristics at the pre-registration trials and scientific research stages.

Hygienic recommendations for the safe and effective use of sprayers for treating agricultural crops with pesticides were developed to reduce health risks for workers involved in the treatment and minimize the pesticide load on the environment. Special attention is paid to the proper selection and adjustment of equipment, which reduces the likelihood of uncontrolled PPPs spread. Modern approaches to the safe application of pesticides help meet international norms and standards in the field of agricultural production, which is important for export and international trade.

The "Methodological Recommendations for the Safe Use of Pesticides from the Air Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)" were developed, approved, and published, regulating the use of copter-type UAVs for pesticide application. This document is an important tool for ensuring the safety and efficiency of using agro-drones in agriculture, contributing to increased environmental safety and public health, positively impacting the development and implementation of technologies, and overall, enhancing business opportunities in Ukraine. The developed methodological recommendations are reflected in the Information Letter and published as a brochure.

The research results are used in the educational process at the hygiene departments of the Bogomolets National Medical University and implemented in scientific research work at the State Institution "Vinnytsia Regional Center for Disease Control and Prevention of the Ministry of Health of Ukraine", the Main Administration of the State Service of Ukraine on Food Safety and Consumer Protection in Vinnytsia Region, the Shupyk National Healthcare University of Ukraine, the State Institution "Marzeyev

Institute of Public Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", the L.I. Medved's Research Center of Preventive Toxicology, Food and Chemical Safety, Ministry of Health of Ukraine, and the Institute of Hygiene and Ecology of the Bogomolets National Medical University.

Publications. The research results are published in 42 scientific papers, reflecting the main points of the study. Among them are 21 articles in professional publications of Ukraine and international professional publications, including 7 articles in SCOPUS-indexed journals and 17 conference and congress abstracts. The dissertation materials are reflected in 2 informational letters and 2 brochures.

Structure and volume of the work. The dissertation consists of an abstract, introduction, and 6 chapters, which include a literature review, research materials and methods, results of own research (3 chapters), analysis and synthesis of research results, conclusions, a list of used sources (372 items – 142 in Cyrillic, 230 in Latin), and appendices. The work contains 37 tables, 25 figures, and 40 appendices. The main content is presented on 329 pages of typewritten text.

MAIN CONTENT OF THE WORK

Program, objects, and methods of research. To achieve the defined goal and accomplish the tasks of the dissertation, a program was developed that included expert-analytical studies, laboratory experiments, and field observations. Generalized information about the stages, objects, methods, and scope of the research is presented in Table 1.

Table 1

Stages, objects, methods, and scope of research

№	Stage	Object	Methods	Scope
1	Comparative hygienic assessment of modern pesticide application technologies and traditional crop treatment methods	Technological features, meteorological conditions, hygienic and environmental aspects of modern application technologies	Analysis of literature and internet resources	134
2	Expert-analytical assessment of the range of pesticides in Ukraine	Range and quantitative ratio of pesticides in Ukraine	Analysis of literature and internet resources	7
3	Field experiments on the hygienic assessment of working conditions when using the studied preparations	Preparations: Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D; atmospheric air and work area air, workers, soil, patches on workwear, washes from workers' skin	<ol style="list-style-type: none"> 1. Physical: air temperature, humidity, air movement speed, and atmospheric pressure 2. High-performance liquid chromatography 3. Gas-liquid chromatography 4. Spectrophotometric method 5. Calculation of the coefficient of inhalation poisoning possibility 6. Index of potential (dermal / inhalation) toxicity 7. Calculation of occupational risk 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 27 2. 258 3. 298 4. 276 5. 18 6. 36 7. 150
4	Calculation and assessment of human risks from consuming contaminated agricultural products and water	Cyproconazole, azoxystrobin, diquat dibromide, bifenthrin, green mass of studied plants, fruits, soil	1. Calculation of the integral hazard indicator for consuming contaminated food products.	1. 20

Table 1 (continued)

№	Stage	Object	Methods	Scope
			2. Calculation of the integral hazard indicator for consuming contaminated water ()	2. 12
5	Development of a method for determining the content of the synthetic dye Diamond Blue E 133 in sorbent material using high-performance liquid chromatography	Dye Diamond Blue E 133, sorbent material	1. Solid-phase extraction 2. Derivatization 3. Reverse-phase high-performance liquid chromatography 4. Absolute calibration method by constructing calibration dependencies 5. Statistical method 6. Mathematical modeling method	1. 40 2. 40 3. 40 4. 1 5. 6 6. 1
6	Modeling field experiments to determine the distribution density and drift of pesticides when applied by UAVs	UAVs, dye Diamond Blue E 133, sorbent material	1. Physical: air temperature, humidity, air movement speed, and atmospheric pressure 2. High-performance liquid chromatography 3. Mathematical modeling	1. 33 2. 2244 3. 20
7	Computer modeling of air movement flows and pesticide drift when using UAVs	3D models of agrodrones, SolidWorks software	1. Integration of technical characteristics of agrodrones 2. 3D modeling 3. Visualization of air flow movement and pesticide drift	1. 9 2. 2 3. 2
8	Field and laboratory studies on the behavior of the studied active substances in environmental objects	Compounds: cyproconazole, azoxystrobin, diquat dibromide, bifenthrin, green mass of studied plants, soil, air, water	1. High-performance liquid chromatography 2. Gas-liquid chromatography 3. Spectrophotometric method	1. 156 2. 165 3. 156

Table 1 (continued)

			4. Mathematical modeling	4. 9
			5. Calculation of the expected concentration in groundwater (SCI-GROW)	5. 12
			6. Calculation of the potential leaching index (GUS)	6. 12
			7. Calculation of the potential leaching index (LEACH)	7. 12
9	Analysis and statistical processing of the obtained results	Digital arrays	1. Variation statistics	1. 2404
			2. Assessment of the reliability of differences	2. 557
			3. Correlation analysis	3. 25
			4. Regression analysis	4. 22

The statistical processing of the results was conducted using IBM SPSS StatisticsBase v.23, MedStat v.5.2 (Copyright © 2003-2019), and Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO (version 2305 build 16.0.16501.20074) (License ID: CWW_0071e48a-250c-4bdb-9013-b8daf357b5e9_b5685e92-c95d-4399-9b83-449d76a26fb6_79f3b2da2f9adcda29). The statistical analysis of the obtained data employed descriptive statistics (determining the mean value (median) and the error of the mean (median), sample variance, standard deviation, determining the proportion); comparisons of mean variable values were conducted using the parametric method (Student's t-test) with a normal distribution of interval-scale features; with a distribution differing from normal, sample comparisons were conducted using the T- and W-Wilcoxon tests. Differences were considered significant at a confidence level greater than 95% ($p < 0.05$).

The conformity of empirical data to the normal distribution law was tested using the Shapiro-Wilk criterion.

Main results of the research and their discussion.

Currently, there are many technologies for pesticide application, such as rod spraying, fan spraying, knapsack spraying, and aerial spraying. Their main disadvantages include the use of large volumes of working solution, crop losses due to mechanical damage, non-target pesticide losses, involvement of a large number of workers during treatment, and high risks of environmental contamination.

At the same time, hydraulic injector sprayers are becoming increasingly popular, as they offer significant advantages in PPPs application efficiency, economic, and hygienic aspects, according to manufacturers and literature sources.

The 3Rive 3D pesticide application technology from FMC is a revolutionary platform for protecting plants from pests, weeds, and diseases, providing agribusinesses the opportunity to farm more extensively. The system integrates formulation technology, application technology, and active ingredients for efficient coverage of larger areas in a shorter period with fewer refills, saving water, fuel, labor, and time. The system is suitable for most major planter brands and ensures precise protection for each plant.

Digital agriculture has become one of the most promising technologies for ensuring sustainable resource use while meeting global demands for quantity and quality. One of its innovative developments is the use of UAVs. Experts state that Ukraine is one of the most attractive and largest markets for agricultural UAV use in Europe. This technology offers significant technical, economic, and biological advantages (Rejeb A. et al., 2022; Tsouros D.C. et al., 2019), as shown in Table 2.

Table 2

Comparative assessment of "classic" and UAV-based PPPs application technologies

"Classic" application technologies	UAV
Labor-intensive and less efficient process.	Convenient, fast, and highly efficient.
High risk of pesticide exposure to the operator involved in knapsack, tractor, or aerial application.	No/minimal exposure during pesticide application.
Higher pesticide load on environmental objects.	Lower pesticide load on environmental objects.
Improper application and uneven coverage caused by unqualified actions of the professional contingent (boom height, walking pace, etc.).	Autonomous drone operation with constant speed and flight altitude; presence of RTK/GPS ensures precise spraying with uniform coverage.
Higher consumption of PPPs and water.	Lower consumption of PPPS and water.
Lower return on investment (labor-intensive, higher water consumption, increased labor costs).	Better return on investment.

When registering chemical plant protection products for use with UAVs, it is important to ensure that the preparations are included in the list of approved products for aerial application. This guarantees that the products are safe for aerial use and comply with regulatory requirements for this method of treatment.

Analyzing the dynamics of plant protection product assortments in Ukraine, a significant increase in their use has been observed, and this trend shows no signs of slowing down. The total number of registered plant protection products between 2010 and 2022 increased from 779 to 2023 (including combined products: from 157 to 655). Among these, for aerial application: the absolute growth over 12 years is 5.3%, the compound annual growth rate is 27.4% per year, and the growth rate is 198.6%. At the beginning of our research, no preparations were registered in Ukraine for use with unmanned aerial vehicles (UAVs) (Figure 1).

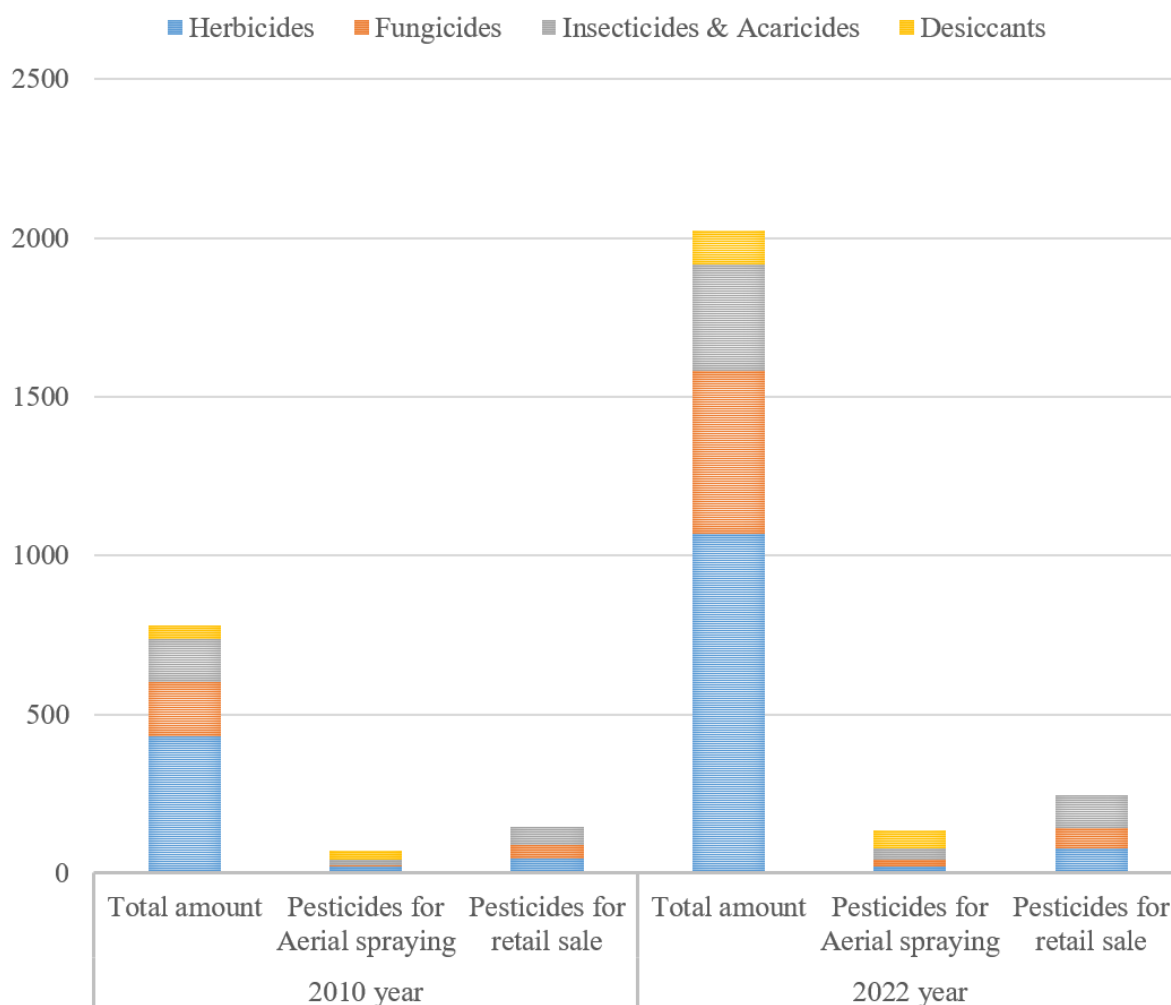


Figure 1. Registered chemical plant protection products in Ukraine

Field experiments showed that the active substances in Amistar Xtra 280 SC, Reglone Air 200 SL, Alpha-Diquat Forte SL, Brigade 3Rive 3D have a low capacity for accumulation in environmental objects and degrade within one growing season when applied using UAVs, injector nozzles, and 3Rive 3D technology. The differences in the degradation rates of the presented active substances, calculated for rod spraying with air-injector nozzles and UAVs, can be attributed to different soil types and climatic conditions (azoxystrobin and cyproconazole disappeared significantly faster during aerial application with UAVs: according to Student's t-test $t=10.3$; $p<0.001$ and $t=4.32$; $p=0.012$, respectively). The degradation rate of active chemical compounds in soil depends on soil pH, meteorological parameters, soil moisture and temperature, solar activity (ultraviolet radiation intensity), and the amount of active substance applied, particularly using ultra-low volume and low volume application methods.

The results of field studies using innovative PPPs application technologies (air-injector nozzles, UAVs, 3Rive 3D technology) in the agro-climatic conditions of Ukraine to determine the persistence of azoxystrobin, cyproconazole, diquat dibromide, and bifenthrin in soil indicate their persistence corresponds to the lower levels or even below previously established ranges in the soils of other countries under these treatment conditions.

An essential part of our study was assessing the migration ability of the studied active substances in the soil profile and analyzing the risks of consuming potentially contaminated water by the population. It was found that based on the sorption constant, diquat dibromide and bifenthrin are classified as immobile compounds in soil (class 5), azoxystrobin is classified as slightly mobile (class 4), and cyproconazole as moderately mobile (class 3) (Table 3).

For the studied compounds, there is a very low (azoxystrobin and cyproconazole) and extremely low (diquat dibromide and bifenthrin) risk of leaching into groundwater according to the GUS index. However, the risk of leaching into surface waters according to the LEACH_{mod.} index is moderate for the highly water-soluble bifenthrin (class 2) and low for the other compounds (class 3) (Table 3). According to the integral hazard index for water consumption (Antonenko A.M., 2016), cyproconazole belongs to the extremely hazardous compounds (class 1A); bifenthrin is classified as hazardous (class 2); azoxystrobin and diquat dibromide are moderately hazardous (class 3).

Table 3

Mobility in soil and climatic conditions of Ukraine

Evaluation Criteria	LEACH _{mod.} , a.u.*	GUS*	K _{oc} , mg/L	S _w , mg/L	τ ₅₀ in soil, days*	SCI- GROW, μg/L	τ ₅₀ in water, days
Azoxystrobin							
Value indicator	7,2×10 ⁻²	0,96	589	6,7	6,4	3,83×10 ⁻¹	6,1
Hazard Class	3	5	4	-	IV	-	II
Cyproconazole							
Value indicator	4,1×10 ⁻¹	0,28	364	93	1,6	3,46×10 ⁻¹	40
Hazard Class	3	5	3	-	IV	-	I
Diquat dibromide							
Value indicator	2,9×10 ⁻⁸	-1,2	236610	0,001	7,0	5,35×10 ⁻³	1
Hazard Class	3	6	5	-	IV	-	III
Bifenthrin							
Value indicator	1,2	-1,4	2184750	718000	3,6	5,35×10 ⁻³	8
Hazard Class	2	6	5	-	IV	-	II

Notes: LEACH_{mod.} – leaching index; a.u. – arbitrary units; GUS – ground ubiquity score (potential leaching index); K_{oc} – organic carbon sorption constant; S_w – solubility in water; τ₅₀ – half-life of the substance; SCI-GROW – screening concentration of pesticides in groundwater, μg/L; * – own data.

The data obtained from the field hygienic experiments indicate that the residual amounts of the studied active substances in agricultural crops grown using innovative technologies gradually decreased. By the time of harvest, their levels in plant products were below the quantitative determination limits of the corresponding method and did not exceed the established maximum permissible levels (MPL) for the compounds (Figures 2, 3, 4).

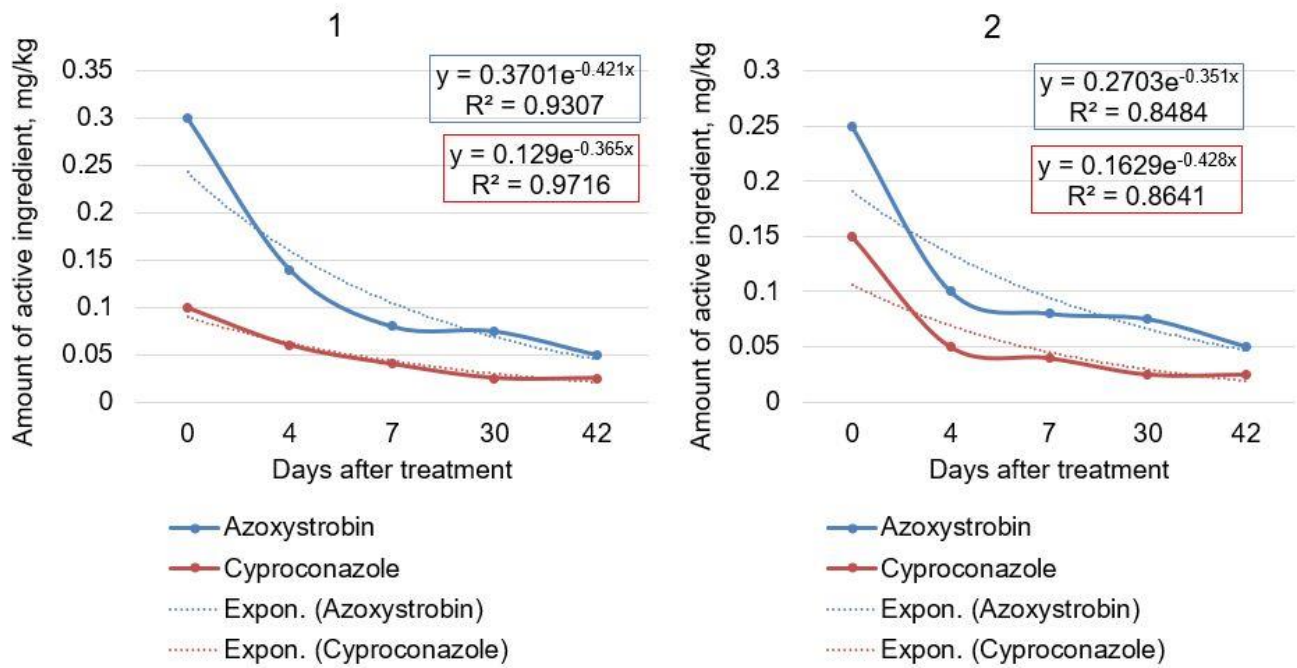


Figure 2. Dynamics of Azoxystrobin and Cyproconazole content in soybeans with application of Amistar Xtra 280 SC using injector sprayers (1) and UAVs (2)

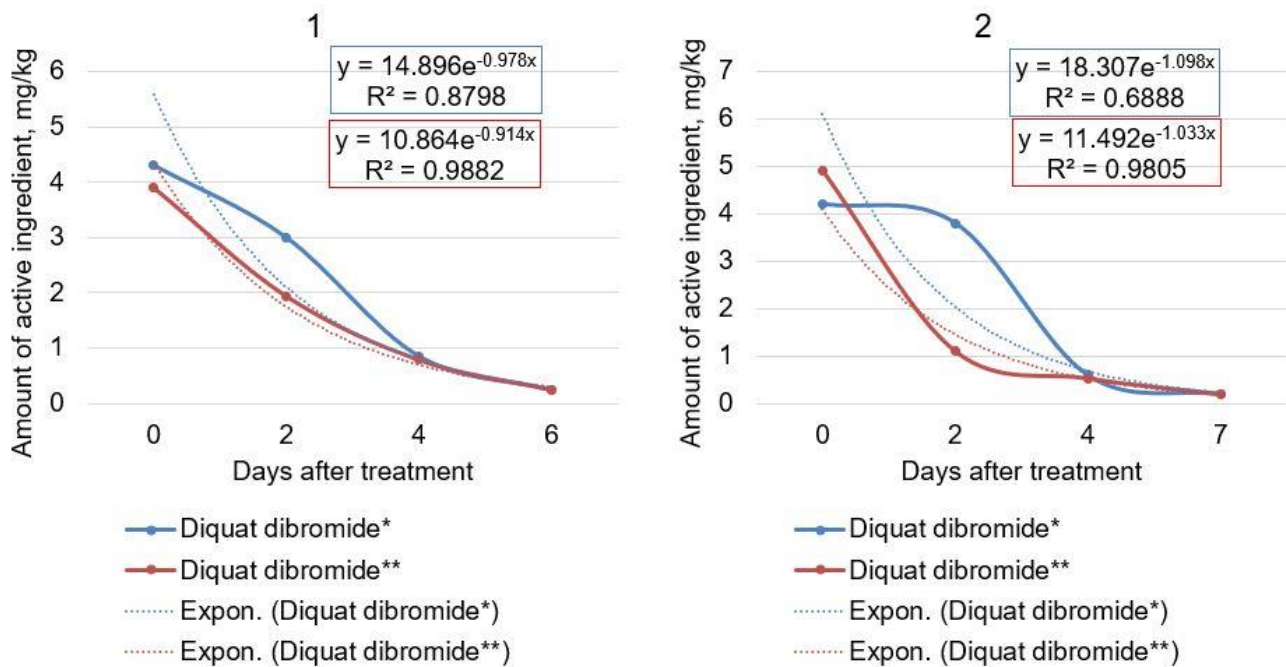


Figure 3. Dynamics of Diquat dibromide content in sunflowers (1) and rapeseed (2) with application of Alpha-Diquat Forte SL (*) and Reglone Air 200 SL () using UAVs**

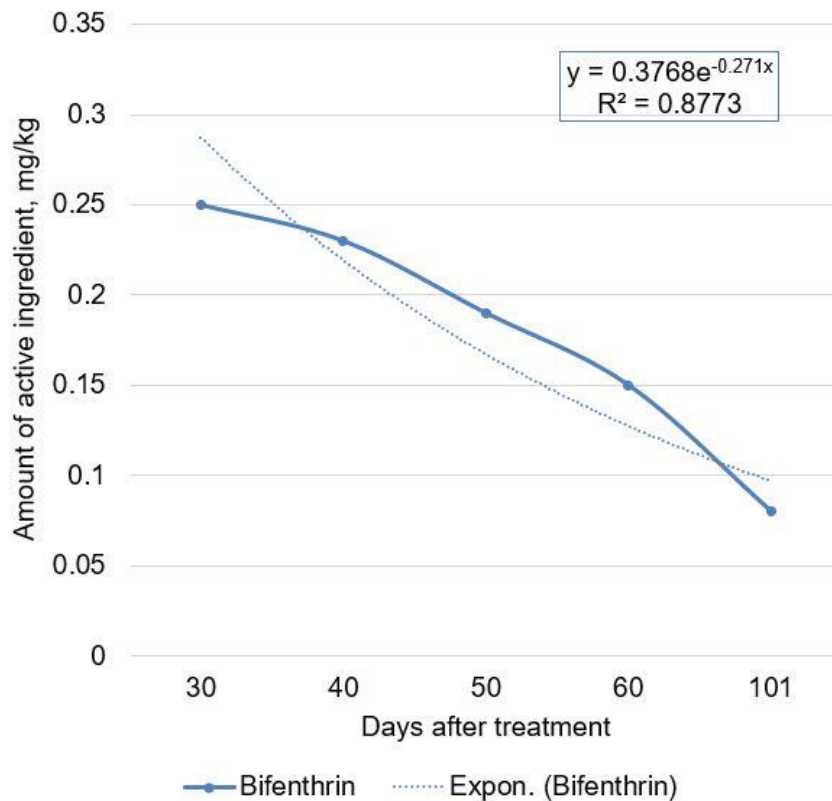


Figure 4. Dynamics of Bifenthrin content in corn with application of Brigade 3Rive 3D using 3Rive 3D Technology

When calculating the degradation rate coefficients of the active substances of the studied pesticides applied by different methods, it was found that the average values of τ_{50} for azoxystrobin using rod spraying with air-injector nozzles are 22.2 days, τ_{95} is 96.1 days, and τ_{99} is 147.8 days, with a degradation rate constant of 0.03. It should be noted that the half-life of azoxystrobin with rod spraying using air-injector nozzles, compared to rod spraying with slotted nozzles (where a similar formulation and application rate of Amistar Xtra Gold 280 OD was used), did not differ significantly (22.2 ± 0.01 vs. 23.72 ± 1.5 days; according to the Student's t-test: $t=1.01$ with $p=0.342$). These results allow the compound to be classified as a hazardous pesticide in plants – hazard class 2.

For cyproconazole using boom spraying with air-injector nozzles, the τ_{50} in plants is 17.7 days, τ_{95} is 76.7 days, and τ_{99} is 118.0 days, with a degradation rate constant of 0.04, which is similar to values obtained by other authors in the EU (Lewis K.A. et al., 2016). Compared to domestic sources (Kondratiuk M.V., 2019), it was found that τ_{50} of cyproconazole in plants with rod spraying using slotted nozzles under Ukrainian agro-climatic conditions is 23.79 ± 1.2 days, which is significantly higher compared to the results obtained with rod spraying using air-injector nozzles – 17.7 ± 0.2 (according to the Student's t-test: $t=5.00$ with $p=0.001$). These data allow the compound to be classified as a hazardous pesticide in plants – hazard class 2.

When studying the degradation rate of active substances in plants after applying Amistar Xtra 280 SC from the air using UAVs, the τ_{50} for azoxystrobin was 14.7 days, τ_{95} was 63.8 days, and τ_{99} was 98.1 days, with a degradation rate constant of 0.05. The τ_{50} for

cyproconazole was 16.0 days, τ_{95} was 69.4 days, and τ_{99} was 106.8 days, with a degradation rate constant of 0.04. The obtained results are similar to those obtained with classic aerial application using Amistar Xtra Gold 280 OD (16.9±1.12 and 16.84±1.32 for azoxystrobin and cyproconazole, respectively) and did not differ significantly according to the Student's t-test: for azoxystrobin – $t=1.97$ with $p=0.106$; for cyproconazole – $t=0.64$ with $p=0.550$ (Kondratiuk M.V., 2019).

A comparison of the half-life periods of the presented active substances in Amistar Xtra 280 SC calculated for rod spraying with air-injector nozzles and UAVs showed that UAV application resulted in significantly faster disappearance from plants (according to the Student's t-test $p=0.001$ for both active substances).

After desiccation of rapeseed and sunflower crops with Alpha-Diquat Forte SL and Reglone Air 200 SL using UAVs, a rapid degradation of the active substance in the green mass of the plants was observed. The τ_{50} of diquat dibromide in rapeseed was 2.0 days, τ_{95} was 8.5 days, and τ_{99} was 13.0 days, with a degradation rate constant of 0.4. The degradation rate in the green mass of sunflower was similar to that in rapeseed. The τ_{50} of diquat dibromide in sunflower was 1.5 days, τ_{95} was 6.5 days, and τ_{99} was 10.0 days, with a degradation rate constant of 0.5. The degradation rates in the green mass of both plants did not differ (according to the Student's t-test: $t=1.53$ with $p=0.157$). Therefore, based on the obtained results, diquat dibromide can be classified as slightly hazardous (hazard class 4) according to the half-life periods.

When applying Brigade 3Rive 3D using 3Rive 3D technology, the τ_{50} for bifenthrin in corn was 11.3 days, τ_{95} was 48.8 days, and τ_{99} was 75.0 days, with a degradation rate constant of 0.06, which corresponds to the average values obtained in other studies (Chauhan R. et al., 2012; Tewary D.K. et al., 2005). According to SSanN&R 8.8.1.2.002-98, bifenthrin in vegetative agricultural crops and raw materials can be classified as moderately hazardous (hazard class 3) based on its persistence.

The integral hazard indicators calculated for the potential entry of compounds into the human body from food products grown using injector nozzles, UAVs, and 3Rive 3D pesticide application technology show that azoxystrobin belongs to hazard class 4 compounds, while cyproconazole, diquat dibromide, and bifenthrin belong to hazard class 3 compounds. Our results regarding the likelihood of agricultural product contamination by the studied pesticides correlate with the assessments of other specialists in this field (Antonenko A.M. et al., 2018; Ruda T.V. et al., 2017; Chai Y. et al., 2022; Omelchuk S.T. et al., 2019).

It was found that the possibility of inhalation poisoning for workers with the active substances of the preparations when applied using innovative technologies is low, as indicated by the coefficient of inhalation poisoning possibility being less than 0.5, classifying the compounds as IV hazard class – slightly hazardous (Table 4).

**Assessment of hazard for acute toxic effects
when using innovative technologies**

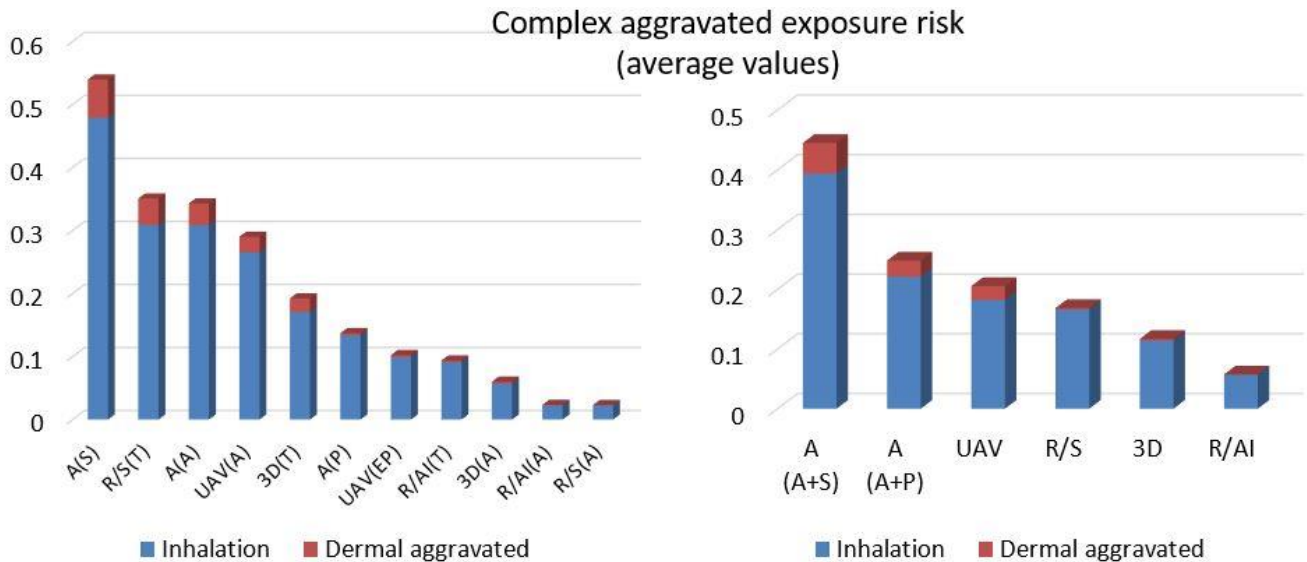
Innovative application technology	Product name	Active substance	CIPP	Active substance		Formulation	
				I _{pit.}	I _{pdt.}	I _{pit.}	I _{pdt.}
Injector Sprayers	Amistar Xtra	Cyproconazole	$6,4 \times 10^{-9}$	695	1543	24	412
		Azoxystrobin	$1,9 \times 10^{-11}$	35	617		
UAVs	Alpha-Diquat Forte	Diquat Dibromide	$1,2 \times 10^{-6}$	17	82	13	83
	Reglone Air	Diquat Dibromide	$1,2 \times 10^{-6}$	25	124	3	54
3Rive3D Technology	Brigade 3Rive 3D	Bifenthrin	$2,8 \times 10^{-6}$	57	645	17	100

Notes: 1. CIPP – coefficient of inhalation poisoning possibility; 2. I_{pit.} – index of potential inhalation toxicity; 3. I_{pdt.} – index of potential dermal toxicity.

All the studied active substances are characterized by sufficient selectivity of action and a low possibility of causing acute dermal effects. The exception is diquat dibromide in the composition of Alpha-Diquat Forte SL, with an I_{pdt.} value of 82 (Table 4). The I_{pit.} values for azoxystrobin, diquat dibromide, and bifenthrin range from 17 to 57, indicating relatively low selectivity of action and a higher risk of acute inhalation toxic effects for operators during treatments. The formulations and their active substances have significantly higher I_{pdt.} values than I_{pit.} (by 2.2-17.6 times), indicating a greater likelihood of acute inhalation poisoning in workers, which necessitates mandatory use of personal respiratory protection.

It was found that the highest complex aggravated risk among technological operations was for signalmen during classic aerial spraying (significantly higher compared to the risk for external UAV pilots, classic pilots, applicator, and tractor operators involved in rod spraying with injector nozzles and slotted nozzles). The lowest complex aggravated risk was calculated for applicators involved in rod spraying equipped with both injector and slotted nozzles (the difference was not significant compared to applicators involved in 3RIVE 3D spraying and tractor operators during rod spraying with both types of nozzles).

The highest cumulative aggravated risk was noted during traditional aerial spraying (if two technological operations were performed by one person in combinations such as applicator+pilot and applicator+signalman during classic aerial spraying, applicator+external pilot with UAVs, applicator+tractor operator during rod spraying and 3RIVE 3D technology), while the lowest risk was during rod spraying equipped with slotted and injector nozzles. The complex aggravated risk during technological operations of 3RIVE 3D and rod spraying with slotted and injector nozzles did not differ significantly (Figure 5).



Notes: 1. «3D(A)» – applicator (processing with 3Rive3D technology); 2. «3D(T)» – tractor operator (processing with 3Rive3D technology); 3. «R/S(A)» – applicator (rod spraying with slotted nozzles); 4. «R/S(T)» – tractor operator (rod spraying with slotted nozzles); 5. «R/AI(A)» – applicator (rod spraying with air-injector nozzles); 6. «R/AI(T)» – tractor operator (rod spraying with air-injector nozzles); 7. «A(A)» – applicator (aerial spraying «classic»); 8. «A(S)» – signalman (aerial spraying «classic»); 9. «A(P)» – pilot (aerial spraying «classic»); 10. «UAV(A)» – applicator (aerial spraying with a UAV); 11. «UAV(EP)» – external pilot (aerial spraying with a UAV).

Figure 5. Comparison of exposure risks during pesticide application operations with classic and innovative technologies

To develop a scientific basis for the medical and sanitary assessment of the safe use of the new aerial pesticide application technology using UAVs, we conducted several studies using the most common models of agro-drones in experimental and real climatic conditions in Ukraine.

As a substitute for pesticides, we experimentally used the food dye Diamond Blue E 133 to simplify and standardize the scientific and experimental studies of pesticide application using UAVs. The first step was to develop a method for determining the content of the synthetic dye Diamond Blue E 133 in sorbent material using reverse-phase high-performance liquid chromatography with spectrophotometric detection. The proposed method allows for the determination of the dye content in filter paper with 98% accuracy and a quantitative detection limit of 0.125 mg/kg, which significantly simplified the assessment of the effectiveness and safety of pesticide application using various UAV models at the pre-registration trials and scientific research stages.

Next, studies were conducted with varying spray parameters, such as nozzle type, speed, and UAV flight height, following the developed scheme. It was found that the highest content of the studied compound was directly under the projection of slotted nozzles and the agro-drone's propellers, decreasing at a distance of 80 cm, and further decreasing to a distance of 250 cm at a treatment height of 2 and 3 meters, and 450 cm (at a treatment height of 4 meters), where the amount of substance per unit area was almost negligible. In contrast, with air-injector nozzles, the central zone showed a lower content of the active substance, which increased to a distance of 80-120-190 cm (application from a height of 2 m, 3 m, and 4 m, respectively) and then decreased to a distance of 172-277-

330 cm (application from a height of 2 m, 3 m, and 4 m, respectively), possibly related to the spatial arrangement of these nozzles. Upon checking the dependency of the substance content on the UAV's flight height, a weak positive correlation was found ($r = 0.044$). A similar situation was observed for the dependency between the content of Diamond Blue E 133 and the speed of the agro-drone ($r = 0.086$).

Based on the obtained results, as shown in Figure 6, preliminary conclusions can be drawn that the nozzle type did not significantly affect the total amount of substance per unit area across the entire coverage width, and the active substance content at the studied distances from the UAV flight axis did not show significant differences by distance (according to Wilcoxon's W-test $p = 0.459-0.980$).

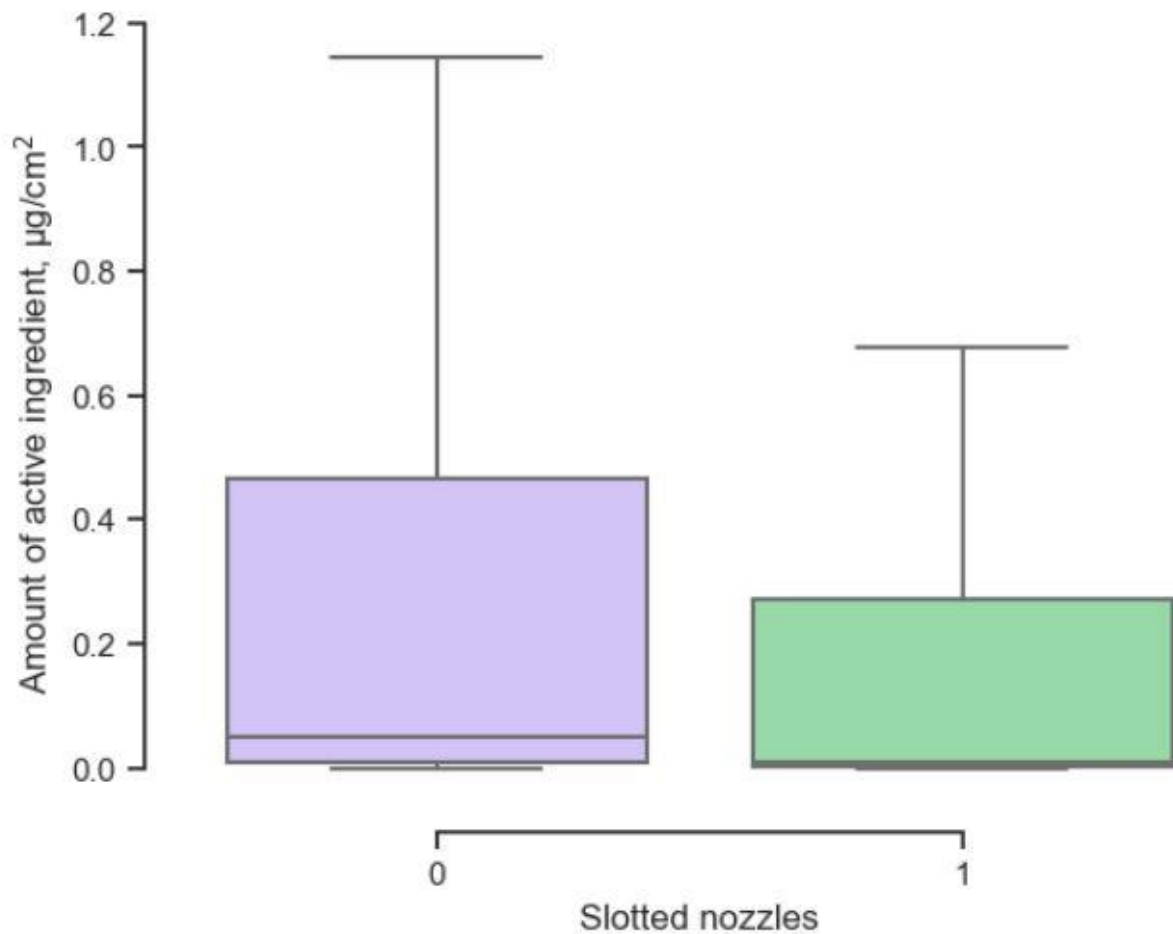


Figure 6. Dependence of active substance content on nozzle type, where "0" – slotted, "1" – air-injector

Based on the obtained data, we constructed graphs and determined the dependency between the distance from the center of the agro-drone's flight path and the content of Diamond Blue E 133 using polynomial regression. The trend line and the equation describing this trend were obtained (Table 5). Additionally, 100% and 95% coverage zones during the operation of the agro-drone were established.

Polynomial regression equations for dependency of Diamond Blue E 133 content on distance from UAV flight path center

Experiment №	n	Regression equation	R ²
1	204	$y=9,4E-01 \times x^6 + 1,4E-04 \times x^5 - 6,1E-06 \times x^4 - 3,5E-10 \times x^3 + 1,1E-11 \times x^2 + 5,2E-17 \times x - 4,6E-18$	0,98
2	204	$y=8,8E-01 \times x^6 + 1,6E-05 \times x^5 - 1,7E-05 \times x^4 - 1,7E-10 \times x^3 + 9,8E-11 \times x^2 + 3,9E-16 \times x - 1,7E-16$	0,94
3	204	$y=1,2 \times x^6 + 5,9E-05 \times x^5 - 2,5E-05 \times x^4 - 9,7E-10 \times x^3 + 1,8E-10 \times x^2 + 3,5E-15 \times x - 4,2E-16$	0,98
4	204	$y=6,5E-01 \times x^6 + 9,8E-06 \times x^5 - 4,0E-06 \times x^4 - 7,1E-11 \times x^3 + 8,4E-12 \times x^2 + 1,1E-16 \times x - 5,7E-18$	0,98
5	204	$y=8,4E-01 \times x^6 - 1,6E-05 \times x^5 - 1,1E-05 \times x^4 + 9,5E-11 \times x^3 + 3,6E-11 \times x^2 - 1,2E-16 \times x - 3,5E-17$	0,74
6	204	$y=1,1 \times x^6 + 8,8E-05 \times x^5 - 1,2E-05 \times x^4 - 3,2E-10 \times x^3 + 3,4E-11 \times x^2 + 3,3E-16 \times x - 2,9E-17$	0,86
7	204	$y=1,6 \times x^6 + 1,3E-05 \times x^5 - 1,9E-05 \times x^4 - 7,7E-11 \times x^3 + 6,3E-11 \times x^2 + 9,9E-17 \times x - 6,2E-17$	0,81
8	204	$y=8,3E-01 \times x^6 - 5,7E-06 \times x^5 - 4,3E-06 \times x^4 + 5,9E-12 \times x^3 + 7,4E-12 \times x^2 + 1,9E-17 \times x - 4,1E-18$	0,92
9	204	$y=7,9E-01 \times x^6 + 8,2E-06 \times x^5 - 1,1E-05 \times x^4 - 5,5E-11 \times x^3 + 4,4E-11 \times x^2 + 8,0E-17 \times x - 5,0E-17$	0,71
10	204	$y=8,0E-01 \times x^6 + 1,4E-05 \times x^5 - 9,1E-06 \times x^4 - 8,7E-11 \times x^3 + 3,0E-11 \times x^2 + 1,2E-16 \times x - 3,0E-17$	0,85
11	204	$y=7,3E-01 \times x^6 - 2,7E-05 \times x^5 - 5,2E-06 \times x^4 + 10,0E-11 \times x^3 + 1,1E-11 \times x^2 - 9,2E-17 \times x - 6,9E-18$	0,54

Notes: n – the number of observations (total number of data points from three series, 68 average values calculated from 204 were used to build the regression equation); R² – the coefficient of determination indicating the goodness of fit of the trend line to the actual results; x – the distance from the center of the UAV flight path in cm (-871.3 cm is the leftmost studied point, and 871.3 cm is the rightmost studied point); y – the content of the active substance at distance x in µg/cm².

The correlation analysis between the studied parameters revealed a strong negative correlation between the substance content and the distance at which this quantity is determined ($r = -0.744$). This indicates an inverse relationship: as the distance increases, the content of the studied substance decreases. The relationship between the content and the distance was evaluated using the least squares method. After introducing additional coefficients, we obtained a model with a correlation coefficient of 0.8 (Fisher's criterion – 1748.0).

Based on the data regarding the substance content and the distance at which this quantity was determined, a final equation for predicting the distribution of the substance content in the coverage area was constructed.

The derived regression equation (Formula 1) can be recommended for predicting the distance at which a given content of active substances can be determined during the spraying of plant protection products with UAVs in the future:

$$\text{Distance} = \text{const} + (v_0) \times (X) + (v_1) \times (X)^{0.7} + (v_2) \times (X)^{(2/3)} + (v_3) \times (X)^{(1/3)} + (v_4) \times (X)^{0.3} \quad (1),$$

where Distance = the distance at which the corresponding content of the active substance will be determined (cm);

constant = 768,6395;

$v_0 = -2339,1631$;

$v_1 = 58360,000$;

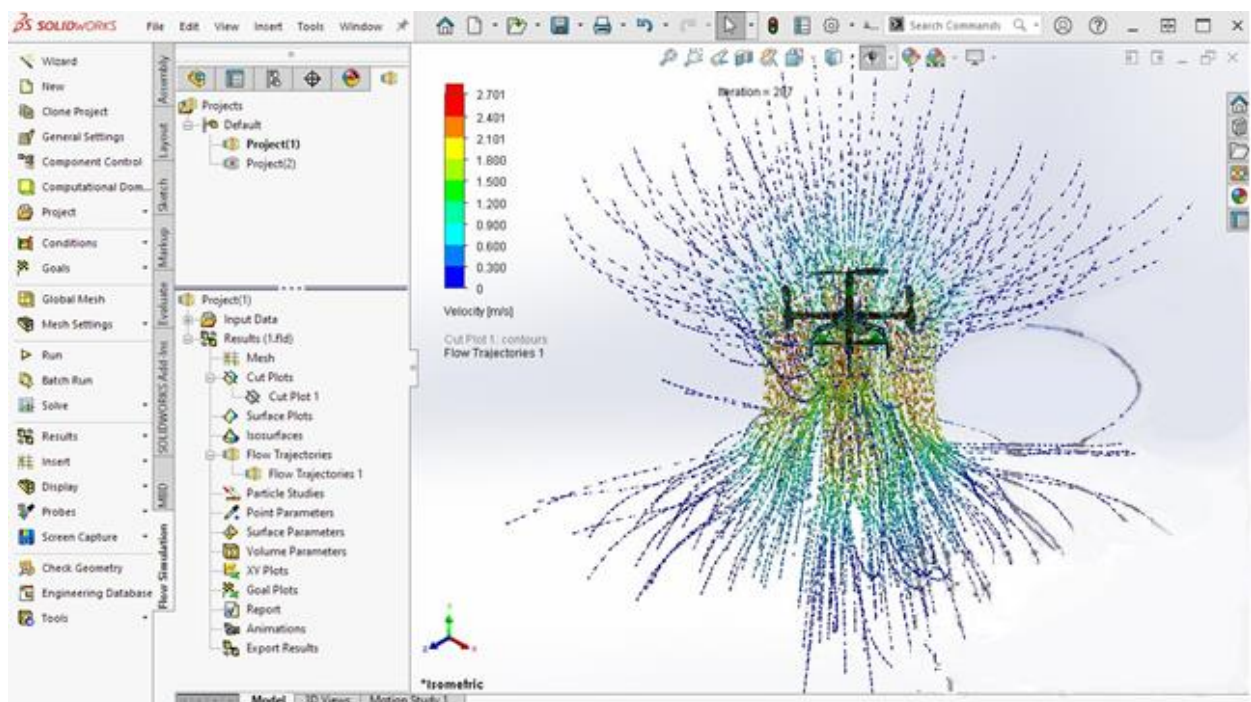
$v_2 = -60670$;

$v_3 = 19310$;

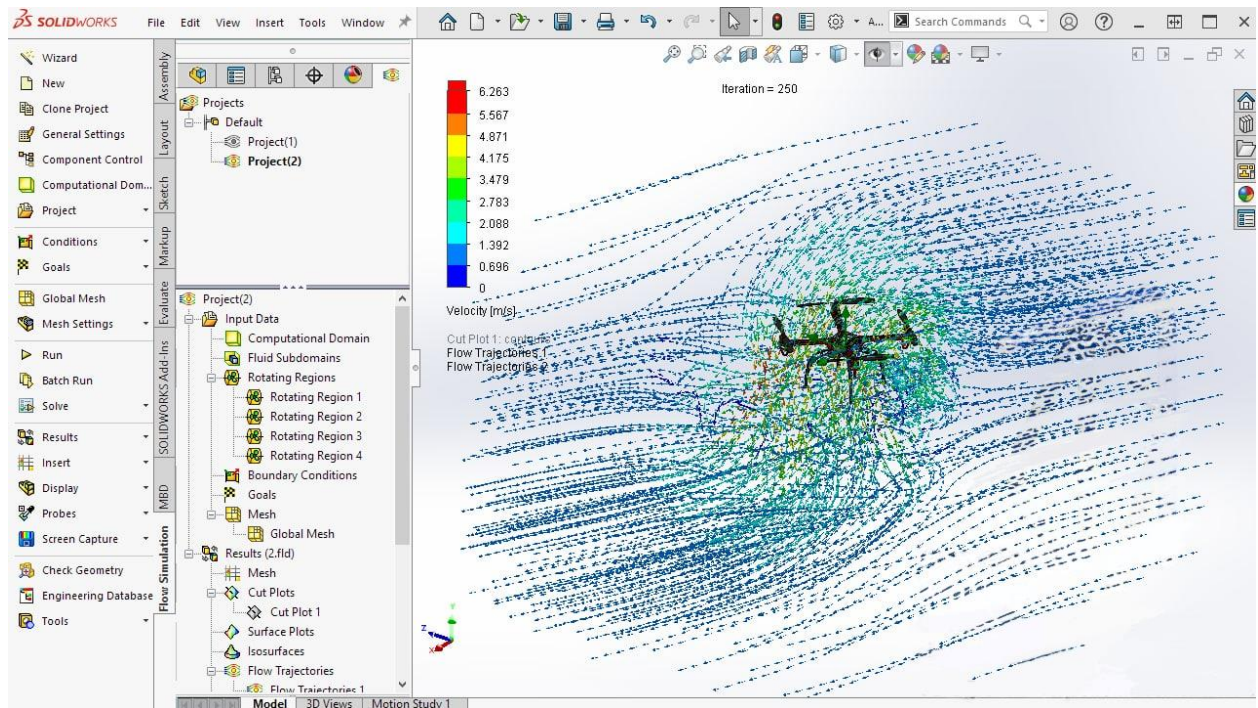
$v_4 = -15330$;

X = the content of the active substance expected to be found ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$).

We also made the first step in developing a computer 3D model of the UAV's operation (Fig. 6), including its geometry, components, placement of pesticide tanks, sprayers, and other equipment. It was determined that the airflow under the UAV's propellers begins forming from the air layer above it; the highest density of pesticide flows is directly under the UAV, and it significantly decreases with increasing distance from it. The spray radius around the UAV is small but significantly depends on the flight height above the crop. The formation of turbulent upward flows (reflected from the surface) is related to the spray height. Lateral airflows play a role in the formation of pesticide solution drift. The possibility of pesticide formulation drift increases with the distance of the downward airflow formed by the UAV's propellers. This is because the force of the airstreams created by the UAV's propellers decreases with increasing distance from it.



A)



B)

Figure 7. 3D model of air mass movement caused by UAV operation during pesticide application: A) without lateral air mass movement; B) with lateral air mass movement

Based on our analysis of the literature, approaches for similar assessments abroad, and the results of our own field hygiene experiments, we propose an adaptation of the existing methodological guidelines "Study, evaluation and reduction of the risk of inhalation and dermal exposure of pesticides to persons who work with them or may be exposed to pesticides during and after chemical protection of plants and other objects", 2009, to the conditions of aerial applications using UAVs.

The indicators to be considered in risk calculations include the rate of pesticide solution consumption, tank volume, UAV productivity, droplet size, nozzle type, application speed, UAV flight height above the crop, and swath width, as well as meteorological conditions during application (humidity, temperature, wind speed, and direction). Additionally, it is essential to account for the absence of a ground support team, the distance of the UAV operator from the treated field, the volume of working solution, and the duration of the treatment. Considering the specifics of pesticide application using UAVs, we propose several additions to sections 3.2, 3.3, 3.9.1, 4.7, 4.7.1, 5.1, and 5.6 of the methodological guidelines.

Based on the results of several years of laboratory and field experimental studies using multirotor UAVs for treating agricultural crops with plant protection products, methodological recommendations for the safe application of pesticides from the air using UAVs have been developed. The document consists of recommendations for training UAV pilots and ground support personnel; managing operator exposure; conducting treatments (risk/benefit assessment, formulation selection, labeling information, buffer (protection) zones, preparation of working solution, application process); implementing safety aspects (monitoring operator health, safety measures and personal protective

equipment, product transportation and storage, product handling, chemical container management, accident procedures, and first aid for poisonings); and record-keeping (description of field spraying, monitoring operator health, local emergency contacts).

This document will enable the achievement of state regulatory goals for the safe aerial application of pesticides using UAVs, contributing to higher levels of environmental safety and public health, positively influencing the development and implementation of technologies, and overall improving business operations in Ukraine by creating new opportunities.

CONCLUSIONS

In the dissertation, based on the analytical generalization of theoretical data from various literary sources, internet resources, and the results of our own laboratory and field experiments, a comparative hygienic assessment of the features, feasibility, and safety of using innovative pesticide application technologies with injector sprayers, unmanned aerial vehicles (UAVs), and 3Rive 3D technology was conducted. An analysis and comparison with the most common application methods today (rod spraying, aerial application) were also performed. The developed theoretical and practical provisions have allowed solving a pressing scientific problem in preventive medicine, specifically justifying approaches and regulations for the safe use of new pesticide application methods, which will reduce the risk of negative impacts on the health of workers, the population, and the ecosystem while enhancing the efficiency of agricultural production.

1. It has been established that improving the safety of working conditions for workers and environmental safety should be based on studying the mechanism of the pesticide spraying process in agricultural production conditions, capable of having a direct or indirect, acute or delayed impact on the environment and consequently on humans. Therefore, the development of regulations and norms for the safe use of preparations for the treatment of agricultural crops using UAVs, injector nozzles, and 3Rive 3D technology, as well as improving the risk assessment methodology considering the specific features of these pesticide application methods, is a crucial step.

2. It has been determined that from 2010 to 2022, there was a significant increase in the use of chemical plant protection products in Ukraine. This is reflected in the growth rate of 158.26% and a compound annual growth rate of 8.23% in the range of approved pesticides. A similar trend is observed for pesticides intended for aerial application (almost doubled). The primary group of pesticides recommended for registration for UAV application includes those already registered for classic aerial application. Preparative forms registered for boom application using slit nozzles can be applied with injector nozzles without restrictions. The 3Rive 3D technology requires a specific preparative form, with only the Brigade 3Rive 3D, CS preparation registered in Ukraine.

3. It has been established that the active substances of Alpha-Diquat Forte SL; Amistar Xtra 280 SC; Reglone Air 200 SL; Brigade 3Rive 3D have a low accumulation capacity in environmental objects and degrade within one growing season when applied using UAVs, injector nozzles, and 3Rive 3D technology. The half-life periods of the active substances of the studied preparations in soil are significantly lower compared to the data established in EU countries with traditional application methods (Wilcoxon T-test

$p=0.016$); whereas, no such difference was found in plants (Wilcoxon T-test $p=0.813$). It has been proven that with the application of innovative pesticide application technologies, cyproconazole, azoxystrobin, diquat dibromide, and bifenthrin can be classified as slightly hazardous (IV hazard class) in soil; diquat dibromide is slightly hazardous (IV hazard class) in vegetating agricultural crops, bifenthrin is moderately hazardous (III hazard class), and azoxystrobin, cyproconazole are hazardous (II hazard class).

4. It has been shown that, following the developed application regulations, the application of the studied preparations using UAVs, injector nozzles, and 3Rive 3D technology at maximum application rates is safe for the population and does not create environmental pollution. According to the calculated integral hazard indicators for potential intake of compounds into the human body from food products, azoxystrobin belongs to hazard class 4 (slightly hazardous), cyproconazole, diquat dibromide, and bifenthrin belong to hazard class 3 (moderately hazardous substances). When using innovative technologies, the integral hazard indicators for potential intake of compounds into the human body from food products are lower but statistically do not differ from those when using classic technologies (Wilcoxon W-test $W=10.5$; $p=0.629$). According to the hazard indicators when pesticides enter water using innovative pesticide application technologies, bifenthrin belongs to hazardous compounds (class 2), azoxystrobin and diquat dibromide to moderately hazardous compounds (class 3), and cyproconazole to extremely hazardous compounds (class 1A) when humans consume contaminated water, respectively. When comparing this indicator calculated using literature data, it was found that with innovative technologies, the integral hazard indicators for pesticides entering water are lower but statistically do not differ (Student's t-test $t=1.73$; $p=0.182$).

5. It has been established that under real conditions of pesticide application using various innovative technologies (air-injector nozzles, UAVs, and 3Rive 3D) following recommended agro-technical and sanitary regulations, no exceeding of sanitary norms is observed in the working air and drift zone, and it has been proven that the potential risk of harmful effects on agricultural workers with combined intake through the skin and respiratory tract, as well as the combined risk of all active substances of the preparative forms, does not exceed 1 a.u., which allows the working conditions to be recognized as acceptable. All the studied active substances, except for diquat dibromide in the composition of Alpha-Diquat Forte SL ($I_{\text{pdt}} = 82$, a.u., < 100), are characterized by sufficient selectivity of action on the target object ($I_{\text{pdt}} = 124-1543$, a.u., > 100) and a low probability of acute dermal effects. I_{pit} values for azoxystrobin, diquat dibromide, and bifenthrin range from 17 to 57, indicating relatively low selectivity of action and a higher risk of acute inhalation toxic effects for operators during treatments.

6. A method for determining the content of the synthetic dye Diamond Blue E 133 in sorbent material (filter paper) was developed, which includes extracting the dye from the sorbent material (filter paper) with distilled water, solid-phase extraction, and quantitative determination of Diamond Blue E 133 by reverse-phase high-performance liquid chromatography with spectrophotometric detection. This method was subsequently used to assess the effectiveness and safety of using different UAV models in combination with any pesticide preparations with various agro-technical characteristics at the pre-registration trials and scientific research stages.

7. Computer modeling of aerial pesticide application using UAVs was conducted. It was found that the highest density of pesticide flows is directly under the agro-drone and decreases with increasing distance from it. The spray radius around the agro-drone is small but significantly depends on the flight height above the crop. Lateral air flows play a role in forming the drift of the pesticide working solution. The possibility of pesticide formulation drift increases with increasing distance of the descending air flow generated by the agro-drone's propellers.

8. Methodological recommendations regulating the use of copter-type UAVs for pesticide application have been developed, which will minimize risks through informed management decisions. This document is an important tool for ensuring the safety and efficiency of using agro-drones in agriculture, as it provides operators and personnel with clear instructions and recommendations for the safe and effective use of this technology.

9. Additions to the methodological recommendations for assessing and reducing risks for workers applying pesticides from the air using UAVs have been proposed, ensuring a more accurate assessment of occupational risks associated with this technology. This approach contributes to creating a more comprehensive and balanced set of recommendations for UAV operators, ultimately ensuring the safety, efficiency, and sustainability of using this technology in agriculture.

10. A calculation model for predicting the content of plant protection chemicals and their spray radius during agricultural crop treatment using UAVs has been justified. It has been proven that the proposed calculation model is adequate with a high approximation coefficient (adjusted $R^2=0.8$ with Prob (F-statistic) <0.05) and can significantly simplify pre-registration trials and monitoring studies during crop treatments using this application method.

PRACTICAL RECOMMENDATIONS

1. Amend the methodological recommendations "Study, evaluation and reduction of the risk of inhalation and dermal exposure of pesticides to persons who work with them or may be exposed to pesticides during and after chemical protection of plants and other objects 8.8.1.4-162-2009," approved by the Ministry of Health of Ukraine on May 13, 2009, No. 324, to include the assessment and reduction of risks for workers applying pesticides from the air using unmanned aerial vehicles (UAVs). It is proposed to consider the following features when calculating risks: the absence of a ground support team, the UAV operator's distance from the treated field, the volume of the working solution, flight height above the crop, and the duration of treatment.

2. During pre-registration trials and scientific research on the sanitary assessment of new technologies for the application of plant protection chemicals, use the synthetic dye Diamond Blue E 133 (as a substitute for the pesticide preparation) and the developed method for determining its content in sorbent material (filter paper), which includes extracting the dye from the sorbent material with distilled water, solid-phase extraction, and quantitative determination of Diamond Blue E 133 by reverse-phase high-performance liquid chromatography with spectrophotometric detection.

3. During training of individuals under the "Training program for workers involved in the organization and direct conduct of work related to the transportation, storage, use,

and trade of pesticides and agrochemicals" (Order of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine No. 158 dated May 27, 1996) in compliance with the requirements of the Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution No. 746 of September 18, 1995, "On approval of the procedure for obtaining permission (certificate) for the right to work related to the transportation, storage, use, and trade of pesticides and agrochemicals" use the developed "Hygienic recommendations for the safe and effective use of sprayers for treating agricultural crops with pesticides" Brochure. 2023. 9 p. ISBN 978-966-460-164-8.

4. To ensure the safety and efficiency of using agro-drones in agriculture, which will enhance the level of environmental safety and public health, it is recommended to conduct training with the issuance of a certificate for the right to work with pesticides for involved individuals (as provided by part two of Article 11 of the Law of Ukraine "On Pesticides and Agrochemicals") using the "Methodological recommendations for the safe application of pesticides from the air using unmanned aerial vehicles (UAVs)" Brochure. 2023. 35 p. ISBN 978-966-460-176-1.

5. For pre-registration trials and monitoring studies conducted by accredited research institutions and the State Service of Ukraine on Food Safety and Consumer Protection during agricultural crop treatments using UAVs, it is recommended to use calculation models to predict surface coverage density and spray radius for the pesticide preparation in this type of treatment

Keywords: pesticides, environmental indicators, working conditions, risk assessment, chemical safety, air pollutants, water pollutants, soil pollutants, toxicity, preventive medicine, food safety.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, індексованих у Scopus та Web of Science:

1. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Shpak B.I., Omelchuk S.T. and Bardov V.G. (2021). Hygienic evaluation of the most common methods of agricultural crops treatment with chemical protection products (literature review). *Medicni perspektivi* [online], T. XXVI (3), pp.19-25. [Available from: 10.26641/2307-0404.2021.3.241913](https://doi.org/10.26641/2307-0404.2021.3.241913) (Особистий внесок здобувача: планування огляду, пошук літератури, підготовка першого варіанту рукопису, редагування тексту статті).
2. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Omelchuk S.T., Bardov V.G. and Vavrinevych O.P. (2021). Comparative hygienic assessment of working conditions and occupational risk in the application of pesticides (on the example of fungicide amistar extra 280, sc) using different types of sprayers. *Wiadomości Lekarskie* [online], T. LXXIV(3), pp.726-730. Available from: 10.36740/WLek202103230 (Особистий внесок здобувача: планування дослідження, відбір зразків, підготовка першого варіанту рукопису).
3. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Omelchuk S.T., Bilous S.V. and Melnychuk F.S. (2022). Ecological and hygienic assessment and regulation of innovative technology of pesticide application using unmanned aerial vehicles. *Rawal Medical Journal* [online]. 47(1), pp.213-216. Available from: <https://www.scopus.com/sourceid/19700175090> (Особистий внесок здобувача: планування дослідження, відбір зразків, проведено систематизацію та узагальнення даних літератури).
4. Tkachenko I., Antonenko A., Borysenko A., Omelchuk S., Melnychuk F. and Anisimov Y. (2022). Assessment of spiromesifen peculiarities of migration into groundwater and surface water and prediction of risks to human health when using such water for drinking purposes. *Rawal Medical Journal* [online]. 47(4), pp.1017-1021. Available from: 10.5455/rmj.85867.20220221122317 (Особистий внесок здобувача: відбір зразків, проведено розрахунок показників міграційної здатності пестициду в ґрунтові та поверхневі води).
5. Melnichuk F., Alekseeva S., Hordiienko O., Nychporuk O. and Borysenko A. (2023). Influence of irrigation on the Sunn pest *Eurygaster integriceps* Put. (Insecta: Heteroptera) in the Central Forest-Steppe of Ukraine. *Ecological Questions* [online]. 34(2), pp.1-11. Available from: [10.12775/EQ.2023.022](https://doi.org/10.12775/EQ.2023.022) (Особистий внесок здобувача: проведено вивчення даних літератури, узагальнення та систематизацію результатів).
6. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Aleksiiichuk V.D., Kondratiuk M.V., Pelo I.M. (2023). Comparative hygienic assessment of the potential diquat hazard to the population when consuming agricultural crops treated with the Reglon Air 200 SL formulation using different application technologies (UAV, aerial, high-clearance rod sprayer treatment). *Wiadomości Lekarskie* [online]. 76(6), pp.1478-1484. Available from: 10.36740/WLek202306122 (Особистий внесок здобувача: планування дослідження, відбір зразків, статистична обробка даних, оцінка адекватності обраних для аналізу показників, оформлення статті).

7. Антоненко А.М., Борисенко А.А., Омельчук С.Т., Пельо І.М., Бабієнко В.В. (2023). Порівняльна гігієнічна оцінка міграції у ґрунтові та поверхневі води діючих речовин пестицидних препаратів після внесення з використанням інноваційних методів та ризику їх негативного впливу на людину при вживанні контамінованої води. *Одеський медичний журнал* [online]. 2 (183), с. 84-87. Article available from <https://repo.odmu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/13891/Babienko.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок показників міграційної здатності пестицидів в ґрунтові та поверхневі води, зроблено висновки, прийнято участь у розробці алгоритму оцінки ризику).

Публікації у фахових виданнях МОН України:

8. Borysenko A.A., Antonenko A.M. (2024). Improvement of working conditions assessment and risk calculation methods taking into account the specific features of pesticide application with unmanned aerial vehicles (UAV). *Український журнал з проблем медицини праці* [online]. 20 (1), с. 54-58. Article available from: <https://ujoh.org/upload-files/doc/vydav/24-01/7.pdf> [Accessed 16.03.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок величин професійного ризику заправника і пілота БПЛА, проведено статистичну обробку отриманих результатів, визначено основні критерії, що впливають на ризик).

9. Омельчук С.Т., Вавріневич О.П., Антоненко А.М., Борисенко А.А., Бардов В.Г. (2018). Гігієнічна оцінка професійного ризику для працівників при застосуванні пестицидів для захисту посадок картоплі. *Medical science of Ukraine* [online]. 14 (3-4), с. 95-102. Article available: from http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnmu_2018_14_3-4_15 [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків повітря, розрахунок професійного ризику для працівників, статистичну обробку отриманих результатів).

10. Антоненко А. М., Вавріневич О. П., Омельчук С. Т., Бардов В. Г., Борисенко А. А. (2019). Гігієнічне обґрунтування критеріїв відбору для проведення моніторингу пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах та ґрунті на прикладі фунгіцидів. Актуальні проблеми сучасної медицини: *Вісник української медичної стоматологічної академії* [online]. 19 (3(67)), с. 104-108. Article available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apsm_2019_19_3_24 [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків сировини, розрахунок параметрів токсичності, періодів напірнування в сільськогосподарській сировині, у ґрунті, статистичну обробку отриманих результатів).

11. Омельчук С. Т., Стеценко О. В., Гиренко Т. В., Борисенко А. А., Алексійчук В. Д. (2019). Гігієнічна оцінка умов праці при застосуванні пестицидів на сої. *Український журнал з проблем медицини праці* [online]. 2019. 15 (3), с. 240-246. Article available from: <https://doi.org/10.33573/ujoh2019.03.240> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків повітря та змиви з поверхонь тіла працівників, розрахунок ризиків інгаляційної токсичності, статистичну обробку отриманих результатів).

12. Борисенко А. А., Антоненко А. М., Шпак Б. І., Омельчук С. Т., Бардов В. Г. (2020). Гігієнічна оцінка застосування пестицидів шляхом використання

інжекторних розпилювачів (огляд літератури). *Український журнал з проблем медицини праці* [online]. 4 (16), с. 302-310. Article available from: <https://doi.org/10.33573/ujoh2020.04.302> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено вивчення даних літератури, узагальнення та систематизацію результатів).

13. Борисенко А.А., Антоненко А. М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г., Борисенко А.В. (2021). Професійні ризики при внесенні пестицидів за допомогою безпілотних літальних апаратів: особливості та порівняльна гігієнічна оцінка. *Медична наука України* [online]. 17 (№ 4), с. 102–107. Article available from <https://doi.org/10.32345/2664-4738.4.2021.15> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків повітря та змиви з поверхонь тіла працівників, розрахунок ризиків інгаляційної та дермальної токсичності, статистичну обробку отриманих результатів).

14. Ткаченко І. В., Антоненко А. М., Борисенко А. А., Коршун О. М., Ліпавська А. О. (2021). Гігієнічна оцінка професійного ризику при застосуванні пестицидних формуляцій на основі спіромезифену та абабектину для працівників сільського господарства. *Український журнал з проблем медицини праці* [online]. 17 (№4), с. 253-260. Article available from: <http://ir.librarynmu.com/handle/123456789/7790> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків повітря та змиви з поверхонь тіла працівників, розрахунок ризиків інгаляційної та дермальної токсичності).

15. Borysenko A. A., Antonenko A. M., Holoborodko S. M., Antonyuk K. P., Milokhov, Korshun O.M., Omelchuk S.T. (2023). Development of the method for determining the content of the synthetic dye diamond blue fcf in the sorption material by the high-performance liquid chromatography method. *Медична та клінічна хімія* [online]. 25 (№ 1 (95)), с. 5–9. Article available from: <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2023.i1.13537> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено підготовку проб до введення у хроматограф, екстракцію барвника з фільтрувального паперу дистильованою водою, твердофазну екстракцію, статистичну обробку отриманих результатів).

16. Борисенко А.А., Антоненко А.М., Бардов В.Г., Кондратюк М.В., Подуст А.О., Омельчук С.Т. (2023). Аналіз динаміки асортименту дозволених до застосування в Україні пестицидів, обробка якими можлива з використанням сільськогосподарських дронів. *Медична наука України* [online]. 19 (№ 1), с. 98-103. Article available from: <https://doi.org/10.32345/2664-4738.1.2023.13> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено оцінку обсягів застосування пестицидів на території України в період з 2010 по 2022 роки, статистичну обробку отриманих результатів, систематизацію та узагальнення даних, зроблено висновки).

17. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Omelchuk S.T., Bardov V.G., Aleksiihuk V.D. (2023). Substantiation of recommendations for safe aerial application of pesticides used by unmanned aerial vehicles (UAVs). *Вісник Вінницького національного медичного університету* [online]. 27 (№2), с. 284-287. Article available from [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2023-27\(2\)-18](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2023-27(2)-18) [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено натурний експеримент, статистичну

обробку отриманих результатів, систематизацію та узагальнення даних, зроблено висновки).

18. Borysenko A.A., Antonenko A.M., Aleksiiichuk V.D., Omelchuk S.T., Bardov V.G. (2023). Risk assessment of the bifenthrin influence on the population health when consuming corn grown using the innovative 3Rive 3D technology. *Довкілля та здоров'я* [online]. 2 (107), с. 54-58. Article available from: <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.02.054> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір зразків кукурудзи та ґрунту, розрахунок ризиків споживання продукції, формування висновків).

19. Коршун О.М., Ващенко Н.М., Мілохов Д.С., Борисенко А.А., Омельчук С.Т. (2023). Застосування методу рідинної хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням для визначення диквату в олійних культурах. *Медична та клінічна хімія* [online]. 25 (№ 2), с. 63-69. Article available from <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2023.i2.13647> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено відбір проб олійних культур, підготовку проб до введення у хроматограф, статистичну обробку отриманих результатів).

20. Борисенко А.А., Кондратюк М.В., Антоненко А.М., Шпак Б.І., Омельчук С.Т. (2023). Гігієнічне обґрунтування моделі розрахунку показників безпечного внесення пестицидів за допомогою безпілотних літальних апаратів. *Український журнал з проблем медицини праці* [online]. 19 (№ 2), с. 107-113. Article available from: <https://doi.org/10.33573/ujoh2023.02> [Accessed 02.01.2024]. (Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок періодів напівруйнування пестицидів, їх дрейфу, зроблено висновки, статистичну обробку отриманих результатів, прийнято участь у розробці алгоритму оцінки ризику).

Публікації у виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах:

21. Borysenko A., Tkachenko I., Antonenko A. (2021). Comparative hygienic assessment of working conditions and potential risks for workers' health when applying pesticides in different technics. *Technology transfer: innovative solutions in medicine* [online]. 6-8. Article available from: <https://doi.org/10.21303/2585-6634.2021.0> [Accessed 02.01.2024].

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. Борисенко А.А., Шпак Б.І., Антоненко А.М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г. (2019). Оцінка безпечності умов праці персоналу при застосуванні пестицидів на сої. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 30-32.

23. Вавріневич, О. П.; Борисенко, А. А.; Анісімов, Є. М.; Бардов, В. Г. (2018). Гігієнічна оцінка умов праці при застосуванні гербіциду Юні-ко 80 МД на посівах кукурудзи. Матеріали міжнародного наукового конгресу «XVII Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств. с. 246-247.

24. Shpak B.I., Antonenko A.M., Vavrinevych O.P., Borysenko A.A., Omelchuk S.T. (2019). Forecasting of the hazard for human health of the consumption of vegetables grown with the application of abamectin-based insecticide formulations.

Medical Sciences: history, the present time, the future, EU experience: International scientific and practical conference. p. 224-226.

25. Борисенко А.А., Шпак Б.І., Антоненко А.М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г. (2020). Гігієнічна оцінка умов праці при застосуванні пестицидів за допомогою інжекторних форсунок різних видів. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 41-42.

26. Антоненко А.М., Борисенко А.А., Хоменко І.М., Авраменко Л.М. (2021). Гігієнічна оцінка способів обробки сільськогосподарських культур хімічними засобами захисту. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 30-31.

27. Антоненко А.М., Вавріневич О.П., Борисенко А.А., Шпак Б.І., Омельчук С.Т. (2020). Гігієнічна оцінка впливу фізичних факторів навколишнього середовища на величину ризику сільгоспрацівників при проведенні обробок агрокультур пестицидами. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення України». с. 132-134.

28. Борисенко А.А., Шпак Б.І., Антоненко А.М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г. (2021). Гігієнічна оцінка умов праці при застосуванні пестицидів за допомогою інжекторних форсунок. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 41-42.

29. Кондратюк М.В., Давиденко І.А., Омельчук С.Т., Борисенко А.А. (2021). Вплив хімічного складу води на ефективність пестицидів. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 106-107.

30. Борисенко А.А., Антоненко А.М., Борисенко Н.В. (2021). Безпілотні літальні апарати в сільському господарстві: еколого-гігієнічна оцінка. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України». с. 195-197.

31. Борисенко А.А., Шпак Б.І., Антоненко А.М., Борисенко Н.В. (2022). Гігієнічна оцінка потенційної небезпечності диквату диброміду для споживача при внесенні дроном препарату Реглон Ейр 200 SL, РК для захисту ріпаку та соняшнику. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 34-36.

32. Ткаченко І.В., Антоненко А.М., Борисенко А.А. (2022). Прогнозування виникнення токсичних ефектів у працівників при застосуванні препарату Оберон Рапід 240 SC, КС в сільському господарстві. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України». с. 454-455.

33. Методика визначення вмісту синтетичного барвника Діамантового синього Е 133 в сорбційному матеріалі методом вискоефективної рідинної хроматографії. Інформаційний лист на нововведення в сфері охорони здоров'я. Міністерство охорони здоров'я України. Витяг з протоколу №2 засідання Вченої ради Національного медичного університету імені О.О. Богомольця від 29 вересня 2022 року.

34. Tkachenko I.V., Antonenko A.M., Borysenko A.A., Bardov V.G., Omelchuk S.T. (2022). Human risk assessment of food products produced from agricultural raw materials potentially contaminated with spiromesifen. Українські медичні вісті. 14. (3-4 (92-93)). с. 135.

35. Борисенко А.А., Антоненко А.М., Борисенко Н.В. (2023). Обґрунтування рекомендацій для безпечного застосування пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини». с. 63-64.

36. Рекомендації з безпечного застосування пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Інформаційний лист на нововведення в сфері охорони здоров'я. Міністерство охорони здоров'я України. Витяг з протоколу № 10 засідання Вченої ради Національного медичного університету імені О.О. Богомольця від 27 квітня 2023 року.

37. Борисенко А.А., Кондратюк М.В., Антоненко А.М., Мельничук Ф.С., Алексійчук В.Д. (2023). Гігієнічна оцінка дрейфу пестицидів при їх внесенні за допомогою агродронів. Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference. p. 98-100.

38. Борисенко А.А., Кондратюк М.В., Антоненко А.М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г. (2023). Оцінка потенційного ризику для здоров'я населення при споживанні води та продукції в умовах застосування пестицидів з повітря з допомогою агродронів. Future Healthcare: Innovations, Advances and Progress: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference. p. 47-48.

39. Ткаченко І.В., Антоненко А.М., Борисенко А.А. (2023). Оцінка потенційної небезпечності споживання харчових продуктів із сільськогосподарської сировини, обробленої інсектицидом Оберон Рапід 240 SC на основі спіромезифену та абаментину. Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України: збірка тез доповідей науково-практичної конференції з міжнародною участю. 23. с. 171-172.

40. Ткаченко І., Антоненко А., Борисенко А. (2023). Оцінка ризиків небезпечного впливу інсектициду спіромезифену на професійні контингенти. Комплексне використання ресурсів довкілля. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. с. 134-135.

41. Борисенко А.А., Антоненко А.М., Шпак Б.І., Давиденко І.А. Гігієнічні рекомендації з безпечного та ефективного використання розпилювачів для обробки сільськогосподарських культур пестицидами. Брошура. 2023. 9 с. ISBN 978-966-460-164-8.

42. Борисенко А.А., Антоненко А.М., Омельчук С.Т., Бардов В.Г., Кондратюк М.В. та ін. Методичні рекомендації для безпечного використання пестицидів з повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Брошура. 2023. 35 с. ISBN 978-966-460-176-1.