

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри

Михайло ШУЛЯК

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення рідких мінеральних добрив»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Іван ПОНОМАРЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Група:

\_\_\_\_\_ СТЗ 2402-2м

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав ЗУБКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Суми – 2025

## АНОТАЦІЯ

### **Пономаренко Іван Григорович**

Дослідження факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення рідких мінеральних добрив.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 46 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 1 таблицю, 8 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Мета цього дослідження полягала в тому, щоб порівняти площі, оброблені обприскувачем, до та після встановлення автоматичної системи керування секціями штанги, а також встановити, чи існує залежність між характеристиками форми поля — передусім співвідношенням периметра до площі (П/П) — і рівнем надмірного внесення пестицидів. У процесі дослідження було здійснено детальний порівняльний аналіз середнього відсотка повторного внесення на полях у різні сезони. Показники першого сезону (12,4%) порівнювалися з відповідними результатами другого сезону (6,2%), і виявлене зниження свідчить про істотне покращення точності внесення. Таке помітне скорочення випадків нецільового обробітку дозволяє зробити висновок, що використання автоматизованих систем забезпечує економію ресурсів та зменшення витрат для виробників, що, у свою чергу, може бути вагомим аргументом на користь інвестування у впровадження зазначеної технології.

Поглиблений аналіз додаткових параметрів продемонстрував, що зі зростанням співвідношення П/П, яке характеризує рівень складності конфігурації поля, спостерігається тенденція до збільшення надмірного

внесення як у випадку ручного, так і автоматичного керування секціями штанги. Однак інтенсивність цього зростання суттєво відрізнялася: при ручному керуванні секціями надлишок збільшувався значно швидше. Це означає, що на полях зі складним рельєфом, численними водними шляхами, перешкодами або нерівностями автоматична система демонструє помітну перевагу. Вона здатна більш ефективно реагувати на зміни конфігурації поля, мінімізуючи помилки перекриття та повторного внесення. Таким чином, із зростанням кількості вкрапель або фрагментованості контуру поля автоматичне керування секціями штанги забезпечує виробникам суттєві можливості для підвищення точності, скорочення витрат і поліпшення загальної ефективності технологічного процесу.

Ключові слова: обприскування, повторне внесення, норма внесення, пестициди, технологія змінних норм.

## **ABSTRACT**

**Ponomarenko Ivan Grigorovich**

Study of factors influencing the quality indicators of differentiated application of liquid mineral fertilizers.

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program "Precision farming systems" in specialty 208 "Agroengineering". Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The final qualification work is presented on 46 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 1 table, 8 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

The purpose of this study was to compare the areas treated by the sprayer before and after the application of the automatic boom section control system, as well as to establish whether there is a relationship between the characteristics of the field shape - primarily the ratio of perimeter to area (P/P) - and the level of excessive pesticide application. The study conducted a detailed comparative

analysis of the average percentage of reapplication in the fields in different seasons. The first season (12.4%) was compared with the second season (6.2%), and the decrease revealed a significant improvement in the accuracy of application. Such a significant reduction in non-target cultivation allows us to conclude that the use of automated systems provides resource savings and cost reduction for producers, which, in turn, can be a strong argument in favor of investing in the implementation of this technology.

An in-depth analysis of additional parameters showed that with an increase in the P/P ratio, which characterizes the level of complexity of the field configuration, there is a tendency for overapplication to increase in both manual and automatic boom section control. However, the intensity of this increase was significantly different: with manual section control, the excess increased much faster. This means that in fields with complex terrain, numerous waterways, obstacles or unevenness, the automatic system demonstrates a significant advantage. It is able to respond more effectively to changes in the field configuration, minimizing overlapping and re-application errors. Thus, as the number of applications or fragmentation of the field contour increases, automatic boom section control provides producers with significant opportunities to increase accuracy, reduce costs and improve overall process efficiency.

Keywords: spraying, re-application, application rate, pesticides, variable rate technology.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин .....	11
1.2 Фактори, що впливають на якість обприскування .....	16
1.3 Використання технологій точного землеробства для операцій обприскування.....	26
Розділ 2. Методика досліджень.....	30
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз .....	34
Висновки.....	42
Список використаних джерел.....	43

## **ВСТУП**

### **1. Актуальність теми**

Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується зростанням вимог до точності технологічних операцій, ефективності використання ресурсів та мінімізації негативного впливу на довкілля. Однією з ключових операцій, що визначає продуктивність і стабільність агротехнологічних процесів, є внесення мінеральних добрив у рідкому вигляді. Неефективне або нерівномірне внесення добрив призводить до значних економічних втрат, зниження врожайності, погіршення якості продукції та підвищення ризику забруднення ґрунтових і водних ресурсів.

У цих умовах стрімкого розвитку набувають технології точного землеробства, зокрема системи автоматизованого та диференційованого внесення агрохімікатів. Використання систем автоматичного керування секціями штанги обприскувача дозволяє суттєво зменшити площі повторного обробітку, мінімізувати надлишкове внесення добрив і зробити процес унесення більш екологічно та економічно ефективним. Особливої актуальності ці технології набувають для господарств, що працюють на полях зі складною конфігурацією, фрагментованими межами або численними перешкодами.

Таким чином, дослідження факторів, що впливають на якість диференційованого внесення рідких мінеральних добрив, є важливим як у науковому, так і практичному аспекті. Воно дозволяє підвищити точність операцій, оптимізувати витрати агрохімікатів та сприяти впровадженню інноваційних технологій у сільськогосподарське виробництво.

### **2. Аналіз стану наукової розробки проблеми**

Питання підвищення точності внесення рідких мінеральних добрив розглядалося в наукових працях вітчизняних і зарубіжних дослідників, які акцентують увагу на впливі технічних характеристик обприскувачів, параметрів їх руху, робочого тиску, конструкційних особливостей форсунок

та агрофізичних властивостей ґрунту. Особливе місце займають дослідження у сфері точного землеробства, що розкривають можливості застосування змінних норм внесення, картування урожайності та адаптивного управління технологічними процесами.

Суттєва кількість робіт присвячена вивченню ефективності систем автоматичного контролю секцій штанги обприскувачів, проте питання впливу конфігурації поля на якість диференційованого внесення та аналіз взаємозв'язку між геометричними характеристиками поля (зокрема співвідношенням периметра до площі) і рівнем надмірного внесення добрив досліджені недостатньо. Це створює наукову прогалину, що потребує глибшого аналізу, особливо в умовах зростаючої складності землекористування та потреби у високотехнологічних рішеннях.

### **3. Мета дослідження**

Метою дослідження є встановлення факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення рідких мінеральних добрив, та оцінка ефективності застосування автоматичного керування секціями штанги обприскувача за умов різної конфігурації полів.

### **4. Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є процес диференційованого внесення рідких мінеральних добрив під час виконання технологічних операцій обприскування.

### **5. Предмет дослідження**

Предметом дослідження є показники якості внесення, зокрема рівень надмірного внесення та повторного обробітку, а також вплив геометричних характеристик полів на ефективність системи автоматичного керування секціями штанги.

### **6. Завдання дослідження**

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин та особливості технологій внесення рідких мінеральних добрив.

2. Провести порівняльний аналіз роботи обприскувача до і після застосування автоматичного керування секціями штанги.
3. Визначити залежності між геометрією поля та рівнем надлишкового внесення.
4. Сформувати практичні рекомендації щодо підвищення точності технологічного процесу внесення рідких мінеральних добрив.

#### **7. Методи дослідження**

У роботі застосовано комплекс наукових методів, серед яких: аналіз і систематизація літературних джерел, математична статистика, польові експерименти, методи комп'ютерного моделювання, просторовий аналіз даних, а також порівняльний аналіз показників якості внесення при різних технологічних режимах роботи обприскувача.

#### **8. Структура та обсяг роботи**

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 46 сторінках тексту, містить 1 таблицю, 8 рисунків, 2 додатки та 25 найменувань використаних джерел. Зміст роботи структурований відповідно до логіки проведених досліджень та відображає основні етапи виконання наукової роботи.

## РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин

Обприскувачі належать до ключових сільськогосподарських машин, які застосовуються для внесення пестицидів, гербіцидів, фунгіцидів та добрив на посіви. Їхня ефективність і продуктивність відіграють критичну роль у забезпеченні належного захисту рослин і доставці необхідних поживних речовин. Дотримання спеціальних агротехнічних рекомендацій є надзвичайно важливим для коректної роботи обприскувачів та досягнення бажаних агрономічних результатів при одночасному мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. До таких рекомендацій входять конструктивні особливості, точність внесення, екологічна безпека та зручність використання, а також інші параметри, що забезпечують ефективність роботи.

Одним із ключових агротехнічних вимог є забезпечення високої точності подачі хімічних речовин. Розпилювальні системи повинні гарантувати рівномірне розподілення потрібної кількості пестицидів або добрив по всій оброблюваній ділянці. Це передбачає ретельний контроль над розміром крапель, тиском та швидкістю потоку робочого розчину. Вибір форсунок є особливо важливим, оскільки різні культури, погодні умови та мета застосування визначають оптимальні розміри крапель. Наприклад, дрібні краплі підходять для обробки інсектицидами, спрямованими на невеликих шкідників, проте вони більш чутливі до знесення вітром, тоді як більші краплі забезпечують ефективне внесення гербіцидів, зменшуючи ризик переносу речовини та забезпечуючи контакт із бур'янами.

Точне внесення хімікатів дозволяє ефективно контролювати шкідників, хвороби та небажану рослинність, одночасно мінімізуючи хімічні залишки та негативний вплив на екосистему. Досягнення необхідної точності вимагає дотримання низки агротехнічних принципів, що

включають правильний вибір обладнання, оптимальні робочі параметри, урахування екологічних аспектів і своєчасність внесення. Ці вимоги забезпечують максимальну продуктивність, економічну доцільність і екологічну безпеку технології.

Правильний вибір апаратури для розпилення є фундаментом для забезпечення точності обробки. Різноманітні типи обприскувачів, включаючи штангові моделі, ручні та повітряні системи, слід підбирати відповідно до конкретного виду культури, розмірів поля та типу агротехнічної операції. Форсунки відіграють важливу роль у формуванні крапельного складу та характеру розпилення, безпосередньо впливаючи на рівномірність покриття рослин. Важливо підбирати форсунки з урахуванням хімічного складу робочого розчину та норм внесення. Крім того, правильне калібрування апаратури гарантує точну дозу хімікатів на певну площу, що запобігає надмірному або недостатньому використанню речовин.

Окрім підбору обладнання, слід ретельно контролювати робочі параметри, щоб забезпечити оптимальне нанесення. Потрібно синхронізувати тиск розпилення, об'єм потоку та швидкість руху обприскувача для подачі стабільної дози. Високий тиск формує дрібніші краплі, що покращує покриття поверхні, але одночасно підвищує ризик знесення. Низький тиск утворює крупні краплі, зменшуючи дрейф, проте знижує рівномірність обробки. Швидкість руху також має критичне значення: надто швидке пересування спричиняє нерівномірне нанесення, а надто повільне – призводить до втрат хімікатів і затримок у виконанні польових операцій.

Фактори навколишнього середовища відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності процесу обприскування. Напряма і швидкість вітру, температура повітря та вологість суттєво впливають на поведінку крапель після їхнього випуску з обприскувача. Сильні пориви вітру можуть викликати дрейф розчину, що веде до втрат хімічних препаратів і

можливого негативного впливу на сусідні поля або чутливі екосистеми. Підвищена температура та низька вологість сприяють швидкому випаровуванню рідини, зменшуючи кількість активної речовини, що досягає цільової зони. Для мінімізації таких ризиків обробку краще проводити за умов слабого вітру та у більш прохолодні та вологі періоди доби, наприклад рано вранці або пізно увечері.

Час застосування препаратів також має вирішальне значення для досягнення високої ефективності. Рослини та бур'яни проходять певні стадії розвитку, і точне орієнтування на ці фази підвищує шанси на успішний результат. Наприклад, гербіциди демонструють найкращу дію на молодих бур'янах, що активно ростуть, тоді як фунгіциди потрібно використовувати профілактично, ще до появи ознак захворювання. Несвоєчасне або запізнile внесення може знизити ефективність обробки та вимагати повторних процедур, що підвищує витрати й екологічні ризики.

Сучасні технології, такі як GPS-навігація та автоматичне регулювання норми внесення, стають невід'ємною частиною точного обприскування. Інструменти точного землеробства дозволяють створювати карти полів із врахуванням особливостей ґрунту, стану культур і рівня шкідників. Технологія змінної норми (VRT) дає змогу апаратам автоматично регулювати дозування речовини в реальному часі, забезпечуючи оптимальне покриття кожної ділянки. Це зменшує загальне хімічне навантаження на середовище та сприяє максимізації врожайності.

Отже, агротехнічні вимоги до точності обприскування є комплексними й взаємопов'язаними. Вибір відповідного обладнання, контроль робочих параметрів, уважність до погодних умов і правильний час внесення — усе це критично для отримання бажаного результату. Використання новітніх технологій ще більше підвищує точність операцій, допомагаючи фермерам застосовувати стійкі та продуктивні підходи в сільському господарстві. Дотримання цих принципів гарантує, що

обприскування залишається ефективним інструментом, який поєднує високу продуктивність із збереженням навколишнього середовища.

Норма внесення препарату теж має відповідати агрономічним вимогам. Сучасні машини оснащені системами контролю тиску та поточкорегуляторами, що дозволяють точно дозувати речовину на одиницю площі. Така здатність до адаптації гарантує, що культури отримають необхідну кількість засобу, уникаючи недостатнього дозування, що призводить до неефективного контролю бур'янів і шкідників, або надлишку, який може пошкодити рослини, збільшити хімічні втрати та забруднення довкілля. Регулярне калібрування перед кожним внесенням є критично важливим для підтримки стабільної та точної норми.

Ще однією важливою агротехнічною вимогою є ефективність роботи обприскувача в умовах різноманітних польових ситуацій. Обладнання має демонструвати надійність на різних типах рельєфу, при змінних висотах рослин та щільності посівів. Для тракторних навісних та самохідних моделей обов'язково забезпечується достатній просвіт, щоб уникати пошкодження культур під час роботи. Конструкція машини повинна гарантувати легкість маневрування в вузьких рядах і на нерівних ділянках полів. Штангові обприскувачі оснащуються міцними штангами та регульованими механізмами висоти, що дозволяє підтримувати стабільний кут розпилення та оптимальну відстань над пологом рослин, забезпечуючи рівномірне покриття поверхні посівів.

Екологічна безпека також є критично важливим фактором у сільському господарстві. Сучасні обприскувачі проектуються із застосуванням технологій, що зменшують дрейф, з метою мінімізації випадкового розповсюдження хімічних речовин у нецільові зони. Це дозволяє захистити корисних комах, уникнути забруднення водою і зменшити потенційну небезпеку для здоров'я людей. Використання насадок проти знесення, спеціальних щитків та автоматичних регуляторів висоти штанги допомагає обмежити розсіювання робочого розчину. Додатково,

обприскувачі з інтегрованими GPS-системами точного землеробства дозволяють максимально точно вносити препарати у задані ділянки, оптимізуючи використання хімікатів та знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Серед інших агротехнічних вимог до обприскувачів важливими є зручність у експлуатації та обслуговуванні. Фермерам необхідно мати змогу легко регулювати, очищувати та підтримувати обладнання для забезпечення його довгострокової надійності та ефективності. Функції на кшталт швидкоз'єднувальних форсунок, електронних систем управління та автоматичного калібрування значно спрощують процес роботи, скорочують час простою та підтримують стабільну продуктивність агрегату. Вбудовані датчики та моніторингові системи надають інформацію в режимі реального часу про тиск, швидкість руху та потік робочого розчину, що дає можливість операторам оперативного вносити необхідні коригування під час роботи у полі.

Крім цього, обприскувачі повинні відповідати стандартам безпеки та нормативним вимогам, щоб гарантувати захист оператора і екологічну безпечність. Для цього застосовуються захисні елементи, включаючи закриті кабіни самохідних моделей, системи скидання надлишкового тиску та матеріали, стійкі до впливу хімічних речовин. Дотримання національних і міжнародних правил використання пестицидів забезпечує легальність роботи обладнання та знижує ризики для здоров'я людей і навколишнього середовища.

Підсумовуючи, агротехнічні вимоги до обприскувачів є фундаментальними для забезпечення ефективного, результативного та екологічно безпечного ведення сільського господарства. Вони охоплюють точність внесення препаратів, здатність пристосовуватися до різних польових умов, екологічну безпеку, зручність експлуатації та дотримання нормативних стандартів. Виконання цих критеріїв дозволяє фермерам підвищити ефективність захисту рослин і врожайність, мінімізуючи

використання хімікатів і знижуючи негативний вплив на екосистему. Постійне вдосконалення технологій, включаючи GPS-навігацію та автоматизовані системи керування, сприяє підвищенню функціональності та точності роботи обприскувачів, забезпечуючи сучасні потреби аграрного сектору.

## **1.2 Фактори, що впливають на якість обприскування**

Ефективність обприскування в аграрній сфері, промислових процесах або при контролі шкідників визначає результативність, безпечність та загальну продуктивність проведеної операції. На якість розпилювання впливає низка чинників, серед яких фізико-хімічні властивості робочого розчину, тип та технічні характеристики застосовуваного обладнання, кліматичні та метеоумови, а також особливості роботи оператора. Усвідомлення впливу цих елементів дозволяє точно регулювати процес, зменшувати втрати матеріалів і одночасно знижувати негативний вплив на навколишнє середовище.

### *Властивості рідини*

Хімічний склад, концентрація та в'язкість рідини, що використовується для розпилення, відіграють ключову роль у визначенні якості процесу обприскування. Рідини з підвищеною в'язкістю зазвичай чинять більший опір розпиленню, що призводить до утворення більших крапель, а це може зменшувати рівномірність покриття оброблюваної поверхні. Для покращення розподілу крапель на цільових об'єктах часто додають спеціальні поверхнево-активні компоненти або ад'юванти, які знижують поверхневий натяг. Неправильне або недбале змішування хімічних речовин може викликати засмічення форсунок або нерівномірне розпилення, що негативно впливає на однорідність нанесення.

У сферах сільського господарства, охорони здоров'я та промислового виробництва розуміння взаємозв'язку між властивостями рідини та якістю

обприскування є надзвичайно важливим для підвищення продуктивності та мінімізації витрат матеріалів.

В'язкість, тобто внутрішній опір рідини при течії, безпосередньо впливає на формування крапель. Рідини з підвищеною в'язкістю формують більші краплі, оскільки вони менше дробляться на дрібні частинки. Це призводить до менш рівномірного покриття, знижуючи ефективність обприскування. Навпаки, рідини з невисокою в'язкістю розпадаються на дрібніші краплі, формуючи більш тонку структуру бризок. Проте надто рідкі рідини можуть легко переноситися повітряними потоками, що зменшує точність нанесення і викликає дрейф. Таким чином, досягнення оптимального рівня в'язкості є важливим для поєднання якісного покриття та контролю за переміщенням крапель.

Ще одним важливим фактором є поверхневий натяг, який характеризує силу взаємного притягання молекул на поверхні рідини. Рідини з високим поверхневим натягом формують майже сферичні краплі, що обмежує їх здатність розтікатися по поверхні. В результаті покриття виходить нерівномірним із окремими краплями, а не суцільною плівкою. Рідини з низьким поверхневим натягом легше розтікаються при контакті, забезпечуючи більш рівномірне нанесення. У сільському господарстві для покращення змочуваності листя та підвищення ефективності потрапляння пестицидів або гербіцидів часто застосовують спеціальні поверхнево-активні добавки.

Щільність рідини також визначає якість розпилення, впливаючи на імпульс і проникну здатність крапель. Рідини з великою щільністю утворюють важчі краплі, які менше піддаються впливу повітря та легше долають щільні рослинні покриви або товсті шари об'єкта. Проте надмірно щільні краплі можуть падати швидко, що спричиняє нерівномірне покриття або локальне перенасичення. Рідини з низькою щільністю утворюють легші краплі, що довше залишаються у повітрі, але піддаються дрейфу і можуть не досягти потрібних ділянок.

Летючість, тобто схильність рідини до швидкого випаровування, особливо критична у випадках, коли оброблювана поверхня повинна залишатися покритою достатній час для забезпечення ефективності. Дуже легкі розчини швидко випаровуються, що знижує ефективність обприскування, наприклад у випадку дезінфекційних засобів або агрохімікатів. Випаровування під час розпилення також змінює розмір крапель, що призводить до неповного покриття та збільшення дрейфу. Щоб мінімізувати ці проблеми, часто додають спеціальні компоненти, які сповільнюють випаровування та підвищують ефективність обробки, особливо в умовах високих температур або низької вологості.

Взаємодія цих характеристик значно ускладнює процес розпилення. Наприклад, рідина з підвищеною в'язкістю та сильним поверхневим натягом здатна формувати нерівномірні великі краплі, що погано розпилюються. Навпаки, зміна однієї властивості, наприклад введення поверхнево-активної речовини для зниження натягу, може несподівано вплинути на інші параметри, такі як в'язкість або швидкість випаровування. Це робить необхідним ретельне підбирання складу рідини для досягнення оптимального розпилення.

Підсумовуючи, фізичні характеристики рідини — в'язкість, поверхневий натяг, щільність та летючість — відіграють ключову роль у формуванні якості спрею. Кожна з них визначає такі важливі параметри, як розмір крапель, їх розподіл та покриття поверхні, що має вирішальне значення для отримання бажаного ефекту у різних сферах застосування. Розуміння цих взаємозв'язків дозволяє оптимізувати методи розпилення, забезпечуючи точне нанесення рідини, мінімізуючи втрати та підвищуючи ефективність процесу.

Технологія обприскування має фундаментальне значення в аграрному секторі, промислових операціях та екологічному менеджменті. Одним з визначальних факторів якості є розмір краплі — діаметр окремих частинок рідини, які розсіюються через сопло. Цей параметр безпосередньо впливає

на покриття, ефективність осадження, потенційний дрейф, швидкість випаровування та проникнення в цільову область. Усвідомлення впливу розміру краплі дозволяє точно налаштовувати методику розпилення, знижуючи втрати, екологічні ризики та операційні витрати.

Ще одним важливим аспектом є покриття. Менші краплі забезпечують більшу щільність частинок на одиницю площі, що сприяє рівномірнішому покриттю поверхні. Це особливо актуально у сільському господарстві, де рівномірне внесення пестицидів або добрив гарантує стабільний захист рослин і сприяє росту посівів. Дрібні краплі також легше досягають прихованих ділянок рослин, таких як нижні сторони листя, які часто більш вразливі до шкідників. Водночас вони мають певні мінуси, зокрема підвищену схильність до дрейфу, швидше випаровування та обмежене проникнення.

Проблема дрейфу найчастіше виникає при застосуванні дрібних крапель. Зменшення їх розміру збільшує вплив вітру на траєкторію, що підвищує ризик відхилення від цільової поверхні. Це може призвести до забруднення навколишніх посівів, водойм або житлових зон, створюючи потенційні загрози для екології та здоров'я людей. Тому нормативні вимоги часто передбачають використання більших крапель у чутливих зонах. Форсунки та робочий тиск є ключовими чинниками контролю діаметру краплі, що дозволяє зменшити дрейф без втрати ефективності.

Окрім дрейфу, розмір частинок визначає швидкість випаровування рідини. Дрібні краплі мають більшу площу поверхні відносно об'єму, що прискорює процес випаровування, особливо у спекотні або вітряні дні. Швидке випаровування може ускладнити осадження, оскільки краплі можуть випаруватися, не досягнувши поверхні обробки, знижуючи ефективність нанесення. Для зменшення цього впливу аграрії застосовують спеціальні антивипаровувальні добавки або регулюють час обприскування, наприклад, на ранні або пізні години дня, коли температура нижча.

З іншого боку, великі краплі мають певні переваги, зокрема покращене проникнення та зменшений ризик дрейфу. У промисловому та аграрному обприскуванні здатність рідини проникати через щільні кронові шари рослин або ґрунтову поверхню відіграє вирішальну роль. Більш масивні краплі володіють більшою кінетичною енергією, що дозволяє їм долати перешкоди, такі як густе листя, і досягати нижніх частин цільових об'єктів. Це особливо важливо під час контролю шкідників, які можуть перебувати у глибших шарах рослинності або ґрунту. Водночас, великі краплі здатні створювати нерівномірне покриття, оскільки на одиницю площі потрапляє менше крапель, підвищуючи ймовірність утворення необроблених ділянок.

Крім того, розмір крапель визначає їх здатність утримуватися на різних типах поверхонь. Листя з восковим нальотом або неправильною текстурою може сприяти скочуванню або розбризкуванню більших крапель, що знижує ефективність обробки. У таких ситуаціях дрібніші краплі демонструють кращу адгезію, більш стійко прилипаючи до цільової поверхні. Проте дуже дрібні краплі довше залишаються у повітрі, що зменшує швидкість осадження та ефективність доставки. Тому визначення оптимального розміру краплі є критично важливим для забезпечення балансу між адгезією, зниженням дрейфу та уникненням втрат рідини.

Підсумовуючи, величина крапель суттєво впливає на якість та ефективність розпилення, визначаючи рівномірність покриття, ризик дрейфу, інтенсивність випаровування, проникнення та утримання на поверхнях. Дрібні краплі забезпечують щільніше покриття, але одночасно більш схильні до дрейфу та швидкого випаровування, тоді як великі краплі глибше проникають і зменшують дрейф, проте можуть погіршувати однорідність розподілу. Ідеальний розмір краплі залежить від конкретного виду застосування, кліматичних умов та характеристик цільових поверхонь. Регулюючи тип форсунки, тиск і форму розпилення, оператори можуть контролювати розмір крапель, що дозволяє підвищити ефективність

обробки та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Досягнення такого балансу є ключовим для стійких і результативних методів розпилення у різних галузях.

Вода залишається основним компонентом для аграрних і промислових технологій, таких як внесення пестицидів, обробка гербіцидами або формування покриттів на поверхні. Разом з тим, хімічні властивості води, особливо її жорсткість, значною мірою визначають ефективність і якість обприскування. Під жорсткістю води розуміють концентрацію розчинених мінералів, головним чином іонів кальцію ( $\text{Ca}^{2+}$ ) та магнію ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Ця характеристика впливає не лише на стабільність робочого розчину, але й на його здатність правильно доставляти активні речовини до цілі. Усвідомлення того, як жорсткість води впливає на процеси обприскування, має першорядне значення для оптимізації продуктивності та отримання стабільного результату.

Якщо для приготування розчинів для обприскування використовується жорстка вода, може виникнути низка хімічних реакцій між мінеральними компонентами та активними складовими гербіцидів, пестицидів або добрив. Багато агрохімікатів містять речовини, здатні формувати нерозчинні сполуки з іонами кальцію чи магнію, що призводить до зменшення розчинності та утворення осаду. В результаті концентрація діючої речовини знижується, що безпосередньо впливає на ефективність обробки. Особливо критично це для гербіцидів на основі гліфосату, оскільки кальцій і магній утворюють солі гліфосату, які зменшують його всмоктування рослинами, обмежуючи дію препарату.

Крім хімічної взаємодії, жорстка вода впливає і на фізичні характеристики робочих розчинів. Вона здатна підвищувати поверхневий натяг, що спричиняє формування більших крапель під час розпилення. Великі краплі, у свою чергу, частіше відскакують від листя та стебел замість того, щоб залишатися на поверхні, зменшуючи покриття та проникнення активних компонентів. Через це контроль шкідників або бур'янів може бути

недостатнім, що змушує застосовувати вищі норми або повторні обробки, підвищуючи витрати та вплив на екологію.

Обприскувальна техніка також страждає від використання жорсткої води. Розчинені мінерали сприяють накопиченню осаду та засміченню форсунок, що порушує рівномірність розпилення. Як наслідок, деякі ділянки поля отримують недостатню дозу хімікату, тоді як інші піддаються надмірному впливу, підвищуючи ризик пошкодження рослин. З часом відкладення накипу можуть спричинити корозію деталей та скоротити термін служби обладнання, що потребує частішого технічного обслуговування або заміни компонентів.

Щоб зменшити негативний ефект жорсткої води, застосовують кілька підходів. Один із найпоширеніших – використання кондиціонерів або ад'ювантів, які нейтралізують іони кальцію і магнію. Наприклад, у розчинах гербіцидів часто додають сульфат амонію, що зв'язує кальцій і запобігає його взаємодії з активними речовинами. Також у промислових та сільськогосподарських практиках використовують пом'якшену або деіонізовану воду, щоб повністю уникнути присутності іонів жорсткості. Регулярне обслуговування обприскувального обладнання та видалення накипу допомагає підтримувати його довговічність і ефективність розпилення.

Отже, твердість води має визначальний вплив на якість роботи розпилювальних систем. Жорстка вода здатна знижувати хімічну активність препаратів, зменшувати покриття та спричиняти механічні проблеми обладнання. Усвідомлення цих факторів і впровадження методів пом'якшення дозволяє підвищити ефективність обробки, забезпечити економію ресурсів і мінімізувати шкоду для навколишнього середовища. Контроль параметрів води є ключовим у сільському господарстві, при боротьбі зі шкідниками та у промислових процесах, гарантуючи оптимальне використання хімічних засобів, економічну доцільність і екологічну стабільність.

Вибір форсунки відіграє важливу роль у формуванні крапель, їх розподілі та покритті рослин. Плоскі віялові насадки забезпечують вузьке розпилення, що підходить для точного нанесення, а конусні створюють ширше покриття. Зношені форсунки нерідко спричиняють нерівномірний розподіл або стікання крапель, що зменшує ефективність обробки. Тому правильний підбір насадок відповідно до цілей обприскування та їх своєчасне обслуговування є критично важливими для досягнення високої якості розпилення та повного покриття рослин.

Тиск, під яким рідина подається для розпилення, безпосередньо впливає на величину крапель і площу покриття. Підвищений тиск формує менші краплі, що покращує рівномірність нанесення, проте підвищує ризик дрейфу. Навпаки, зниження тиску забезпечує утворення більших крапель, які менше схильні до перенесення повітрям, але при цьому можуть не забезпечити достатнього покриття поверхні. Підтримка оптимальних значень тиску та об'єму подачі рідини гарантує рівномірне нанесення без надмірного стікання або розсіювання в повітрі.

Зовнішні умови, такі як швидкість вітру, температура повітря та вологість, суттєво впливають на якість обприскування. Вітер здатен переносити краплі, що призводить до випадкового осадження і забруднення суміжних територій. Підвищена температура і низька вологість прискорюють випаровування рідини, зменшуючи розмір крапель до того, як вони досягнуть оброблюваної поверхні. Тому обприскування у спокійні дні або у ранкові та вечірні години дозволяє пом'якшити негативний вплив зовнішніх факторів.

Кваліфікація та досвід оператора мають ключове значення для забезпечення ефективного розпилення. Працівники повинні регулярно перевіряти і калібрувати обприскувач, щоб переконатися, що машина подає правильну дозу рідини на одиницю площі. Некоректне калібрування призводить до недостатнього або надмірного внесення, що може знизити ефективність обробки або пошкодити рослини. Важливе також навчання

поводженню з обладнанням, правильному змішуванню препаратів та дотриманню заходів безпеки для досягнення високої якості обприскування.

Швидкість руху обприскувача по полю визначає рівномірність розподілу спрею. Надто швидкий рух викликає нерівномірне покриття, а повільний — призводить до локального надмірного нанесення. Також на схему розпилення впливає висота штанги. Підтримка оптимального положення штанги забезпечує правильне перекриття між проходами, запобігаючи пропускам або надлишковому накопиченню рідини. Висота штанги, яка вимірюється як вертикальна відстань між соплом і цільовою поверхнею, безпосередньо визначає ефективність покриття, розподіл розміру крапель, схильність до дрейфу та однорідність обробки. Розуміння правильного положення штанги є критичним для захисту врожаю та оптимальної доставки поживних речовин при мінімальному впливі на навколишнє середовище.

При правильній висоті штанги форсунки подають краплі у найефективнішому порядку, забезпечуючи максимальне покриття площі. Зниження штанги зменшує відстань, яку долають краплі, мінімізуючи вплив зовнішніх умов, таких як вітер і випаровування. Це підвищує ймовірність того, що потрібна доза досягне листя або ґрунту і подіє належним чином. Якщо ж штанга піднята занадто високо, краплі більше схильні до розсіювання, що призводить до нерівномірного покриття та непередбачуваного нанесення.

Однією з основних проблем неправильного положення штанги є дрейф крапель — ненавмисне перенесення рідини за межі цільової ділянки. Підняття штанги збільшує ймовірність дрейфу, особливо за вітряних умов, оскільки краплі довше перебувають у повітрі. Дрібні частинки особливо чутливі до перенесення, що може викликати забруднення суміжних полів, пошкодження культур або зменшення ефективності захисту від шкідників. Зменшення висоти штанги обмежує знесення, утримуючи краплі ближче до запланованої зони нанесення.

Рівномірний розподіл обприскуваного розчину є ще одним критично важливим показником, на який безпосередньо впливає висота штанги. Конструкція форсунок передбачає перекриття зон розпилення для забезпечення однорідного покриття всієї площі поля. Якщо штанга встановлена занадто низько, перекриття форсунок може стати недостатнім, що призводить до неповного внесення хімікатів у певних ділянках. У протилежному випадку, надмірно піднята штанга здатна спричинити надлишкове внесення на окремих сегментах через надмірне перекриття струменів. Підтримання оптимальної висоти дозволяє досягти правильного балансу між перекриттям і рівномірністю покриття, що важливо для максимізації продуктивності та мінімізації витрат хімічних речовин.

Висота штанги також залежить від вибору типу форсунок і налаштувань робочого тиску. Наприклад, віялові форсунки або насадки з низьким дрейфом дуже чутливі до змін висоти, оскільки їх кути розпилення і розмір крапель оптимізовані для конкретної відстані від поверхні. Використання невідповідної висоти з цими форсунками може порушити утворення крапель і спотворити малюнок покриття. Крім того, підняття штанги вгору часто потребує збільшення тиску, щоб зберегти достатнє покриття, що може призводити до утворення дрібніших крапель, більш схильних до знесення вітром. Це підкреслює тісний зв'язок між висотою штанги, типом насадки і якістю обробки рослин.

У рамках точного землеробства сучасні технології, наприклад автоматизовані системи контролю висоти штанги, дозволяють підтримувати її оптимальний рівень під час руху техніки полем. Такі системи застосовують датчики для визначення рельєфу ґрунту та корекції положення штанги в реальному часі, забезпечуючи стабільну схему розпилення навіть на нерівній поверхні. Використання подібних технологій зменшує ймовірність людських помилок і підвищує точність обприскування, сприяючи більш сталим методам ведення сільського

господарства завдяки підвищеній ефективності застосування хімікатів і зниженню екологічних ризиків.

Підсумовуючи, висота штанги має ключове значення для забезпечення високої якості обприскування, оскільки вона впливає на покриття, потенціал дрейфу, однорідність та розподіл крапель. Правильне встановлення штанги гарантує раціональне використання агрохімікатів, мінімізує відходи та зменшує негативний вплив на навколишнє середовище. Фермери повинні враховувати цей параметр разом із типом форсунок, тиском розпилення і погодними умовами для досягнення оптимального результату. Використання сучасних систем контролю дозволяє підтримувати точну висоту штанг, що сприяє підвищенню врожайності та більш сталому підходу до землеробства.

Отже, ефективність обприскування визначається низкою взаємопов'язаних факторів. Для досягнення високої якості розпилення важливо ретельно підбирати та обслуговувати обладнання, контролювати умови навколишнього середовища, правильно готувати хімічні розчини і кваліфіковано експлуатувати техніку. Контролюючи ці аспекти, оператори можуть підвищити продуктивність, скоротити витрати ресурсів і мінімізувати екологічний вплив, що в кінцевому результаті забезпечує бажаний ефект від обприскування.

### **1.3 Використання технологій точного землеробства для операцій обприскування**

Сучасне сільське господарство переживає справжню революцію завдяки технологіям точного землеробства, які надають фермерам можливість ефективніше використовувати наявні ресурси, підвищувати врожайність культур і водночас зменшувати негативний вплив на природу. Однією з ключових сфер застосування цих інновацій є обприскування, де контроль над дозуванням добрив, пестицидів, гербіцидів і фунгіцидів безпосередньо впливає на продуктивність сільгоспкультур та оптимізацію

витрат. У традиційних підходах до обприскування часто застосовується рівномірне покриття всього поля, що спричиняє надмірне використання хімікатів і непередбачувані екологічні наслідки. Технології точного землеробства дозволяють уникнути цих проблем, забезпечуючи точкове внесення речовин на основі детальної аналітики та обробки даних.

Важливим елементом такого точного обприскування є використання геопросторових рішень, зокрема GPS-навігації та геоінформаційних систем (GIS). Завдяки цим технологіям фермери можуть створювати точні карти полів і розподіляти їх на окремі зони управління. Визначаючи ділянки з різним рівнем розвитку культур чи наявністю шкідників, аграрії отримують змогу налаштовувати обприскування відповідно до локальних потреб, а не обробляти всю площу однаково. Це дозволяє не лише скоротити витрати на хімікати, але й зменшити експлуатаційні витрати, а також мінімізувати забруднення водойм, покращуючи екологічну стійкість господарства.

Додатково дистанційне зондування та використання дронів підвищують точність внесення засобів захисту рослин, надаючи оперативну інформацію про стан посівів. Безпілотні літальні апарати, оснащені мультиспектральними або тепловізійними камерами, здатні робити детальні знімки полів і виявляти стресові або заражені шкідниками ділянки, які не помітні неозброєним оком. Інтегруючи ці дані в спеціальне програмне забезпечення для прийняття рішень, фермери можуть формувати рецепти із змінною нормою внесення, вказуючи обприскувачам застосовувати хімікати тільки там, де це дійсно потрібно, і у відповідних дозах. Такий підхід дозволяє уникнути недостатнього оброблення проблемних зон та запобігти зайвому внесенню речовин у здорові частини полів.

Технологія змінної норми обприскування забезпечує фундаментальні зміни в сучасному сільському господарстві, вирішуючи проблему неоднорідності полів та підвищуючи точність застосування ресурсів. Вона сприяє економному використанню добрив і пестицидів, знижує навантаження на довкілля та забезпечує фінансову ефективність. Хоча

питання вартості обладнання та обробки великих обсягів даних залишаються актуальними, постійний розвиток інновацій у агротехніці робить технології VRT дедалі доступнішими. У прагненні поєднати високу прибутковість із екологічною відповідальністю, обприскування із змінною нормою стає ключовим кроком на шляху до розумного, ефективного та стійкого ведення господарства.

Однією з головних переваг використання технологій VRT під час обприскування є можливість враховувати просторові відмінності ґрунту, стан рослин та рівень ураження шкідниками. Поля рідко бувають однорідними за фізичними чи хімічними характеристиками, а різні ділянки посівів часто потребують різного обсягу добрив чи пестицидів. Система VRT дозволяє аграріям оцінювати цю неоднорідність за допомогою таких інструментів, як дрони, супутникові знімки або аналіз ґрунтових проб. На основі отриманих даних створюються карти, які визначають оптимальні норми внесення хімікатів у межах одного поля. Такий таргетований підхід забезпечує більш раціональне використання ресурсів та сприяє підвищенню врожайності й покращенню якості продукції.

Крім аерофотознімків, дані можна збирати за допомогою датчиків Інтернету речей (IoT), розташованих безпосередньо на полях. Вони фіксують показники вологості ґрунту, температуру та фізіологічний стан рослин. Система працює у взаємодії з платформами прогнозової аналітики, що дозволяє передбачати спалахи шкідників або ризики захворювань та оперативно планувати обприскування. Наприклад, аналіз погодних даних допомагає визначити оптимальний час внесення хімікатів, уникаючи умов сильного вітру чи дощу, які можуть знизити ефективність препаратів або перенести їх на сусідні ділянки.

Розвиток інтелектуальних обприскувачів із сучасними насадками та системами контролю значно підвищив точність внесення хімікатів. Такі пристрої здатні автоматично коригувати схему обприскування, розмір крапель та швидкість потоку залежно від даних, що надходять у режимі

реального часу з датчиків або карт-рецептів. Деякі моделі оснащені технологіями машинного зору, використовуючи камери для розпізнавання бур'янів та шкідників і спрямовуючи хімікати лише на виявлені цілі, замість обробки всієї площі посіву. Такий вибіркового підхід дозволяє економити пестициди та знижує ймовірність формування стійких бур'янів.

Окремо варто відзначити зростаючу популярність автономних розпилювачів. Ці машини, керовані GPS та алгоритмами штучного інтелекту, здатні покривати великі площі майже без участі людини, забезпечуючи рівномірне внесення хімікатів та знижуючи витрати на робочу силу. Крім того, автономні системи зменшують контакт оператора з токсичними речовинами, підвищуючи безпеку праці на полі.

Незважаючи на численні переваги, впровадження технологій точного обприскування стикається з певними складнощами. Початкові капіталовкладення можуть бути значними, а фермери повинні витратити час на навчання для ефективного використання обладнання. Управління великими обсягами даних також викликає труднощі, адже інформацію слід інтегрувати з різних джерел — дронів, датчиків, прогнозів погоди — щоб отримати практичні рекомендації. Проте, з удосконаленням технологій та їх більшою доступністю ці перешкоди поступово зменшуються.

Підсумовуючи, системи точного землеробства змінюють традиційні підходи до обприскування, дозволяючи застосовувати сільськогосподарські хімікати максимально цільово на основі даних. Використовуючи GPS, дистанційне зондування, інтелектуальні обприскувачі та автономні машини, фермери можуть оптимізувати витрати, покращити стан посівів та знизити негативний вплив на довкілля. Хоча певні виклики залишаються, перспективи точного обприскування виглядають обнадійливими, оскільки інновації продовжують розвиватися, відкриваючи нові можливості для сталого та ефективного землеробства.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення дослідів було обрано поля з різними формами — «правильними» та «неправильними», багато з яких мали природні або штучні перепони, такі як зарослі травою водні канали, дерева та кущі. Загалом до аналізу увійшли двадцять одне поле різного розміру та конфігурації, загальною площею 578 га. Деякі ділянки були вільні від будь-яких перешкод, тоді як інші мали різноманітні водні перешкоди, частково вкриті травою та деревами.

Площа полів у дослідженні коливалася від 3,1 до 101 га, при цьому середній розмір однієї ділянки становив 27,5 га. Всі дослідні поля піддавалися обробці першими досходовими гербіцидами протягом вегетаційних сезонів 2024 та 2025 років.

У дослідженні застосовувався самохідний обприскувач *Apache AS710 (Equipment Tech., Ind.)*, оснащений штангою шириною 24,76 м, на якій розміщувалися 65 форсунок з кроком 38,1 см. Дані GPS для автоматичного керування машиною забезпечував DGPS – приймач *Phoenix 2 (H) (Raven Ind., Sioux Falls, S.D.)* з частотою 10 Гц. Система автоматичного управління *SmarTrax (Raven Ind., Sioux Falls)* була налаштована так, щоб забезпечити перекриття 15 см між суміжними проходами штанги.

Оператор використовував контролер норми внесення *SCS 4400 (Raven Ind., Sioux Falls, S.D.)* для підтримки встановленої норми внесення рідини під час роботи, а також мав можливість вручну керувати окремими секціями штанги.

Бортовий комп'ютер обприскувача (*Envizio Plus, Raven Industries*) відображав на екрані карту поля із позначеними ділянками, які вже були оброблені під час попередніх проходів. Він також записував GPS-координати, швидкість руху, курс транспортного засобу, площу покриття

обприскуванням, висоту штанги та приблизну кількість розпилу. Дані збиралися з мінімальною частотою 1 Гц, а додаткові — під час включення або відключення окремих секцій.

Площі, що вже були обприскані, фіксувалися шляхом створення полігонів, які зберігалися у шейп-файлах. Комп'ютер генерував кожен полігон на основі поточних GPS-координат, пройденого шляху та активних контрольних секцій. Якщо всі секції штанги були увімкнені, ширина полігону відповідала 24,76 м; у випадку часткового включення лише деяких секцій, ширина полігону визначалася шириною активних ділянок.

Під час робіт у першому сезоні штанга обприскувача була розділена на п'ять окремих секцій. Кожною з них оператор міг керувати індивідуально, використовуючи перемикачі на регуляторі норми внесення. Зовнішні ліву та праву секції штанги мали ширину 305 см, середні секції з обох боків — по 609 см, а центральна частина штанги — 648 см. Управління всіма секціями здійснювалося вручну: оператор вмикав або вимикав секції, орієнтуючись на інформацію з дисплея бортового комп'ютера або на мітки пінного маркера. Проте під час особистого спілкування з оператором з'ясувалося, що фактично ручне керування окремими секціями застосовують досить рідко. У більшості випадків вся штанга працює як єдина керована секція. Причиною цього було те, що обприскувач рухався зі швидкістю понад 19 км/год при вході у зони розвороту, що залишало оператору дуже мало часу на переключення окремих секцій під час дроселювання та маневрування.

На початку другого сезону на обприскувач додатково встановили два поточні клапани для розділення зовнішніх секцій штанги навпіл. Початкові 305-сантиметрові частини поділили на дві рівні секції по 152,5 см, що дозволило отримати сім окремих керованих секцій по всій ширині штанги. Далі у систему керування обприскувачем інтегрували вузол автоматичного управління секціями (*AccuBoom, Raven Ind., Sioux Falls, S.D.*). Автоматизована система у поєднанні з польовим комп'ютером

забезпечувала контроль за вже обробленими ділянками поля. Такі рішення були розроблені для гарантування повного покриття площі. Наприклад, при роботі по рядках секцію штанги не вимикають, доки вона повністю не пройде оброблену територію, що призводить до дворазового обприскування невеликої частини, проте забезпечує повну обробку гербіцидами сходів.

Шейп-файли оброблених ділянок, представлені у вигляді набору полігонів, було завантажено з бортового комп'ютера у квітні цього року. Пристрій зберігав географічні координати кожного полігону, включаючи широту та довготу з точністю до десяткових градусів. Дані імпортувалися до *ArcMap* (*ArcGIS v9.3, ESRI, Cal.*) і проєктувалися з формату WGS84 у систему координат *NAD 1983 State Plane Kentucky FIPS 1600* м. У *ArcMap* також були завантажені високоякісні аерофотознімки 2020 року для кожного поля. Після створення шейп-файлів підсумовувалися зареєстровані площі полігонів для визначення загальної обробленої території окремих полів. Потім межі всіх досліджуваних ділянок формувалися шляхом оцифрування зовнішніх контурів зон покриття, створених для кожного поля.

Усі водні перешкоди, покриті травою, або інші польові бар'єри, які не потребували обприскування, були виключені з меж досліджуваного поля. Межі полів були зафіксовані як один багатокутник у проєкційних географічних координатах *NAD State Plane Kentucky FIPS*. Для визначення площі кожного поля використовувався інструмент «обчислення геометрії» в *ArcMap*, а отримані значення були збережені в гектарах. Відсоток перевищення площі покриття для всіх полів розраховували, віднімаючи площу обприскування від загальної площі поля та ділячи отриману різницю на площу поля. Також у *ArcMap* було визначено периметр кожного поля, причому в обчислення включали довжини меж водних бар'єрів та інших включень на території. Для отримання співвідношення периметр/площа ( $\text{П/П, м}^{-1}$ ) кожне значення периметра ділили на площу відповідного поля.

Далі було побудовано графік залежності випадків подвійного внесення пестицидів при ручному та автоматичному керуванні секціями штанги від значень П/П, а до отриманих даних підводили трендову лінію, щоб перевірити наявність взаємозв'язку між подвійним обприскуванням і співвідношенням периметр/площа. Крім того, показник П/П наносили на графік відносно площі полів (га), щоб продемонструвати взаємозв'язок між кривизною та розміром досліджуваних ділянок.

Відсотки перевитрати у зоні обробітку для всіх полів за перший та другий сезони були імпортовані до MS Excel. На основі цих даних будували гістограми, щоб оцінити, чи розподіл має нормальний характер. Для більш детального аналізу застосовували статистичну обробку в SAS, використовуючи узагальнену лінійну модель для перевірки впливу факторів та визначення, чи призводили два режими внесення (ручне керування штангою з п'ятьма секціями та автоматичне керування штангою з сімома секціями) до суттєвих відмінностей у відсотках для досліджуваних полів. У цьому статистичному аналізі застосовувався тест LSD (двосторонньої найменшої значущої різниці), при значенні  $\alpha = 0,05$  відмінності вважалися статистично значущими.

### РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Графік полігонів зони внесення для поля 20, створений бортовим комп'ютером, у режимах ручного та автоматичного керування секціями штанги представлено на рис. 1. Під час обох налаштувань оператор почав обприскування, попередньо здійснивши один обхід по межі поля. Наступними виконувалися паралельні проходи для обробки внутрішньої частини ділянки. Усі проходи стартували з південної межі та рухалися у напрямку півночі. Важливо відзначити, що високу ефективність автоматичного керування секціями штанги було помітно при обприскуванні уздовж північно-східного краю, де розташовані точкові ряди.

Під час першого проходу через зону, що вже була оброблена, оператор намагався уникнути подвійного внесення, вручну вмикаючи п'ять секцій штанги. Проте у наступних проходах увімкнення та вимкнення здійснювалося одночасно для всієї штанги, що спричинило збільшення площі перекриття. У режимі ручного внесення обприскувач також розпилював невелику частку розчину за межами поля, у ділянках, визначених як перешкоди.

Очевидно, що надмірне перекриття біля північно-східної межі було суттєво зменшене завдяки автоматичному керуванню секціями, оскільки польовий комп'ютер активував секції штанги відповідно до інформації про раніше оброблені площі. Додатково, на рис. 1 показано переваги використання менших секцій на кінцях штанг. Під час першого проходу на південному краю (крім граничного ряду) обприскувач заїжджав на вже оброблену межу, і бортовий комп'ютер відключав крайню праву секцію для зменшення перекриття.

Слід відмітити, що значна частина скорочень зон покриття при обприскуванні між першим та другим роком пояснюється застосуванням автоматичного управління секціями штанги. Однак додатковим чинником зменшення надмірного внесення стала наявність контрольної секції. На рис.

2 наведено приклад цього ефекту через порівняння трьох різних режимів роботи обприскувача на пунктирних рядах.

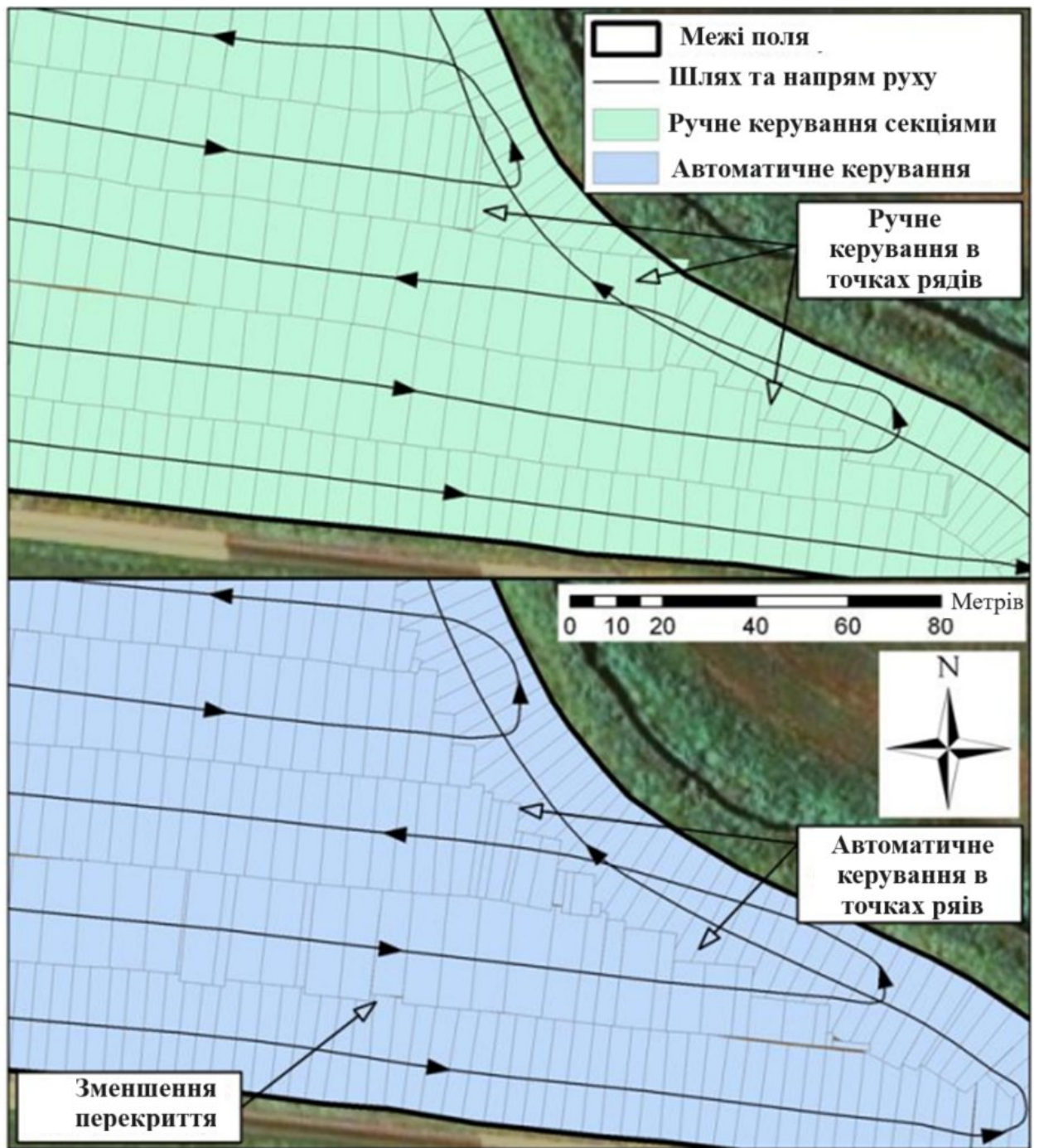


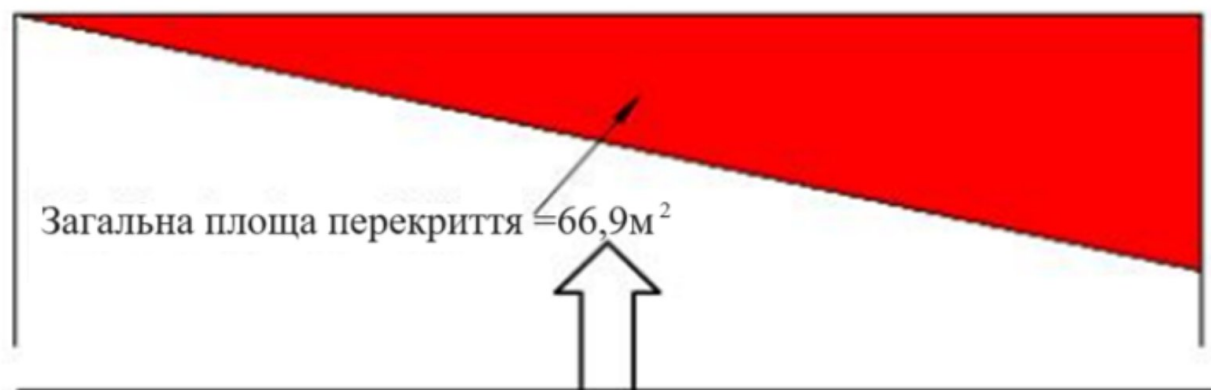
Рис. 1 - Багатокутники обробленої площі, створені бортовим комп'ютером для (верхній) ручного та автоматичного (нижній) керування секціями штанги (стрілками позначено напрямок руху обприскувача), накладені на аерофотознімок



Сценарій 3: Штанга 24,76м з 7-ма керованими секціями



Сценарій 2: Штанга 24,76м з 5-ма керованими секціями



Сценарій 1: Штанга 24,76м з 1 керованою секцією

Рис. 2 - Три приклада роботи обприскувача при заїзді на попередньо обприскані ряди (червоний колі). Порівняння площі перекриття, досягнутих з контролем усієї штанги ( $66,9\text{ м}^2$ ), з п'ятьма контрольними секціями ( $14,7\text{ м}^2$ , зменшення на 78%) та сімома контрольними секціями ( $13,7$ ).  $\text{м}^2$ , зменшення на 79,5%).

Якщо штанга обприскувача функціонувала б лише як одна контрольна секція (сценарій 1), то утворювалося б перекриття площі розміром 66,9 м<sup>2</sup>, коли штанга заходила на вже оброблені граничні ряди. У випадку використання п'яти контрольних секцій, що відображали конфігурацію штанги та перший рік обприскування (сценарій 2), перекриття зменшилося б на 78% порівняно з першим сценарієм, якщо б секції штанги вимикалися точно в момент повного покриття ділянки з мінімальною зоною накладання. Застосування семи контрольних секцій, як це практикувалося під час обприскування другого сезону (сценарій 3), дозволило б додатково скоротити перекриття на 79,5% у порівнянні з першим сценарієм. Аналіз даних на рисунку 2 показав, що включення двох додаткових контрольних секцій дозволило б ще на 1,5% зменшити площу накладень. Таким чином, додаткові секції, що вводилися між сезонами обприскування, могли суттєво знизити ефект подвійного нанесення, як було зазначено раніше.

Рівні повторного внесення для досліджуваних полів представлені в таблиці 1. Під час першого сезону, коли керування секціями штанги здійснювалося вручну, надмірне перекриття становило в середньому 12,4% для всіх полів. Встановлення двох додаткових контрольних секцій у поєднанні з автоматичним контролем секцій протягом другого сезону призвело до зниження площі подвійного покриття приблизно на 6,2% у середньому. Для оцінки статистичної значущості зменшення надмірного внесення застосовувався двобічний тест LSD. Відмінності між сценаріями (п'ять секцій вручну проти семи секцій з автоматичним контролем) при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  вважалися статистично суттєвими.

Результати аналізу підтвердили, що зменшення надмірного застосування між 2024 та 2025 роками було дійсно значущим. Найбільша частина середнього зниження перекриття на 6,2% ймовірно зумовлена впровадженням автоматичного керування секціями, проте, як було обговорено і продемонстровано на рисунку 2, внесок додавання двох

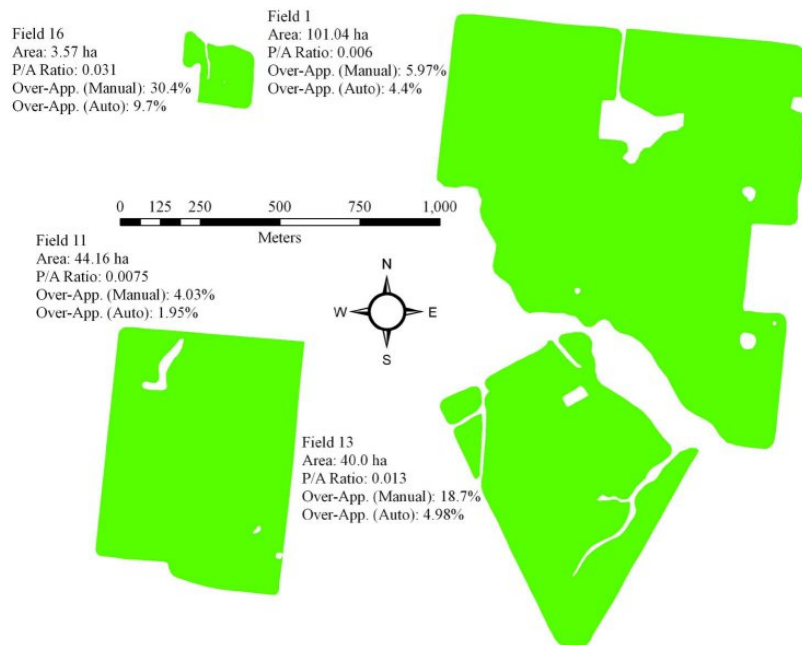
додаткових контрольних секцій у загальне скорочення площі накладень не можна повністю проігнорувати.

Таблиця 1 - Підсумкові площі поля та відсоток повторного внесення для всіх досліджуваних полів із п'ятисекційною ручною та семисекційною автоматичною системами керування штангою

Поле	Площа поля, га	Надмірне внесення, %		Зменшення повторного внесення за допомогою автоматичного керування штангою, %
		П'ятисекційна штанга керована вручну	Семисекційна автоматично керована штанга	
1	101,0	6,02	4,41	1,61
2	10,5	14,17	7,75	6,42
3	28,8	8,85	2,55	6,30
4	21,0	21,38	6,42	14,96
5	4,1	13,80	4,91	8,89
6	13,4	14,96	5,96	9,0
7	6,8	10,43	7,31	3,12
8	3,1	12,17	7,94	4,23
9	65,0	7,39	6,07	1,32
10	18,8	12,1	8,08	4,02
11	44,2	4,03	1,95	2,08
12	14,7	6,5	2,81	3,69
13	40,0	18,73	4,99	13,74
14	16,5	13,55	6,03	7,52
15	33,0	9,23	8,67	0,56
16	3,6	30,39	9,72	20,68
17	40,6	11,93	6,4	5,53
18	66,1	6,96	5,48	1,48
19	33,5	5,71	4,43	1,28
20	5,3	20,87	8,28	12,59
21	8,6	12,81	8,97	3,84

На рис. 3 підсумовані межі полів 1, 11, 13 та 16 із зазначенням їхньої площі в гектарах, показників співвідношення П/П ( $m^{-1}$ ) і величини надмірного внесення для ручного та автоматизованого керування секціями штанги. Поле 16 займало 3,57 га та демонструвало найвищий коефіцієнт П/П, який становив  $0,031 m^{-1}$ . Серед усіх 21 досліджуваного об'єкта саме це

поле зафіксувало максимальне надмірне внесення при використанні як ручного, так і автоматичного способу керування секціями. Крім того, додавання автоматичної системи значно зменшило повторне внесення на



20,68%, що було найбільшим показником серед усіх полів.

Рис. 3 – Межі полів 1, 11, 13 і 16 із площею поля (га), коефіцієнтом периметр/площа ( $m^{-1}$ ) і надлишковим внесенням (%), отриманим в результаті ручного та автоматичного керування секціями штанги

Поле 1 виявилось найбільшим за площею (101 га) і водночас мало найменше значення співвідношення П/П ( $0,006 m^{-1}$ ), що, ймовірно, зменшило надмірне внесення добрив (5,97% при ручному керуванні проти 4,4% при автоматичному). Зв'язок між надмірним внесенням і коефіцієнтом П/П представлено на рис. 4. Для обох методів — ручного (п'ять секцій) і автоматичного (сім секцій) управління штангою — спостерігається позитивна залежність між співвідношенням П/П та надмірним внесенням.

При цьому зі зростанням значення П/П надмірне внесення збільшувалося швидше при ручному керуванні секціями, ніж при автоматичній системі. Це вказує на те, що автоматична технологія здатна ефективніше зменшувати накладки добрив, особливо коли на полі виникає

більше перешкод. Варто також зауважити, що при нижчих показниках П/П значення надмірного внесення для ручного та автоматичного способів управління були значно ближчі один до одного.

Ймовірно, саме завдяки цьому поле 11 продемонструвало найнижчий рівень надмірного внесення як при ручному, так і при автоматичному регулюванні секцій штанги. У той же час поле 13 характеризувалося високим П/П через численні водні об'єкти та включення всередині площі (рис. 3). Для цього поля застосування автоматичного керування секцією штанги забезпечило значне зменшення повторного внесення — до 13,7%.

Зв'язок надмірного внесення з коефіцієнтом П/П повторно відображено на рис. 4. Дані для ручного управління (п'ять секцій) та автоматичного контролю (сім секцій) демонструють чітку позитивну кореляцію між П/П та надмірним внесенням. При цьому зі збільшенням П/П надлишкове внесення при ручному способі зростало швидше, ніж при автоматичному, що підтверджує здатність автоматичної системи зменшувати накладки в умовах підвищеної кількості перешкод на полі. Також слід відзначити, що при невеликих значеннях П/П розбіжність між показниками ручного та автоматичного керування була мінімальною.

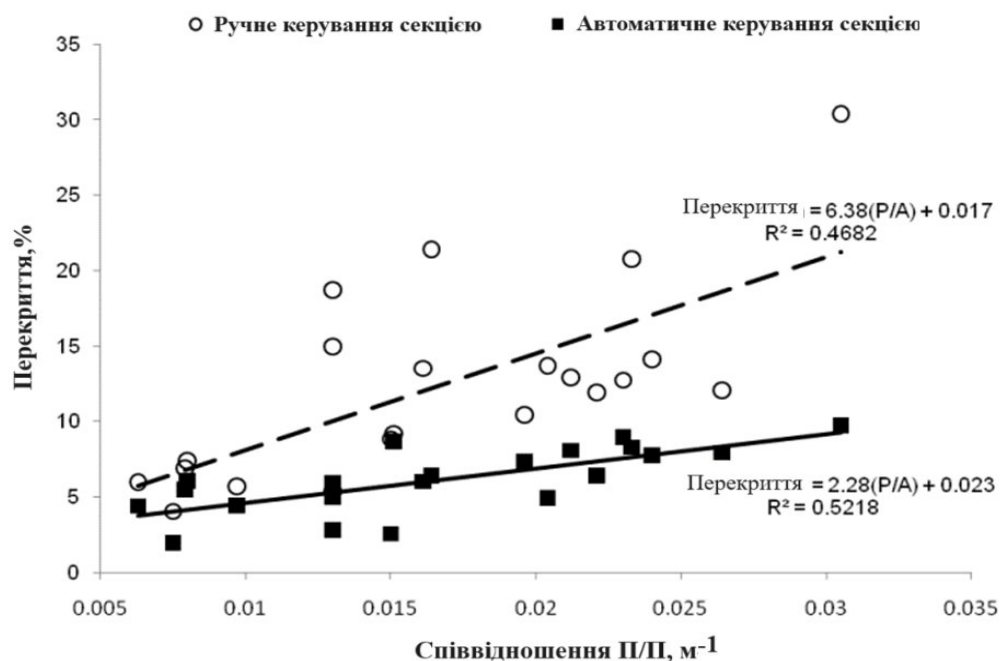


Рис. 4 - Надмірне застосування для ручного та автоматичного керування секціями штанги порівняно з співвідношенням П/П для досліджуваних полів

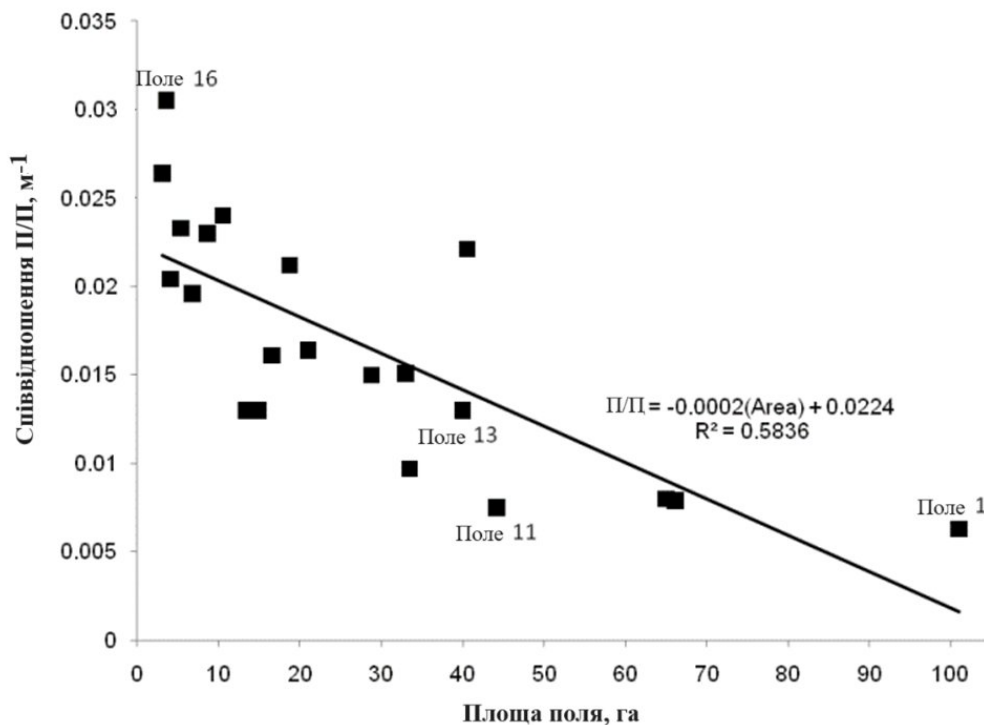


Рисунок 5 – Співвідношення периметр/площа від площі поля для досліджуваних полів

Внаслідок цього оператор, який майстерно керує обприскувачем у ручному режимі, здатен утримувати низький рівень надмірного внесення, подібно до автоматизованих систем управління, особливо на полях із більш регулярними формами, позбавленими водних потоків та інших природних чи штучних перешкод.

На рисунку 5 показано взаємозв'язок між співвідношенням П/П та площею 21 поля, що було включено до даного дослідження. Як і передбачалося, спостерігалася зворотна залежність: складніші форми полів характеризувалися вищим співвідношенням П/П, тоді як розширення площі полів супроводжувалося його зниженням. Цю закономірність наочно демонструє регресійний аналіз представлених даних, показаний на рисунку 5. Дані для чотирьох полів, представлених на рисунку 3, також позначені на рисунку 5, щоб ілюструвати тенденцію: менші ділянки, такі як поле 16,

зазвичай мали більш високі значення П/П, тоді як великі поля, наприклад поле 1, демонстрували нижчі співвідношення. Крім того, цікаво відзначити, що поля з подібною площею, як поля 11 і 13, можуть мати суттєво різні значення П/П через наявність внутрішніх включень, що добре видно на рисунках 3 і 5. Хоча це виходить за межі даного вступного дослідження, подальші аналізи, спрямовані на вивчення впливу форми полів на надмірне внесення за допомогою ручних та автоматичних систем керування секціями штанги, можуть показати, що поєднання різних факторів, таких як співвідношення П/П разом із площею ділянки, забезпечує точніші прогнози, ніж оцінка будь-якого показника окремо.

Раніше проведений аналіз гіпотетичних сільськогосподарських полів [16] демонстрував, що використання технологій точного внесення може призвести до значної економії. Однак той експеримент охоплював лише три поля, всі з яких мали дуже неправильну форму, і обприскувач у ньому працював із 30 контрольними секціями. На відміну від цього, у поточному дослідженні було охоплено 21 поле загальною площею 578 га, що дозволяє вважати скорочення повторного внесення пестицидів більш репрезентативним для типових виробників, адже досліджувані поля відрізнялися широким спектром форм та розмірів, що відображає реальні умови господарювання.

## ВИСНОВКИ

Дане дослідження демонструє ефективність автоматизованого управління окремими секціями штанги з високою роздільною здатністю для мінімізації повторного внесення пестицидів під час польових обприскувань. Аналіз шейп-файлів покриття проводився на 21 полі різної конфігурації та розміру, сумарна площа яких становила 578 гектарів. Результати проведеного статистичного аналізу свідчать, що середній показник надмірного внесення істотно знизився з 12,4% до 6,2% завдяки впровадженню автоматичного управління секціями штанги на обприскувачі (попередньо керованому вручну до п'яти секцій) та додаванню ще двох контрольних секцій, що в сумі дало сім керованих блоків.

Дослідження також виявило позитивну залежність надмірного внесення при застосуванні ручного та автоматизованого управління секціями, оскільки співвідношення П/П збільшувалося для вивчених полів. Надлишкове внесення зростало швидше при ручному контролі секцій, що свідчить про те, що в умовах ускладнених меж поля, наприклад з водними каналами або іншими перешкодами, автоматичне керування секціями штанги забезпечує більш точне регулювання. Ці результати підтверджують, що впровадження автоматичного управління секціями штанги здатне забезпечити значну економію ресурсів для агровиробників.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: [https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide\\_to\\_NASS\\_Surveys/Chemical\\_Use/](https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/) (accessed on 13 November 2022).
2. Virk, S.; Meena, R. Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers. University of Georgia Cooperative Extension, Athens, GA. Circular 1277; 2022; pp. 1–8. Available online: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277> (accessed on 14 February 2023).
3. Carroll, J. The Effects of Sprayer Speed and Droplet Size on Herbicide Burndown Efficacy. Master's Thesis, University of Arkansas, Fayetteville, AK, USA, 2017. Available online: <https://scholarworks.uark.edu/etd/2435> (accessed on 11 November 2022).
4. ASABE S572.3; Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
5. ASABE S592.1; Best Management Practices for Boom Spraying. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
6. Virk, S.; Prostko, E.; Kemerait, R.; Abney, M.; Rains, G.; Powell, C.; Carlson, D.; Jacobs, J.; Tyson, W. On-Farm Evaluation of Nozzle Types for Peanut Pest Management Using Commercial Sprayers. *Peanut Sci.* 2021, 48, 87–96.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkiewicz, A.; Pecyna, A.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.

8. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.
9. Amankulova K., Farmonov N., Mucsi L. Time-series analysis of Sentinel-2 satellite images for sunflower yield estimation, *Smart Agricultural Technology*, Vol. 3, 2023 DOI:10.1016/j.atech.2022.100098.
10. Grella, M.; Gioelli, F.; Marucco, P.; Zwertvaegher, I.; Mozzanini, E.; Mylonas, N.; Nuyttens, D.; Balsari, P. Field Assessment of a Pulse Width Modulation (PWM) Spray System Applying Different Spray Volumes: Duty Cycle and Forward Speed Effects on Vines Spray Coverage. *Precis. Agric.* 2022, 23, 219–252.
11. Kang, J.; Liu, G.; Guo, G. Image Preprocessing and Droplet Parameter Measurement Of-Sensitive Paper Based on ImagePy. *Sci. Technol. Eng.* 2021, 21, 10.
12. Процеси, машини таобладнання АПВ [Текст] : навч. посіб. / М. О. Свірень, В. П. Смірнов, І. М. Осипов та ін. - Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2018. - 296 с.
13. Ru Y, Liu Y Y, Qu R J, Patel M K. Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6): 1–6.
14. Appah, S., Jia, W., Ou, M., Wang, P., Gong, C. (2019b). Investigation of optimum applied voltage, liquid flow pressure, and spraying height for pesticide application by induction charging. *Appl. Eng. Agric.* 355, 795–804. doi: 10.13031/aea.13358.
15. Appah, S., Wang, P., Ou, M. X., Gong, C., Jia, W. D. (2019a). Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 122, 1–9. doi: 10.25165/j.ijabe.20191202.4673.
16. Ru, Y., Liu, Y. Y., Qu, R. J., Patel, M. K. (2020). Experimental

study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 136, 1–6. doi: 10.25165/j.ijabe.20201306.5511

17. Wang, S., Li, X., Zeng, A., Song, J., Xu, T., Lv, X., et al. (2022). Effects of adjuvants on spraying characteristics and control efficacy in unmanned aerial application. *Agriculture* 12, 138. doi: 10.3390/agriculture12020138

18. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.

19. Jupp L. (2018). *Precision Farming From Above*. Writing Matters Publishing, 113 p.

20. Toraman, M.C. Effects of Leaf Surface Energy on Pesticidal Performance. *Tarim Bilim. Derg.* 2019, 25, 174–180.

21. Colaço, A., Bramley, R., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *F. Crop. Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.

22. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.

23. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.

24. Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2019. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agric.* 163, 104863. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863>.

25. Mendes, W.R., Araújo, F.M.U., Dutta, R., Heeren, D.M., 2019. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Syst. Appl.* 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

# Додатки