

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра агроінжинірингу**

**До захисту**  
**Допускається**  
**Завідувач кафедри**

**Шуляк М.Л.**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: « Дослідження факторів, що впливають на показники якості внесення засобів захисту рослин в системах точного землеробства»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Бугайов В.Г.

(Прізвище, ініціали)

Група:

\_\_\_\_\_

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Шуляк М.Л.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 1 таблицю, 9 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Ключові слова: ОБПРИСКУВАННЯ, ПОВТОРНЕ ВНЕСЕННЯ, НОРМА ВНЕСЕННЯ, ПЕСТИЦИДИ, ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІННИХ НОРМ.

Загальна **мета** цього дослідження полягала в тому, щоб продемонструвати ступінь варіації норми внесення пестицидів, яка може виникнути під час польового внесення за допомогою самохідного обприскувача з регулятором норми з компенсацією потоку. Конкретними цілями були: створити карти норми внесення пестицидів на основі тиску в соплах, стану секції керування штангою та GPS-координат шляху обприскувача за допомогою ГІС, а також кількісно визначити та охарактеризувати дані про норму внесення, щоб надати інформацію щодо того, як зміни швидкості обприскувача, активації секції керування штангою та поворотні рухи можуть вплинути на рівномірність нанесення.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Стан питання і задачі досліджень.....	7
1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин .....	7
1.2 Фактори, що впливають на якість обприскування .....	11
1.3 Використання технологій точного землеробства для операцій обприскування.....	21
2 Методика досліджень.....	25
2.1 Налаштування форсунок та збір даних.....	25
2.2 Аналіз даних.....	27
3 Результати досліджень та їх аналіз .....	30
3.1 Розподіл норми внесення та картографування.....	30
3.2 Вплив прискорення обприскувача.....	32
3.3 Наслідки приведення в дію секції штанги.....	34
3.4 Вплив поворотів.....	37
Висновки.....	41
Список використаних джерел.....	42

## ВСТУП

Ринок сучасної сільськогосподарської техніки різноманітний своїми пропозиціями, готовими докорінно змінити технології вирощування сільськогосподарських культур. Є хороша можливість підвищити продуктивність за рахунок сучасних обприскувачів, які здатні обслуговувати значні площі, витрачаючи при цьому меншу кількість часу за рахунок більш широкого захоплення штанги, активної підвіски, автоматизованого управління, чіткого витрати робочої рідини. Значно знижені ризики неякісної обробки за допомогою сучасних технологічних розпилювачів, спеціально сконструйованих для цільових обробок різних культур.

Багато хто з виробників і до тепер не замислюються про ефективність нанесення препаратів на оброблювані об'єкти, не приділяють належної уваги контролю якості обприскування. Обробки посівів різних культур різними препаратами виробляються одними і тими ж форсунками, з одними і тими ж параметрами, і часто при несприятливих зовнішніх умовах. Багато використовується старих обприскувачів з обмеженими регулюваннями, а надмірна простота конструкції вузлів частіше завдає шкоди, ніж допомагає в якісній обробці (нерегульована по висоті штанга без стабілізації вертикальних і горизонтальних коливань, примітивна і нестабільна подача робочого розчину, скачки тиску в робочій системі при зміні швидкості руху, відсутність або несправність приладів контролю тиску, нерівномірний розподіл розчину по секціях штанги, контроль всіх процесів та інше). Приємно відзначити, що така ситуація в останні роки різко змінилася в позитивну сторону.

# 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин

Обприскувачі є основними сільськогосподарськими інструментами, які використовуються для внесення пестицидів, гербіцидів, фунгіцидів і добрив під посіви. Їх ефективність і результативність мають вирішальне значення для забезпечення оптимального захисту рослин і доставки поживних речовин. Виконання спеціальних агротехнічних вимог є життєво важливим для належного функціонування обприскувачів і досягнення бажаних агрономічних результатів при мінімізації екологічних ризиків. Ці вимоги охоплюють конструктивні параметри, точність застосування, екологічну безпеку та простоту експлуатації, серед іншого.

Однією з основних агротехнічних вимог до обприскувачів є точність подачі хімікатів. Розпилювачі повинні забезпечити рівномірне внесення необхідної кількості пестицидів або добрив по всій цільовій площі. Це передбачає точний контроль розміру крапель, тиску та швидкості потоку. Вибір насадок є особливо важливим, оскільки різні культури, погодні умови та цілі внесення вимагають певних розмірів крапель. Наприклад, дрібні краплі підходять для інсектицидів, спрямованих на менших шкідників, але вони більш схильні до знесення, тоді як більші краплі краще підходять для гербіцидів, щоб зменшити знесення та забезпечити контакт із бур'янами.

Точне обприскування допомагає контролювати шкідників, хвороби та бур'яни, мінімізуючи хімічні відходи та вплив на навколишнє середовище. Досягнення точності обприскування передбачає дотримання ряду агротехнічних вимог, які охоплюють вибір обладнання, робочі параметри, екологічні міркування та терміни внесення. Ці вимоги необхідні для забезпечення максимальної ефективності, економічності та екологічної безпеки.

Вибір обладнання для розпилення є основою точності. Різні типи обприскувачів, такі як штангові обприскувачі, розпилювачі та повітряні

обприскувачі, необхідно вибирати відповідно до конкретної культури, розміру поля та типу обробки. Форсунки відіграють важливу роль у визначенні розміру крапель і структури розпилення, безпосередньо впливаючи на рівномірність нанесення. Важливо вибрати форсунки, які відповідають хімічному складу та бажаній нормі внесення. Правильне калібрування розпилювача також необхідне, щоб гарантувати, що правильна кількість хімікату розподіляється на певну площу, запобігаючи надмірному або недостатньому застосуванню.

На додаток до вибору обладнання необхідно ретельно контролювати робочі параметри, щоб досягти оптимальної точності розпилення. Тиск розпилення, швидкість потоку та швидкість руху розпилювача мають бути синхронізовані, щоб подавати постійну дозу. Вищий тиск може утворювати більш дрібні краплі, покращуючи покриття, але також збільшуючи ризик дрейфу. І навпаки, нижчий тиск може призвести до більших крапель, які зменшують дрейф, але можуть поставити під загрозу покриття. Швидкість руху також впливає на точність нанесення; надмірна швидкість може призвести до нерівномірного розподілу, тоді як надто повільний рух може призвести до втрати хімікатів і затримок у польових операціях.

Умови навколишнього середовища є ще одним важливим фактором, що впливає на ефективність розпилення. Швидкість вітру, температура та вологість впливають на поведінку крапель спрею після випуску. Сильні вітри можуть спричинити дрейф, що призведе до втрати хімічних речовин і потенційної шкоди нецільовим територіям, включаючи сусідні культури або чутливі екосистеми. Високі температури та низька вологість збільшують швидкість випаровування крапель, зменшуючи кількість хімікату, що досягає цілі. Щоб уникнути цих проблем, обприскування слід проводити при низькій швидкості вітру та в більш прохолодну та вологу частину дня, наприклад рано вранці або пізно вдень.

Час нанесення спрею також має вирішальне значення для забезпечення ефективності лікування. Культури та бур'яни проходять певні стадії росту, і орієнтація на ці фази підвищує ймовірність успіху. Наприклад, гербіциди

більш ефективні, коли бур'яни молоді та активно ростуть, тоді як фунгіциди необхідно застосовувати профілактично до появи хвороб. Запізніле або несвоєчасне застосування може зробити лікування неефективним і вимагати додаткового обприскування, збільшуючи витрати та екологічні ризики.

Сучасні технологічні досягнення, такі як системи навігації GPS і автоматичні регулятори норми, відіграють все більш важливу роль у підвищенні точності обприскування. Інструменти точного землеробства дозволяють фермерам створювати карти полів, які враховують варіації ґрунту, здоров'я врожаю та зараження шкідниками. Технологія змінної норми (VRT) дозволяє обприскувачам регулювати норму внесення хімікатів у режимі реального часу, гарантуючи, що кожна частина поля отримує оптимальну дозу. Це зменшує загальне хімічне навантаження, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище та максимізуючи врожайність.

Таким чином, агротехнічні вимоги до точності обприскування багатоаспектні та взаємозумовлені. Вибір відповідного обладнання, контроль робочих параметрів, увага до умов навколишнього середовища та точний час – все це є важливими для досягнення ефективного та результативного розпилення. Запровадження нових технологій ще більше підвищує точність, допомагаючи фермерам задовольнити зростаючий попит на стійкі та продуктивні методи сільського господарства. Дотримання цих принципів гарантує, що обприскування залишається незамінним інструментом у сучасному сільському господарстві, врівноважуючи продуктивність із збереженням навколишнього середовища.

Норма внесення обприскувачем також повинна відповідати агрономічним потребам. Сучасні обприскувачі оснащені системами регулювання тиску та регуляторами потоку для регулювання кількості хімікату, що вноситься на одиницю площі. Ця здатність до адаптації гарантує, що культури отримують відповідну дозу, уникаючи недостатнього дозування, яке може призвести до неефективного контролю шкідників або бур'янів, або надмірного дозування, що може призвести до пошкодження врожаю, хімічних

вtrat і забруднення навколишнього середовища. Точне калібрування перед кожною операцією має важливе значення для підтримки стабільних норм внесення.

Ще одна важлива агротехнічна вимога — ефективність обприскувача в різноманітних польових умовах. Обладнання має надійно працювати на різних рельєфах, висотах культур і густотах рослин. Для навішування на трактор і самохідних обприскувачів потрібен достатній просвіт, щоб уникнути пошкодження посівів. Крім того, конструкція конструкції повинна забезпечувати легку маневреність у вузьких рядах або нерівних полях. Штангові обприскувачі повинні мати міцні штанги та механізми регулювання висоти, щоб підтримувати постійний кут розпилення та висоту над пологом культури, забезпечуючи рівномірне покриття.

Екологічна безпека також є ключовим агротехнічним фактором. Сучасні обприскувачі розроблені з технологією зменшення дрейфу, щоб звести до мінімуму ненавмисне розповсюдження хімічних речовин у нецільових областях, що може завдати шкоди корисним організмам, забруднити джерела води або створити ризик для здоров'я людини. Насадки проти знесення, щитки та автоматичні регулятори висоти штанги допомагають зменшити знесення. Крім того, обприскувачі, оснащені технологіями точного землеробства на базі GPS, можуть точніше вносити хімікати, дотримуючись приписів для конкретного місця, щоб оптимізувати використання вхідних матеріалів і обмежити вплив на навколишнє середовище.

Додатковими агротехнічними вимогами до обприскувачів є зручність експлуатації та обслуговування. Фермери повинні мати можливість легко регулювати, чистити та обслуговувати обладнання для забезпечення довгострокової надійності. Такі функції, як швидкоз'єднувальні форсунки, електронні системи керування та автоматичне калібрування, спрощують роботу, скорочуючи час простою та забезпечуючи постійну продуктивність. Вбудовані датчики та системи моніторингу забезпечують дані в режимі

реального часу щодо тиску, швидкості та швидкості потоку, що дозволяє операторам оперативного вносити коригування під час польових операцій.

Крім того, обприскувачі повинні відповідати стандартам безпеки та нормативним нормам, щоб забезпечити благополуччя оператора та екологічність. Захисні елементи, такі як закриті кабіни для самохідних агрегатів, системи скидання тиску та хімічно стійкі матеріали, сприяють безпечному поводженню з небезпечними речовинами. Відповідність національним і міжнародним нормам щодо застосування пестицидів гарантує, що обприскувачі працюють у рамках закону для захисту здоров'я населення та екосистем.

Підсумовуючи, агротехнічні вимоги до обприскувачів є основоположними для досягнення ефективних, результативних та екологічно стійких сільськогосподарських практик. Ці вимоги охоплюють точність застосування, адаптивність до різних польових умов, екологічну безпеку, зручність дизайну та дотримання стандартів безпеки. Відповідаючи цим критеріям, обприскувачі можуть допомогти фермерам оптимізувати захист рослин і продуктивність, мінімізуючи використання хімікатів і екологічні ризики. Удосконалення технологій, таких як GPS-навіювання та автоматизовані системи, продовжують покращувати функціональність і точність обприскувачів, підтримуючи мінливі потреби сучасного сільського господарства.

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

Якість обприскування в сільському господарстві, промисловості чи боротьбі зі шкідниками відіграє вирішальну роль у визначенні ефективності, результативності та безпеки операції. На якість розпилення впливає кілька факторів, зокрема властивості рідини для розпилення, використовуване обладнання, умови навколишнього середовища та методи роботи оператора. Розуміння цих факторів забезпечує точне застосування, мінімізує відходи та зменшує екологічні ризики.

Хімічний склад, в'язкість і концентрація рідини для розпилення мають важливе значення для впливу на якість розпилення. Рідини з високою в'язкістю мають тенденцію протистояти розпиленню, що призводить до збільшення розміру крапель, що може зменшити покриття. Поверхнево-активні речовини та ад'юванти часто додають для зменшення поверхневого натягу, покращуючи розподіл розпилення на цільових поверхнях. Крім того, неправильне змішування хімікатів може призвести до засмічення форсунок або нерівномірного розпилення, що вплине на однорідність.

У сільському господарстві, охороні здоров'я чи промисловості розуміння того, як ці властивості рідини впливають на якість обприскування, має важливе значення для оптимізації продуктивності та мінімізації відходів.

В'язкість, або внутрішній опір рідини течії, безпосередньо впливає на утворення крапель. Рідини з високою в'язкістю мають тенденцію до утворення більших крапель, оскільки вони не розпадаються на більш дрібні частинки. Це призводить до більш нерівномірного розподілу, що може знизити ефективність покриття. Навпаки, рідини з низькою в'язкістю легше дробляться на дрібні краплі, утворюючи більш дрібну структуру бризок. Однак надзвичайно низька в'язкість може призвести до знесення, коли дрібні краплі розносяться повітряними потоками, знижуючи точність нанесення спрею. Таким чином, досягнення правильної в'язкості має важливе значення для балансу між покриттям і контролем дрейфу.

Ще одна важлива властивість — поверхневий натяг, який описує когезійну силу на поверхні рідини. Рідини з високим поверхневим натягом утворюють краплі, які мають тенденцію зберігати сферичну форму, що обмежує їх здатність поширюватися на поверхні. У результаті спрей може спричинити нерівномірне покриття з окремими краплями, а не суцільною плівкою. З іншого боку, рідини з низьким поверхневим натягом частіше розтікаються під час удару, забезпечуючи краще покриття. Під час сільськогосподарського обприскування поверхнево-активні речовини часто додають для зменшення поверхневого натягу, покращуючи змочуваність

поверхонь рослин і забезпечуючи ефективне потрапляння пестицидів або гербіцидів на цільові ділянки.

Щільність також впливає на якість розпилення, впливаючи на імпульс і проникнення крапель. Щільніші рідини створюють важчі краплі, які менш сприйнятливі до опору повітря та з більшою ймовірністю проникають через щільні навіси або товсті шари матеріалу. Однак дуже щільні краплі можуть падати занадто швидко, що призведе до нерівномірного розподілу або перенасичення в певних областях. Навпаки, менш щільні рідини утворюють легші краплі, які, швидше за все, залишаться в повітрі довше, але можуть не досягти наміченої мети через дрейф вітру.

Летючість, або схильність рідини до випаровування, особливо важлива в тих випадках, коли рідина повинна залишатися на поверхні протягом достатнього часу, щоб бути ефективною. Дуже леткі рідини швидко випаровуються, що може знизити ефективність спреїв, таких як дезінфікуючі засоби чи пестициди. Випаровування під час розпилення також може змінити розмір крапель, що призведе до неповного покриття та дрейфу. Щоб пом'якшити ці проблеми, іноді використовуються добавки для уповільнення випаровування та підвищення ефективності розпилення, особливо в теплих або сухих умовах.

Взаємодія між цими властивостями ще більше ускладнює динаміку розпилення. Наприклад, рідина з високою в'язкістю та високим поверхневим натягом може створювати погано розпилені бризки з великими нерівними краплями. І навпаки, регулювання однієї властивості, наприклад додавання поверхнево-активної речовини для зменшення поверхневого натягу, може ненавмисно вплинути на інші аспекти, такі як в'язкість або швидкість випаровування, що вимагає ретельного формування складу рідини для розпилення.

Підсумовуючи, такі властивості рідини, як в'язкість, поверхневий натяг, щільність і летючість, відіграють вирішальну роль у визначенні якості спрею. Кожна властивість впливає на такі ключові аспекти, як розмір крапель,

розподіл і покриття, які є важливими для досягнення бажаного результату в різних застосуваннях. Розуміння цих впливів дозволяє оптимізувати техніку розпилення, забезпечуючи точне нанесення, мінімізуючи відходи та максимізуючи ефективність.

Технологія обприскування відіграє вирішальну роль у сільськогосподарській практиці, промислових процесах і екологічному менеджменті. Одним із найважливіших факторів, що впливають на якість розпилення, є розмір краплі. Розмір краплі означає діаметр окремих частинок рідини, розсіяних соплом під час розпилення. Це безпосередньо впливає на різні параметри, такі як покриття, ефективність осадження, потенціал дрейфу, швидкість випаровування та проникнення в ціль. Розуміння того, як розмір краплі впливає на ці фактори, має важливе значення для оптимізації методів розпилення для отримання бажаних результатів, мінімізуючи відходи, екологічні ризики та експлуатаційні витрати.

Ключовим фактором якості розпилення є покриття. Менші краплі збільшують кількість крапель на одиницю площі, що призводить до кращого покриття поверхні. Ця характеристика особливо корисна при сільськогосподарському обприскуванні, де рівномірне внесення пестицидів або добрив забезпечує послідовний захист і ріст посівів. Краплі меншого розміру збільшують ймовірність потрапляння на приховані ділянки на поверхні рослин, наприклад на нижню частину листя, яка може бути більш схильною до зараження шкідниками. Однак краплі меншого розміру мають недоліки, зокрема підвищений ризик дрейфу, випаровування та поганого проникнення.

Знос спрею – поширена проблема, пов'язана з дрібними краплями. У міру зменшення розміру краплі посилюється вплив вітру на траєкторію краплі, що підвищує ймовірність відхилення спрею від наміченої мети. Дрейф може спричинити нецільове забруднення навколишніх посівів, водойм чи житлових районів, створюючи ризик для навколишнього середовища та здоров'я. З цієї причини нормативні документи часто вимагають використання більших

крапель у чутливих місцях. Конструкція форсунки та робочий тиск є ключовими факторами контролю розміру краплі для зменшення дрейфу без шкоди для ефективності розпилення.

Крім дрейфу, розмір краплі також впливає на швидкість випаровування. Краплі меншого розміру мають більше співвідношення площі поверхні до об'єму, що прискорює випаровування, особливо за жарких або вітряних умов. Швидке випаровування може призвести до поганого осадження, оскільки краплі можуть випаровуватися, не досягнувши цільової поверхні, що робить нанесення неефективним. Щоб протистояти цьому, оператори сільського господарства можуть використовувати засоби проти випаровування або коригувати умови розпилення, наприклад, час внесення в прохолодніші години дня.

З іншого боку, великі краплі забезпечують переваги з точки зору проникнення та зниженого потенціалу дрейфу. У промисловому та сільськогосподарському обприскуванні здатність крапель проникати через щільні крони або поверхню ґрунту є критичною. Більші краплі мають більший імпульс, що дозволяє їм проштовхуватися крізь перешкоди, як-от густе листя, щоб досягти нижніх цілей. Це особливо важливо для боротьби зі шкідниками, коли шкідники можуть мешкати в глибших шарах рослин або ґрунту. Однак великі краплі можуть призвести до нерівномірного покриття, оскільки на одиницю площі розподіляється менше крапель, що збільшує ризик появи необроблених плям.

Крім того, розмір крапель визначає ефективність утримання на різних поверхнях. Поверхні з восковою або неправильною текстурою можуть відштовхувати великі краплі, спричиняючи їх скочування або розбризкування. У таких випадках менші краплі можуть прилипати ефективніше. Однак дуже дрібні краплі можуть залишатися в повітрі, знижуючи ефективність осадження. Таким чином, досягнення оптимального розміру краплі має важливе значення для збалансування адгезії та уникнення надмірного дрейфу або втрати.

Підсумовуючи, розмір крапель суттєво впливає на якість розпилення, впливаючи на покриття, дрейф, випаровування, проникнення та утримання. Менші краплі забезпечують краще покриття, але схильні до дрейфу та випаровування, тоді як більші краплі покращують проникнення та зменшують дрейф, але можуть пожертвувати однорідністю. Оптимальний розмір краплі залежить від конкретного застосування, умов навколишнього середовища та цільових поверхонь. Ретельно регулюючи тип форсунки, тиск і форму розпилення, оператори можуть контролювати розмір крапель, щоб максимізувати ефективність розпилення та мінімізувати екологічні ризики. Досягнення цього балансу має важливе значення для ефективних і стійких методів розпилення в різних галузях.

Вода є ключовим компонентом для сільськогосподарських і промислових застосувань, таких як застосування пестицидів, обробка гербіцидами та покриття поверхні. Однак хімічні властивості води, зокрема її жорсткість, істотно впливають на якість і ефективність обприскування. Жорсткість води означає концентрацію у воді розчинених мінералів, насамперед іонів кальцію ( $\text{Ca}^{2+}$ ) і магнію ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Ця характеристика впливає не тільки на стабільність розчину для розпилення, але й на його здатність ефективно доставляти хімікати. Розуміння того, як жорсткість води впливає на операції розпилення, має важливе значення для оптимізації продуктивності та забезпечення стабільних результатів.

Якщо для змішування розчинів для обприскування використовується жорстка вода, можуть виникнути хімічні реакції між мінералами та активними інгредієнтами гербіцидів, пестицидів або добрив. Багато агрохімікатів містять компоненти, схильні до утворення нерозчинних сполук з іонами кальцію або магнію, що призводить до зниження розчинності та випадання осаду. У результаті цільова концентрація хімікату зменшується, що знижує його ефективність. Це явище є особливо проблематичним для гербіцидів на основі гліфосату, де іони кальцію перешкоджають поглинанню, утворюючи солі кальцію-гліфосату, які перешкоджають поглинанню хімікату рослинами.

Окрім хімічної взаємодії, жорсткість води може впливати на фізичні властивості розчинів для обприскування. Жорстка вода може збільшити поверхневий натяг розчину, що призведе до збільшення розміру крапель під час розпилення. Великі краплі, як правило, відскакують від поверхонь рослин, а не прилипають, зменшуючи охоплення та проникнення хімікату. Ця неефективність часто призводить до поганого контролю шкідників або бур'янів, що вимагає вищих доз або повторних застосувань, що може збільшити експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище.

Обладнання для обприскувачів також чутливе до проблем, спричинених жорсткою водою. Наявність розчинених мінералів може призвести до засмічення форсунок і накопичення накипу на внутрішніх компонентах. Засмічені форсунки порушують схему розпилення, що призводить до нерівномірного нанесення хімікатів. У сільськогосподарських умовах це може призвести до того, що деякі території отримають недостатні дози, тоді як інші можуть зазнати надмірного хімічного впливу, що підвищує ризик пошкодження врожаю. З часом відкладення накипу можуть призвести до корозії обладнання для розпилення, скорочуючи його термін служби та вимагаючи частого обслуговування або заміни.

Пом'якшення негативних наслідків жорсткості води передбачає кілька стратегій. Одним із поширених підходів є використання кондиціонерів для води або ад'ювантів, які нейтралізують вплив іонів кальцію та магнію. Наприклад, сульфат амонію часто додають до розчинів гербіцидів для зв'язування іонів кальцію, запобігаючи їх взаємодії з активними інгредієнтами. Крім того, деякі галузі промисловості використовують пом'якшену або деіонізовану воду для приготування сумішей для обприскування, гарантуючи відсутність іонів жорсткості. Регулярне технічне обслуговування розпилювального обладнання, включаючи процедури видалення накипу, також допомагає підтримувати ефективність і довговічність системи.

Підсумовуючи, твердість води відіграє вирішальну роль у визначенні якості та ефективності розпилення. Жорстка вода може знизити ефективність

хімічних речовин, зменшити покриття розбризування та спричинити несправності обладнання. Розуміння впливу жорсткості води та впровадження відповідних стратегій пом'якшення є важливими для покращення роботи розпилення. У сільському господарстві, боротьбі зі шкідниками чи промислового застосуванні контроль якості води забезпечує оптимальну хімічну ефективність, економічну ефективність і екологічну стійкість.

Вибір насадки значною мірою визначає розмір краплі, форму розпилення та покриття. Наприклад, плоскі віялові форсунки створюють вузьке розпилення, що ідеально підходить для точного нанесення, тоді як конусні форсунки забезпечують ширший розподіл. Зношені форсунки можуть спричинити нерівномірне утворення або стікання крапель, що знижує ефективність розпилення. Вибір відповідної форсунки на основі цільового застосування та забезпечення належного обслуговування мають вирішальне значення для досягнення бажаної якості розпилення.

Тиск, під яким випускається рідина для розпилення, впливає на розмір крапель і площу покриття. Вищий тиск призводить до менших крапель, покращуючи покриття, але збільшуючи ризик знесення. І навпаки, нижчий тиск призводить до більших крапель, які менш схильні до дрейфу, але можуть не ефективно покривати поверхні. Підтримка оптимального тиску та швидкості потоку забезпечує рівномірне нанесення без надмірного стікання або дрейфу в повітрі.

Фактори навколишнього середовища, такі як вітер, температура та вологість, мають значний вплив на якість розпилення. Вітер може викликати дрейф бризок, що призводить до нецільового осадження та забруднення навколишнього середовища. Високі температури та низька вологість збільшують швидкість випаровування крапель, зменшуючи їх розмір до того, як вони досягнуть цілі. Обприскування в спокійних умовах або рано вранці чи пізно вдень може допомогти пом'якшити ці ефекти.

Навички та досвід оператора мають вирішальне значення для забезпечення належного розпилення. Оператори повинні регулярно

калібрувати обприскувач, щоб переконатися, що обладнання подає правильну кількість рідини на одиницю площі. Неправильне калібрування може призвести до недостатнього або надмірного внесення, що призведе до неефективної обробки або пошкодження врожаю. Належне навчання поводженню з обладнанням, змішуванню хімічних речовин і протоколам безпеки є важливими для забезпечення високоякісного розпилення.

Швидкість, з якою розпилювач рухається по цільовій площі, впливає на розподіл спрею. Занадто швидкий рух може призвести до нерівномірного покриття, а надто повільний рух може призвести до надмірного нанесення на певних ділянках.

Так само висота штанги розпилювача впливає на схему розпилення. Підтримка оптимальної висоти штанги забезпечує належне перекриття між проходами розпилення, запобігаючи пропускам або надмірній концентрації. Висота штанги, визначена як вертикальна відстань між розпилювальним соплом і цільовою поверхнею, може безпосередньо впливати на покриття розпилення, розподіл крапель за розміром, потенціал дрейфу та однорідність. Розуміння оптимальної висоти штанги має важливе значення для забезпечення ефективного захисту врожаю та доставки поживних речовин при мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Коли висота штанги правильно відкалібрована, розпилювальні форсунки випускають краплі в оптимальному порядку, максимізуючи покриття цільової області. Менша висота штанги допомагає зменшити відстань, яку повинні подолати краплі, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів, таких як вітер і випаровування. Це підвищує ймовірність того, що запланована доза досягне цільової поверхні, наприклад, листя культур або ґрунту, і гарантує, що продукт діє за призначенням. І навпаки, якщо штанга піднята надто високо, краплі більш схильні до розсіювання, що призводить до нерівномірного покриття та нерівного нанесення.

Однією з найбільш серйозних проблем, пов'язаних із неправильною висотою штанги, є дрейф бризок — ненавмисне переміщення крапель від

цільової області. Високе положення штанги збільшує потенціал дрейфу, особливо за вітряних умов, оскільки краплі піддаються дії повітряних потоків протягом більш тривалого часу. Зокрема, дрібніші краплі більш сприйнятливі до потрапляння за межі мети, що може призвести до забруднення навколишнього середовища, пошкодження прилеглих культур або зниження ефективності боротьби зі шкідниками. Зменшення висоти штанги мінімізує знесення, утримуючи краплі ближче до передбачуваної зони застосування.

Рівномірність розподілу спрею є ще одним важливим параметром, на який впливає висота штанги. Форсунки сконструйовані таким чином, щоб їх схема розпилення перекривалася, щоб забезпечити рівномірне покриття всього поля. Якщо стріла встановлена занадто низько, зони перекриття можуть звузитися, що призведе до недостатнього внесення в деяких частинах поля. І навпаки, надмірно висока штанга може призвести до надмірного внесення на певних ділянках, оскільки схеми розпилення занадто сильно перекриваються. Підтримка правильної висоти забезпечує ідеальний баланс між перекриттям форсунок і рівномірністю покриття, що важливо для максимізації врожайності та мінімізації використання хімікатів.

Висота штанги також залежить від вибору форсунок і налаштувань тиску. Наприклад, віялові форсунки та форсунки з низьким дрейфом чутливі до змін висоти, оскільки їхні кути розпилення та розміри крапель оптимізовані для певних відстаней. Використання неправильної висоти штанги з цими насадками може поставити під загрозу утворення крапель і цілісність малюнка. Крім того, більша висота штанги може вимагати збільшення тиску розпилення для збереження покриття, що може призвести до менших крапель, які більш схильні до знесення. Це демонструє взаємозв'язок між висотою штанги, типом сопла та якістю розпилення.

У точному землеробстві технологічні досягнення, такі як автоматизовані системи контролю висоти штанги, допомагають підтримувати оптимальну висоту під час роботи в полі. Ці системи використовують датчики для вимірювання рельєфу землі та регулювання штанги в режимі реального часу,

гарантуючи, що схема розпилення залишається постійною, незважаючи на зміну рельєфу. Такі технології зменшують ризик людської помилки та підвищують точність обприскування, сприяючи більш стійким методам ведення сільського господарства шляхом підвищення ефективності введення та зниження екологічних ризиків.

Підсумовуючи, висота штанги відіграє фундаментальну роль у визначенні якості обприскування, впливаючи на покриття розпилення, потенціал дрейфу, рівномірність і розподіл крапель. Встановлення правильної висоти штанги гарантує ефективне та ефективне застосування сільськогосподарських хімікатів, зменшуючи відходи та мінімізуючи екологічні ризики. Фермери повинні враховувати висоту штанги разом з іншими параметрами, такими як тип форсунки, тиск і погодні умови, щоб досягти оптимальних результатів обприскування. За допомогою сучасних технологій підтримка точної висоти штанг може значно покращити практику вирощування врожаю, що призведе до підвищення врожайності та більш сталого землеробства.

Підсумовуючи, на якість обприскування впливає безліч взаємопов'язаних факторів. Досягнення оптимальної якості розпилення вимагає ретельного вибору та обслуговування обладнання, моніторингу навколишнього середовища, належної хімічної підготовки та кваліфікованої експлуатації. Керуючи цими факторами, оператори можуть підвищити ефективність, зменшити відходи та мінімізувати вплив на навколишнє середовище, зрештою досягаючи бажаних результатів від розпилення.

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

Застосування сільськогосподарських пестицидів є важливою практикою на фермах для контролю пошкодження врожаю або втрати врожаю від грибів, комах і бур'янів. Впровадження технологій точного землеробства, таких як автоматичне керування секцією штанги на основі карти, значно зросло за

останні кілька років, особливо для використання на самохідних сільськогосподарських обприскувачах. Основна мета цих систем, якщо їх розгортати на обприскувачах, полягає в тому, щоб зменшити надмірне внесення пестицидів шляхом автоматичного вимкнення секцій штанги (використовуються разом із GPS), коли вони проходять над попередньо обробленими ділянками або ділянками за межами поля.

Було проведено дослідження, щоб визначити потенційне зменшення площі покриття для полів неправильної форми за допомогою автоматичної системи контролю секцій із роздільною здатністю приблизно 1,0 м [1-4]. Результати цього дослідження показали, що площа охоплення була зменшена в середньому на 16% порівняно з приводом у дію всієї стріли як однієї секції. В іншому дослідженні з використанням полів різних форм і розмірів автоматична система керування секціями штанги з роздільною здатністю керування приблизно 6,0 м зменшила зону покриття в середньому на 6,2% порівняно з ручним керуванням.

Хоча було доведено, що ці системи зменшують надмірне внесення пестицидів на загальну площу поля, вони можуть одночасно впливати на норми внесення для решти секцій штанги. Дослідження продемонстрували, що коли секції керування штангами були вимкнені, підвищення тиску було помічено в секціях, які залишалися увімкненими. Як наслідок, від цих секцій керування штангою можна очікувати вищих норм внесення, оскільки контролер норми розпилення намагається компенсувати активацію секції керування шляхом зменшення потоку до штанги. Інший висновок цього дослідження вказує на те, що коли контрольні секції вмикалися, існував значний час затримки, оскільки контролер норми розпилення намагався підняти штангу обприскувача до належного робочого тиску для бажаної норми внесення.

Автори [3-5] оцінили кілька контролерів норми розпилення та виявили, що більшість систем можуть досягти заданої норми внесення протягом 5 с після зміни робочих умов, таких як закриття клапанів штанги або зміна

швидкості, хоча деяким контролерам потрібно більше часу. Іншим фактором, який може вплинути на норми внесення пестицидів під час обприскування, є кількість поворотів, необхідних для покриття конкретного поля. Нещодавній аналіз траєкторії обприскувача показав, що обприскувач зі штангою 24,8 м потенційно може внести надлишок або недостатню кількість пестицидів на значні частини поля під час повороту. Це дослідження показало, що на одному полі площею 35 га 23% площі поля могли отримати позанормове внесення, що перевищує 10% від цільової норми внесення через варіації в зонах охоплення штанги обприскувача під час повороту. У той час як потенційні місця помилок поза нормою, що є результатом повороту обприскувача, були оцінені [7], метод кількісної оцінки похибок норми внесення буде корисним для розуміння величини та географічного розташування цих похибок.

Було показано, що надмірне застосування деяких гербіцидів, таких як гліфосат, знижує ріст рослин під час післясходового застосування стійких до гліфосату сої [8]. Застосування гербіцидів нижче бажаної норми може призвести до втрати врожаю через конкуренцію бур'янів, що було відмічено в кукурудзі і сої.

Розробка технологій застосування пестицидів зі змінною швидкістю привернула значну увагу в останні роки і могла б запропонувати рішення для вирішення помилок при застосуванні обприскування. Пряме вприскування хімікатів є одним із типів технології внесення із змінною нормою, яка була запропонована як потенційне рішення для зменшення помилок, пов'язаних зі змінами швидкості руху.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) є ще однією технологією, яка вивчалася як потенційний варіант для застосування зі змінною швидкістю [9-11]. Хоча зараз розробляються системи керування обприскувачем, які використовують одну з цих технологій або їх комбінацію, ми вважаємо, що залишається багато питань щодо величини помилок застосування пестицидів, які трапляються сьогодні в полі.

Географічні інформаційні системи (ГІС) широко використовуються для відображення просторових даних, зібраних під час сільськогосподарських польових операцій. Фултон та ін. використали інструменти ГІС для моделювання розподілу сухих добрив із транспортних засобів-розкидачів, Джайлс і Дауні використали методи ГІС із системою збору даних на основі GPS і датчиків для розробки карт контролю якості розпилення, а Лоуренс і Юл створив ГІС-модель для оцінки варіацій польового внесення сухих добрив. Усі ці дослідження демонструють корисність ГІС для аналізу та представлення даних для опису помилок норми внесення в полі. Для подальшого розвитку успішних технологій (наприклад, прямого впорскування хімікату або ШІМ для зменшення помилок внесення необхідно більше інформації про те, як керування секціями, реакція контролера норми розпилення та поворотні рухи в полі можуть впливати на рівномірність норми внесення.

Таким чином, загальна мета цього дослідження полягала в тому, щоб продемонструвати ступінь варіації норми внесення пестицидів, яка може виникнути під час польового внесення за допомогою самохідного обприскувача з регулятором норми розпилення з компенсацією потоку. Конкретними цілями були: (1) створити карти норми внесення пестицидів на основі тиску в соплах, стану секції керування штангою та GPS-координат шляху обприскувача за допомогою ГІС, а також (2) кількісно визначити та охарактеризувати дані про норму внесення, щоб надати інформацію щодо того, як зміни швидкості обприскувача, активації секції керування штангою та поворотні рухи можуть вплинути на рівномірність нанесення.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Налаштування форсунок та збір даних

Дані були зібрані з трьох полів агропідприємств на Сумщині. Ці підприємства мають багато полів неправильної форми, багато з яких містять водні перепони з травою. Виробник використав систему автоматичного керування секціями штанги на основі карти, яка виключила застосування на ділянках за межами поля та в межах трав'яних водних шляхів і зменшила надмірне внесення через перекриття штанг обприскувача. Кожне поле отримало післясходову обробку гліфосатом для сформованого врожаю протягом літа 2024 року.

Агровиробник використовував самохідний обприскувач RoGator 1074, із штангою довжиною 30,48 м, що складається з 60 форсунок, розташованих на відстані 51 см. Автоматична система керування секціями штанги складалася з консолі вторинного керування (ZYNX X22, KE Technologies) та 30-канального електронного блоку керування (ECU) (Spray ECU 33, KE Technologies).

Консоль керування та ECU забезпечували 30 каналів керування для приведення в дію електромагнітних клапанів (клапани форсунок TeeJet, Capstan Ag Sys.), підключених до корпусів форсунок. Щоб підтримувати достатній потік через штангу, консоль керування відстежувала витрати системи за допомогою витратоміра та збільшувала або зменшувала потік до гідравлічного двигуна, який контролював швидкість насоса. Це було досягнуто за допомогою пропорційного гідравлічного клапана, який можна було відкривати або закривати залежно від зміни швидкості руху або спрацювання секції штанги.

Розпилювальні форсунки були віднесені до окремих каналів керування наступним чином: форсунки 1–6 ліворуч і форсунки 55–60 на правих кінцях штанги керувалися через окремі канали; форсунки 7-12 і 49-54 контролювали попарно; решта 36 внутрішніх форсунок штанги контролювалися групами по три (рис. 1). Ефективна ширина контрольної секції становила 51 см для

окремих форсунок, 102 см для парних форсунок і 152 см для форсунок у групах по три.

Пульт управління міг вмикати контрольні секції кожні 0,2 с (5 Гц). Пульст керування також слугував системою збору даних, записуючи географічні координати з частотою 1 Гц із частотою збору даних до 5 Гц (що збігалося з активаціями секції керування штангою, які тривали менше 1 с).

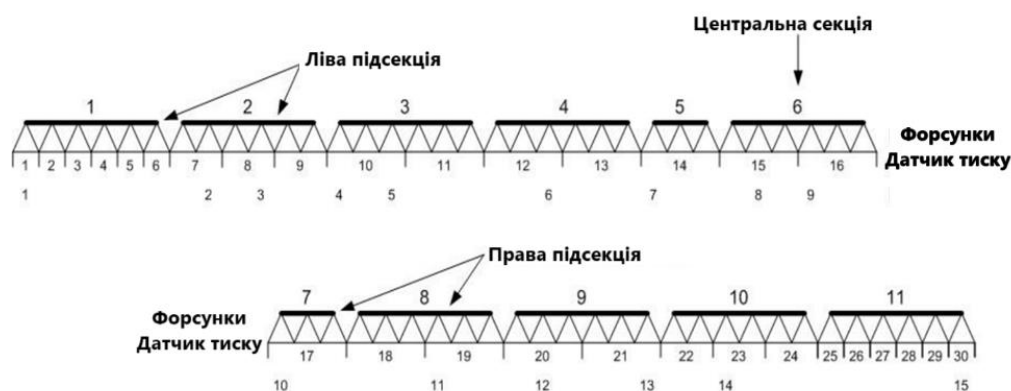


Рис. 1 - Підсекції штанги обприскувача (від 1 до 11), групи форсунок секцій автоматичного керування (від 1 до 30) і датчики тиску (від 1 до 15)

Опорні координати генерувалися з частотою 5 Гц за допомогою кінематичного (RTK) GPS-приймача в реальному часі (StarFire 2, Deere & Company, Moline, 122.) із заявленою точністю <2,53 см (Deere & Company, 2018). У кожній парі координат GPS консоль керування також записувала мітку часу разом із станами каналу керування (увімкнено = 1 або вимкнено = 0) у вигляді 30-бітного двійкового числа. Консоль керування починала записувати ці дані, коли будь-який стан каналу керування був увімкненим, і припиняла запис даних, коли всі канали були вимкнені. Ці дані зберігалися в текстовому файлі, розділеному табуляцією.

Датчики тиску (модель 1502 B84 EZ 100 PSI G, PC Piezotronic, Inc., Дерев, N.Y.) були встановлені на 15 форсунках поперек штанги обприскувача з принаймні одним датчиком у кожній підсекції штанги (рис. 1). Перетворювачі були підключені до системи збору даних (DAQ) для аналого-цифрового перетворення (аналоговий модуль 9242, National Instruments, Остін, Техас) для запису вихідної напруги з частотою 10 Гц для кожного датчика тиску.

Послідовний модуль (модуль послідовного введення 9855, National Instruments) використовувався для зчитування координат GPS (із рядка GGA), наданих додатковим приймачем DGPS (Ag144, Trimble Navigation). Значення напруги датчика тиску (14,5 мВ/кПа) були перетворені в показники тиску (кПа), і ці дані були записані в текстовий файл за допомогою програми, написаної в LabVIEW, разом із часовими мітками DGPS, що реєструвалися на частоті 10 Гц. Для реалізації цих процедур систему збору даних було підключено до зовнішнього ПК (окремо від пульта керування).

## 2.2 Аналіз даних

Стани спрацьовування керування секцій штанги та координати RTK GPS з консолі керування були синхронізовані з даними тиску, записаними системою збору даних, шляхом зіставлення позначок часу GPS з обох наборів даних. Об'єднаний набір даних містив записи, які включали позначку часу GPS, координати RTK GPS (формат NAD 1983 UTM), стан контрольної секції (30-значне двійкове число) і значення тиску з усіх датчиків. На основі методів, детально викладених [11], зони покриття для кожної контрольної ділянки були розраховані за послідовними координатами GPS разом із радіусом повороту (R), кутом повороту і пройденою відстанню. Необхідно було оцінити витрати на соплах на основі даних датчика тиску; отже, калібрувальні криві були розроблені на основі даних, наданих виробником для наконечників сопел, які використовує виробник (TeeJet TT11050, Spraying Systems, Wheaton). Залежність швидкості потоку сопла (л/с) від тиску (кПа) наведено на основі даних виробника (Spraying Systems Co., 2019) на рис. 2.

Рівняння калібрувальної кривої (нульове перетинання) з цих даних було використано для оцінки витрати через сопло за показаннями датчика тиску для найближчого датчика тиску в кожній контрольній секції. Стандартні калібрувальні криві зазвичай будуються без перерізу (рис. 2); однак було зареєстровано багато значень тиску нижче 100 кПа, і було прийнято рішення оцінити тиск у цій області шляхом протягування кривої через початок

координат. Потім обчислювали норми внесення між послідовними GPS-координатами шляхом множення оціненої швидкості потоку сопла (л/с) на час між координатами та ділення цього значення на площу покриття контрольної ділянки (га).

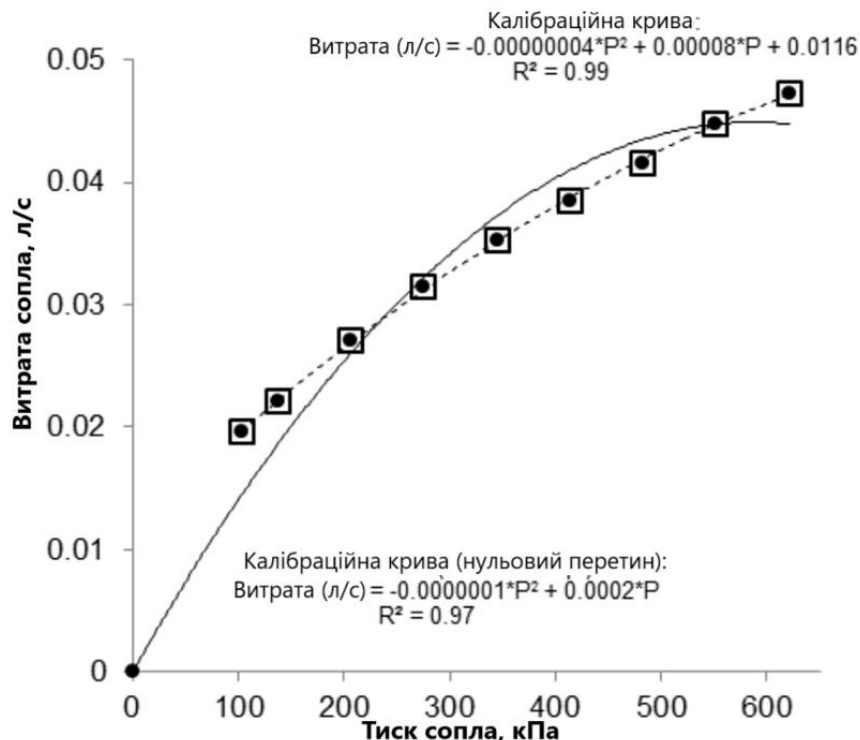


Рис. 2 - Калібрувальна крива для оцінки швидкості потоку сопла за даними датчика тиску сопла зі стандартною калібрувальною кривою (ненульове перетинання) за даними виробника

Результуючі норми внесення для кожної контрольної секції штанги були записані (л/га) і нанесені на графік із відповідними GPS-координатами контрольної секції в ArcMap за допомогою методів, описаних в [14] для створення карт розрахункових норм внесення. Норми внесення порівнювали з цільовою нормою (93,5 л/га), щоб визначити площі поля, які отримували більше або менше цієї кількості. Важливо відзначити, що значення норми внесення секції штанги, що перевищують 1870 л/га (у 20 разів перевищує цільову норму), були виключені з аналізу.

Розрахункові норми внесення вище 1870 л/га зазвичай траплялися під час щільних поворотів (радіус повороту <15 м) і були результатом поділення розрахункової витрати через сопло на дуже малу розрахункову площу

покриття. Це збільшило розрахункові норми внесення для цих контрольних ділянок значно вище 1870 л/га; однак це сталося в кількох місцях у межах полів (головним чином у полі 2 в результаті більшої кількості поворотів порівняно з полями 1 і 4). Оскільки це відбувалося на дуже малих площах покриття, що не вносило великого внеску в розподіл норм внесення порівняно з відсотком покриття поля, ці значення не враховувалися.

Щоб проілюструвати вплив приведення в дію секції штанги, зміни швидкості обприскувача та поворотних рухів на розрахункові норми внесення, необхідно було розрахувати додаткові параметри з польових даних. Швидкість обприскувача розраховували як відстань між послідовними координатами GPS, поділену на різницю між відповідними мітками часу. Прискорення обприскувача оцінювали як зміну швидкості (розраховану для кожної координати GPS), поділену на різницю часових позначок.

Для кількісної оцінки коливань по штанзі обприскувача стандартне відхилення було розраховано на основі оцінених норм внесення для всіх секцій керування штангою, які були включені на кожній GPS-координаті. Нарешті, норми внесення контрольної секції та стандартне відхилення були усереднені по штанзі обприскувача для порівняння з параметрами, згаданими вище.

Щоб підкреслити вплив реакції регулятора норми розпилення на розрахункову норму внесення, для обговорення було обрано чотири сценарії. Сценарії А і В відображали уповільнення та прискорення обприскувача, відповідно, з незначним приведенням в дію секції штанги або без неї. Сценарій С ілюстрував обприскувач, який рухався з постійною швидкістю, коли секції штанги приводилися в дію, тоді як сценарій D складався з області, де обприскувач рухався з постійною швидкістю, коли секції штанг приводилися в дію. Для кожного сценарію швидкість обприскувача та середня норма внесення штангою обприскувача були побудовані в залежності від часу, щоб проілюструвати зміни в оцінюваних нормах внесення.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 3.1 Розподіл норми внесення та картографування

Варіації в оцінюваних нормах внесення можна побачити на рис. 3 для полів 1, 2 і 4, де ці дані були нанесені для кожної керованої секції. Дані, наведені на рис. 3, висвітлюють місця, де на розрахункові норми внесення пестицидів могли вплинути такі фактори, як реакція регулятора норми розпилення на активацію керованої секції штанги та зміни швидкості руху або повороти обприскувача. Розрахункові норми застосування були розділені на п'ять діапазонів, щоб класифікувати варіації пестицидів, застосованих на кожному з досліджуваних полів.

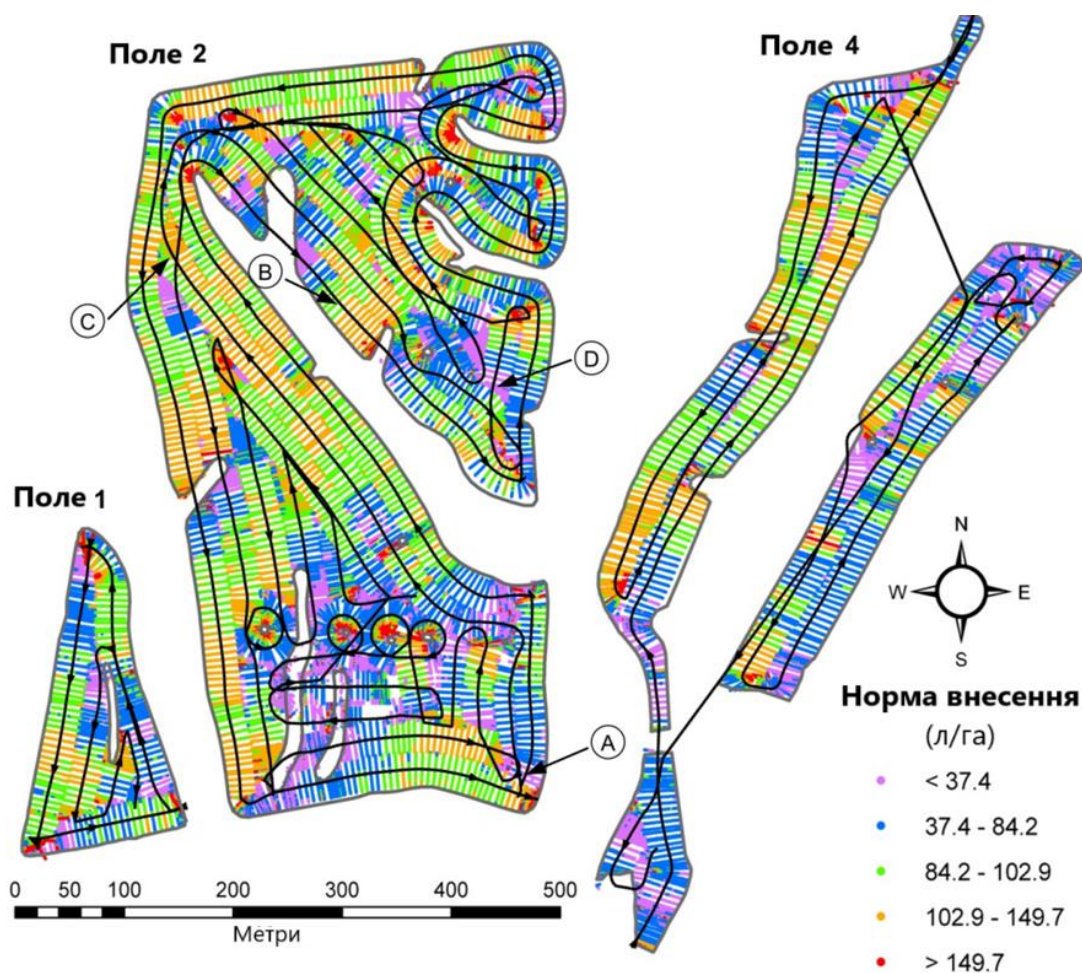


Рис. 3 - Карти орієнтовної норми внесення на основі даних про тиск у соплах та аналізу траєкторії обприскувача для полів 1, 2 і 4 із траєкторією та напрямком руху чорним кольором

Рис. 4 ілюструє розподіл норми внесення в залежності від відсотка площі поля, що отримує ці норми. Слід зазначити, що цільова норма внесення, встановлена виробниками, становила 93,5 л/га, а діапазон від 84,2 до 102,9 л/га представляв цільову норму  $\pm 10\%$ . Точність GPS ( $< 2,54$  см) могла сприяти похибці до 2,5% від розрахункової норми внесення. Це базувалося на часі дискретизації 0,2 с; помилка була б зменшена, оскільки координати GPS реєструвалися з інтервалом 1,0 с. З інформації, що міститься на рис. 3 і 4, можна побачити, що більшість площ, здається, отримують обробку на рівні або нижче цільової норми, встановленої виробником.

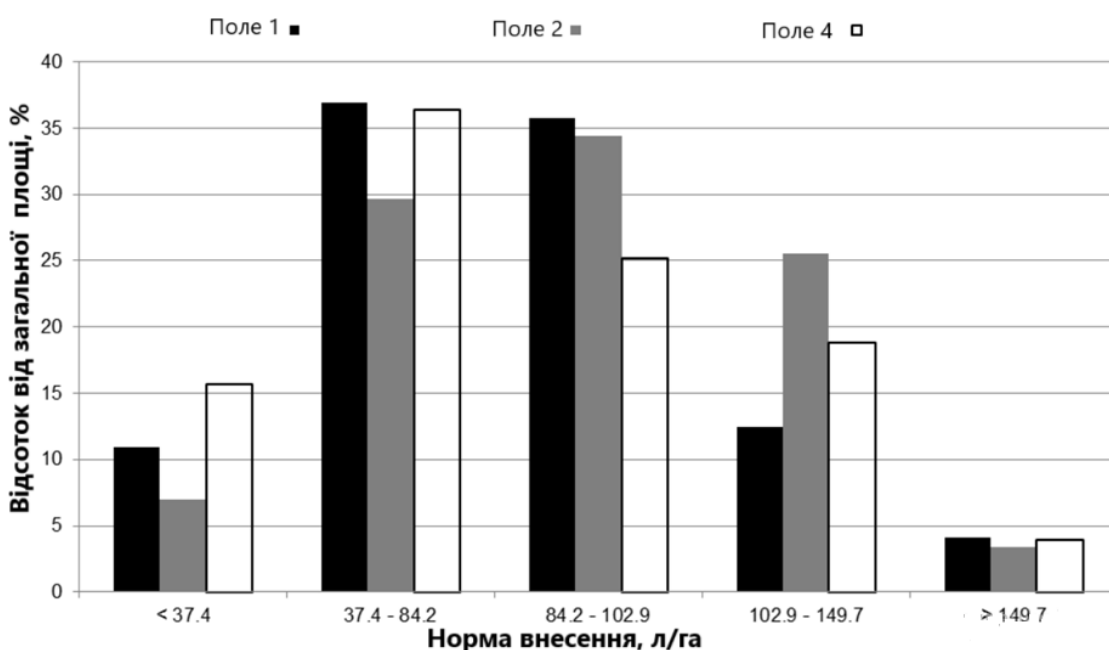


Рис. 4 – Розподіл польових площ, покритих за вибраних розрахункових діапазонів норм внесення

Цікаво відзначити, що найбільший відсоток площі на полі 2 (34,5%) було внесено за цільової норми  $\pm 10\%$ . Більшість полів 1 і 4 (36,9% і 36,4% відповідно) отримали норми внесення, нижчі від цільової (37,4 до 84,2 л/га). Дані на малюнку 4 вказують на те, що для всіх полів норми внесення зазвичай були нижчими за цільовий діапазон (84,2–102,9 л/га) на відміну від вищих за цей діапазон. Слід зазначити, що надмірне внесення в результаті подвійного покриття (у зонах точкового ряду або в інших випадках перекриття штанг обприскувача) не розглядалося в цьому дослідженні. Якби це було включено,

розрахунковий розподіл норм внесення, ймовірно, змістився б праворуч, оскільки дещо більше площ кожного поля отримали б вищі норми через перекриття штанг обприскувача. Оскільки обприскувач мав ширину секцій управління в діапазоні від 51 до 152 см, будь-яке збільшення, ймовірно, було б мінімальним і в цьому випадку (на відміну від обприскувача з більшою шириною секцій керування) не сильно вплинуло б на розподіл норми внесення. ступінь.

### 3.2 Вплив прискорення обприскувача

Однією з потенційних причин зміни норми внесення є реакція регулятора норми розпилення на зміни швидкості руху. Система керування обприскувачем була налаштована на підтримку бажаної норми внесення незалежно від зміни швидкості руху. Як зазначалося раніше, пропорційний гідравлічний регулюючий клапан використовувався для керування швидкістю насоса на основі зворотного зв'язку від датчика потоку між насосом і штангою обприскувача.

Таблиця 1 – Зведені дані про продуктивність обприскувача в полі та норми внесення під час прискорення та уповільнення обприскувача

	Сер. кут повороту, град.	Сер. швидкість, обприскувача, м/с	Відсоток від площі, %		Середня норма внесення, л/га	
			Прискорення	Гальмування	Прискорення	Гальмування
Поле 1	2.5	5.00	44.7	51.8	8.75	10.64
Поле 2	3.5	5.56	49.6	44.4	9.60	11.00
Поле 4	2.75	5.35	51.6	45.2	8.06	9.26

Таблиця 1 містить зведення даних про польові характеристики, записаних під час тестування. Середня швидкість обприскувача коливалася від 5,0 до 5,56 м/с для трьох досліджуваних полів, що, ймовірно, було пов'язано з розміром поля та характером перешкод (порослих травою водних шляхів), які зустрічалися під час внесення. Максимальна похибка в розрахунках швидкості була оцінена в 0,127 м с<sup>-1</sup> (на основі точності GPS 2,54 см за мінімального часу

вибірки 0,2 с), що означає похибку не більше 2,5% порівняно із середньою швидкістю обприскувача.

У таблицю 1 також включено середні норми внесення (поперек штанги обприскувача) при прискоренні та уповільненні для всіх трьох полів. Ці дані вказують на те, що середня норма внесення була вищою, оскільки обприскувач сповільнювався, ніж прискорювався на досліджуваних полях. Здавалося б, це підтверджує ідею про певну затримку, пов'язану з контролером норми розпилення, оскільки він намагається підтримувати належний потік до штанги обприскувача зі змінами швидкості.

Сценарії А і В (у місцях А і В, відповідно, на рис. 3) були виділені, щоб показати зміну середньої норми внесення штангою обприскувача відносно змін швидкості обприскувача. Швидкість обприскувача та середня норма внесення штанги обприскувача нанесено на графік залежно від часу (t, с) на малюнку 5 з лініями регресії, щоб проілюструвати загальну тенденцію для цих даних.

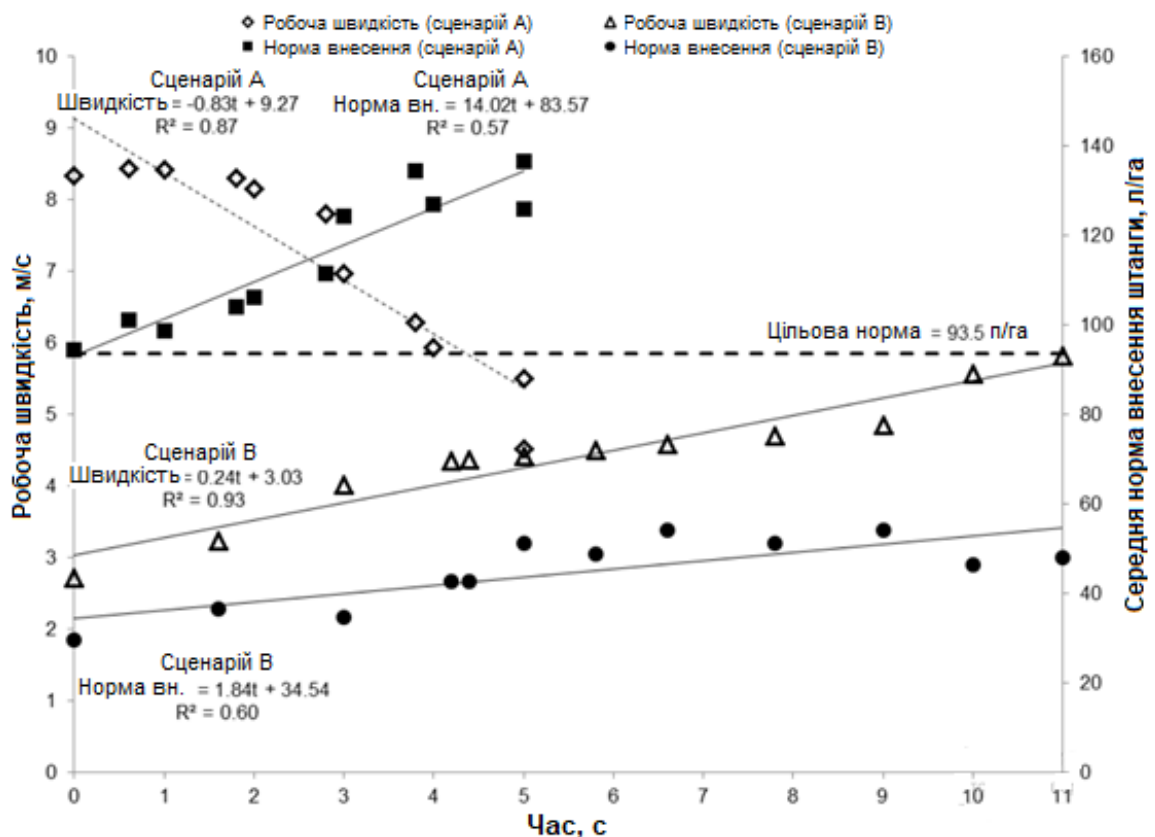


Рис. 5 – Вплив уповільнення (сценарій А) і прискорення (сценарій В) обприскувача на середню норму внесення штангою обприскувача

У сценарії А контролер норми внесення щойно досяг цільової норми, коли швидкість обприскувача зменшилася з 9,0 до 6,0 м/с для входу в трав'яний водний шлях у полі 2 (місце А на рис. 3). Коли обприскувач сповільнився протягом наступних 5,0 с (з увімкненими всіма 30 контрольними секціями), середня норма внесення зросла приблизно до 140 л/га, після чого штанга обприскувача почала входити в трав'яний водний шлях. Сценарій А продемонстрував, що був час затримки, оскільки контролер намагався компенсувати уповільнення, зменшивши потік до штанги обприскувача.

Сценарій В ілюструє ситуацію, коли обприскувач прискорився, коли оператор почав внесення на поле 2 (розташування В на рис. 3). Коли обприскувач прискорився від 3,0 м с-1 до трохи більше 6,0 м с-1, усі секції керування штангою були ввімкнені (за винятком трьох форсунок на правому кінці штанги, які були вимкнені приблизно через 5 с). На рис. 5 показано, що в міру прискорення обприскувача середня норма внесення продовжувала зростати, оскільки контролер компенсував збільшення швидкості, але цільова норма 93,5 л/га не була досягнута протягом цього періоду часу. Таблиця 1 підсумовує частини кожного поля, які оброблялися, коли обприскувач прискорювався або сповільнювався, і вказує, що зміни швидкості відбувалися у великій частині всіх досліджуваних полів.

### **3.3 Наслідки приведення в дію секції штанги**

Іншим фактором, який може призвести до зміни норми внесення, може бути активація керування секцією штанги. Автор [18] зазначив, що коли секції керування штанги вмикалися, тиск на штанзі (і, отже, швидкість потоку через сопло) падав, і була затримка (іноді до 15 с), перш ніж тиск у соплах повертався до необхідного робочого тиску. Щоб побачити, чи спостерігаються подібні тенденції в зібраних даних, середню норму внесення штанги обприскувача порівнювали із сукупним часом, протягом якого була увімкнена штанга обприскувача.

Сукупний час починався щоразу, коли контрольна секція була увімкнена та залишалася увімкненою, і закінчувався, коли всі секції були вимкнені. При повторному увімкненні контрольної частини кумулятивний час починався знову. Середні норми внесення штанги обприскувача були побудовані на графіку в порівнянні з діапазонами сукупного часу, протягом якого штанга обприскувача залишалася, і показані на рис. 6.

З цих даних можна побачити, що норми внесення збільшувалися, оскільки штанга обприскувача залишалася увімкненою протягом довшого періоду часу. У випадку полів 1 і 2 середня норма внесення штангою обприскувача перевищувала цільову норму протягом сукупного часу, що перевищує 15 с. Ця інформація підтверджує висновки [19], який припустив, що, оскільки секції штанги залишаються увімкненими протягом довшого періоду часу, існує більша ймовірність того, що штанга повернеться до робочого тиску для досягнення бажаної норми внесення.

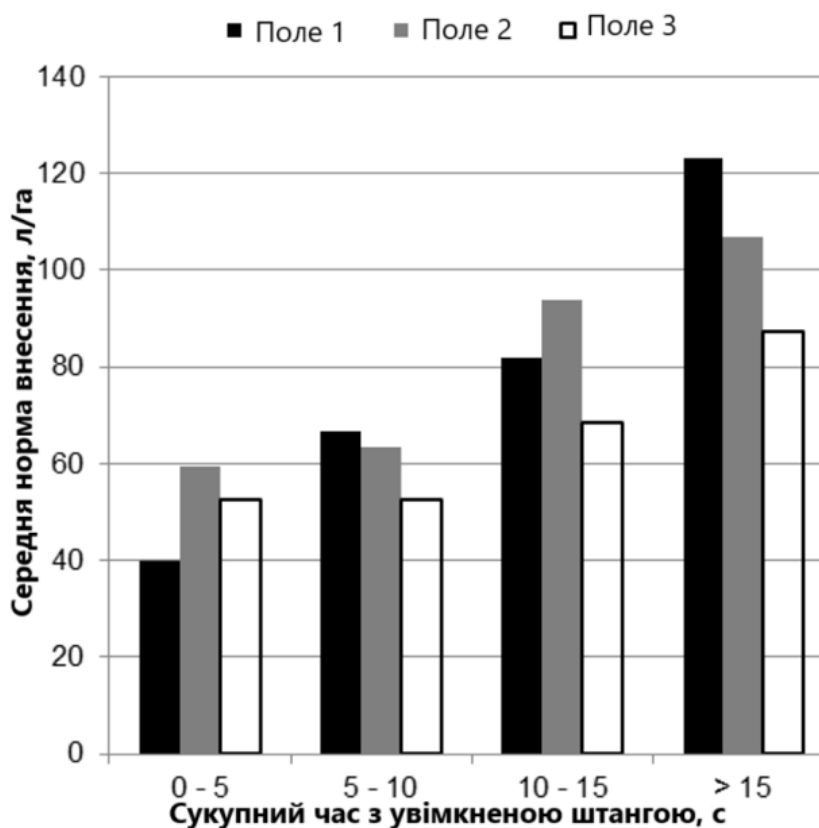


Рис. 6 – Середня норма внесення штанги обприскувача порівняно з вибраними діапазонами сукупного часу, протягом якого штанга обприскувача залишалася увімкненою

На додаток до даних на рис. 6, сценарії С і D були виділені з польових даних, щоб спостерігати вплив приведення в дію секції штанги на розрахункову норму внесення (рис. 7). Сценарій С (розташування С на рис. 3) представляє обприскувач, що рухається з майже постійною швидкістю (0,38 м/с зміна від максимальної до мінімальної швидкості обприскувача), коли секції керування штангами були вимкнені. У цьому місці обприскувач переходить у рядки, а секції штанги вимикаються (від 28 секцій до повного вимкнення) протягом 6,0 с (між 3,0 і 9,0 с на рис. 7). За цей час середні показники тиску на штанзі обприскувача зросли з 375 до 470 кПа. У нульовий час середня норма внесення по штанзі обприскувача була трохи вищою за цільову норму.

Після того, як секції штанги почали відключатися, норма внесення в інших секціях зросла майже до 140 л/га. Ці дані вказують на те, що активація секції керування штангою може призвести до збільшення норм внесення внаслідок підвищення тиску в секціях, які залишаються ввімкненими, оскільки система керування намагається зменшити швидкість потоку, щоб компенсувати вимкнення секції керування.

Ця інформація також підтверджує висновки [20], у якому було помічено збільшення тиску на соплах у контрольних секціях, які залишалися увімкненими, коли інші контрольні секції були вимкнені. За даними [21], система управління змогла стабілізувати тиск в інших секціях через деякий час. Сценарій D було обрано, щоб продемонструвати реакцію регулятора норми внесення на ввімкнення секцій. У сценарії D (розташування D на рис. 3) обприскувач почав виходити з рядів з майже постійною швидкістю (0,33 м/с, варіація від максимальної до мінімальної швидкості обприскувача), коли секції штанги були ввімкнені.

У нульовий час (рис. 7) було ввімкнено шість секцій штанги (починаючи з правого кінця) і секції продовжували активуватися (до лівого кінця) до 2,0 с, коли було активним 29 секцій. Середня норма внесення штангою обприскувача

продовжувала зростати протягом ще 5 с, після чого була досягнута цільова норма внесення.

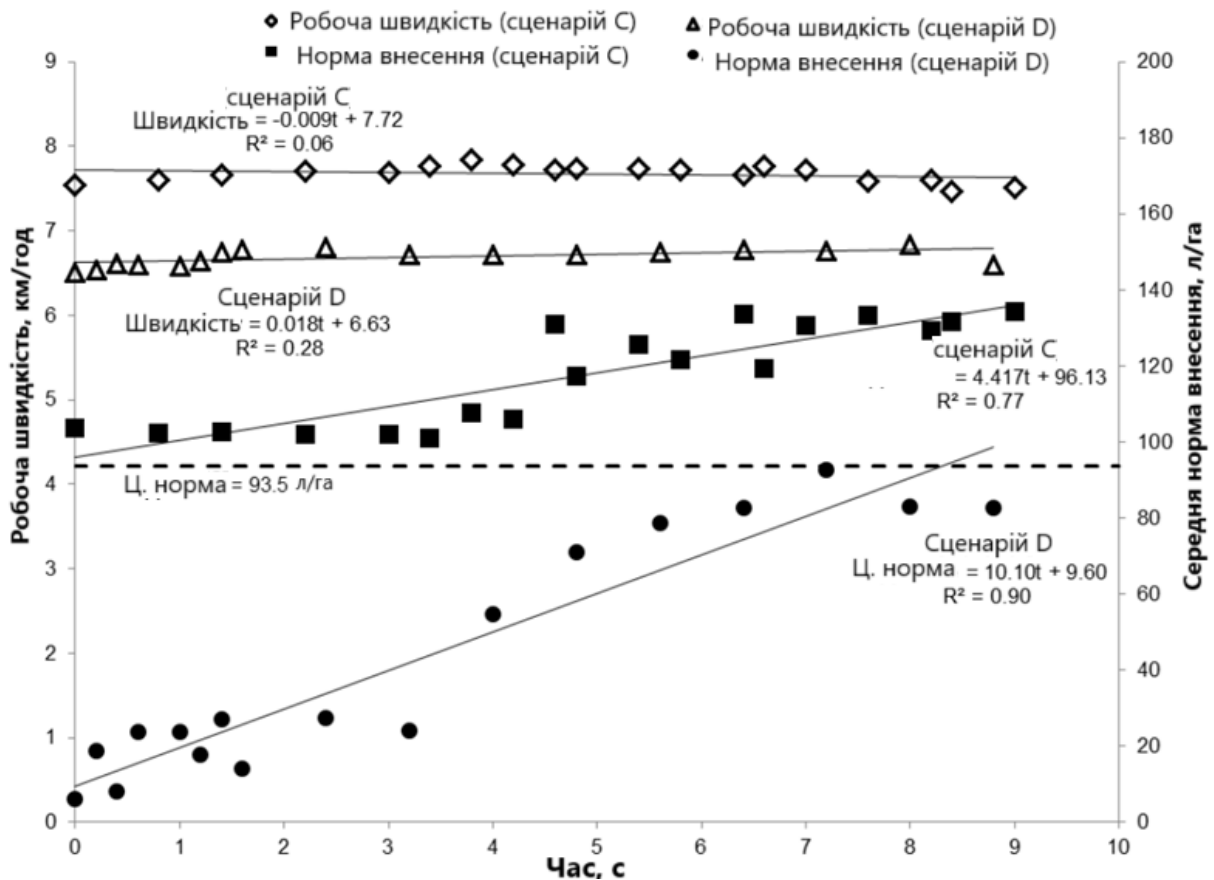


Рис. 7 - Вплив активації секції штанги на середню норму внесення штанги обприскувача, коли секції вимикаються (сценарій С) і вмикаються (сценарій D)

З нуля до 9,0 с середній тиск штанги обприскувача збільшився з 36 до 286 кПа. Ці дані вказують на те, що менші норми внесення могли статися через активацію секції керування штангою, оскільки контролер норми внесення намагався збільшити швидкість потоку системи, щоб компенсувати ввімкнення секцій керування.

### 3.4 Вплив поворотів

Як зазначають [22], коливання норми внесення може відбуватися по штанзі обприскувача під час повороту, оскільки внутрішні секції штанги охоплюють меншу площу, ніж зовнішні секції. Дані середнього стандартного

відхилення штанги обприскувача представлено на графіку в залежності від діапазонів радіусів повороту на рис. 8.

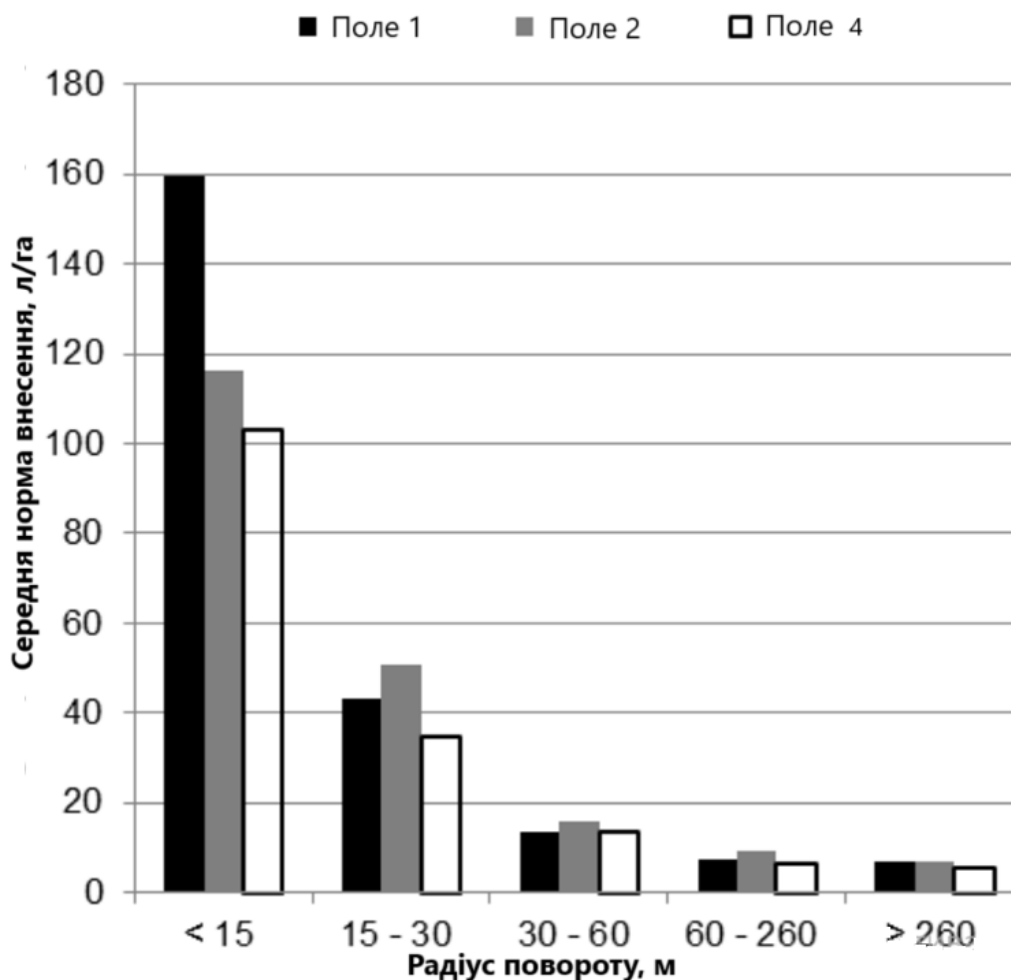


Рис. 8 – Середнє стандартне відхилення в нормі внесення залежно від діапазонів радіусу повороту обприскувача

Ці дані показують, що існувала велика варіація норми внесення по штанзі обприскувача для радіусу (R) менше 15 м (приблизно половина ширини штанги обприскувача). Для радіусів повороту від 15 до 30 м коливання норми внесення по штанзі обприскувача все ще були значними, близько 40 л/га для всіх трьох полів. Зі збільшенням R зміни норми внесення по штанзі обприскувача зменшилися. Середні значення (яке є обернено пропорційним середньому R) наведено в таблиці 1 для всіх трьох полів і вказує на те, що поле 2 (3,5°) мало найбільшу кількість поворотів, потім поле 4 (2,75°) і поле 1 (2,5°).

Середнє стандартне відхилення норми внесення для кожної секції керування штангою в порівнянні з відповідною відстанню до осьової лінії

штанги (d, m) наведено на рис. 9, щоб виявити будь-яку різницю у варіаціях штанг обприскувача для трьох досліджуваних полів. Ці дані вказують на те, що зміна швидкості контрольної секції по штанзі обприскувача була більш помітною на полі 2 порівняно з двома іншими полями. Поля 1 і 4 продемонстрували незначне збільшення або взагалі не збільшили варіації по штанзі обприскувача, що, ймовірно, було пов'язано з тим, що для покриття цих полів потрібно було менше поворотів порівняно з полем 2.

Це можна побачити на рис. 9, де точки даних для полів 1 і 4 схожі порівняно з полем 2, яке помітно збільшується з більшими значеннями d. Як обговорювали [23], поворот на постійній швидкості може призвести до більшого покриття при зменшених нормах внесення, оскільки зовнішня частина штанги охоплює більше площі порівняно з внутрішньою частиною. Виходячи з інформації, представлені раніше, прискорення обприскувача та активація секції штанги можуть впливати на цю тенденцію. Якщо обприскувач прискорюється під час повороту, норми внесення можуть бути нижчими по всій штанзі обприскувача, тоді як уповільнення може призвести до вищих середніх норм внесення. Дані, представлені в цьому дослідженні, піднімають важливі питання щодо ефективності пестициду в областях, де відбуваються зміни тиску, швидкості обприскувача або поворотні рухи.

Оператори зазвичай роблять перший прохід навколо поля, щоб обприскувати зони розвороту, і ця практика використовувалася під час цього дослідження. У цій ситуації поля з нерівними межами або вкритими травною водними шляхами можуть вимагати значного повороту, щоб завершити цей початковий прохід (поле 2 є хорошим прикладом цього). Як обговорювали [19], існує потенціал для більшої варіації норми внесення на полях, де потрібна значна точність, порівняно з полями правильної форми, де використовуються прямі паралельні проходи.

Таким чином, вибір маршруту може відігравати важливу роль у зменшенні впливу зміни норми внесення внаслідок поворотів. Однак слід визнати, що модифікація маршруту для покращення одноманітності

застосування може призвести до втрати ефективності в полі. Підтримка належної норми внесення під час прискорення обприскувача або приведення в дію секцій штанги є функцією системи керування.

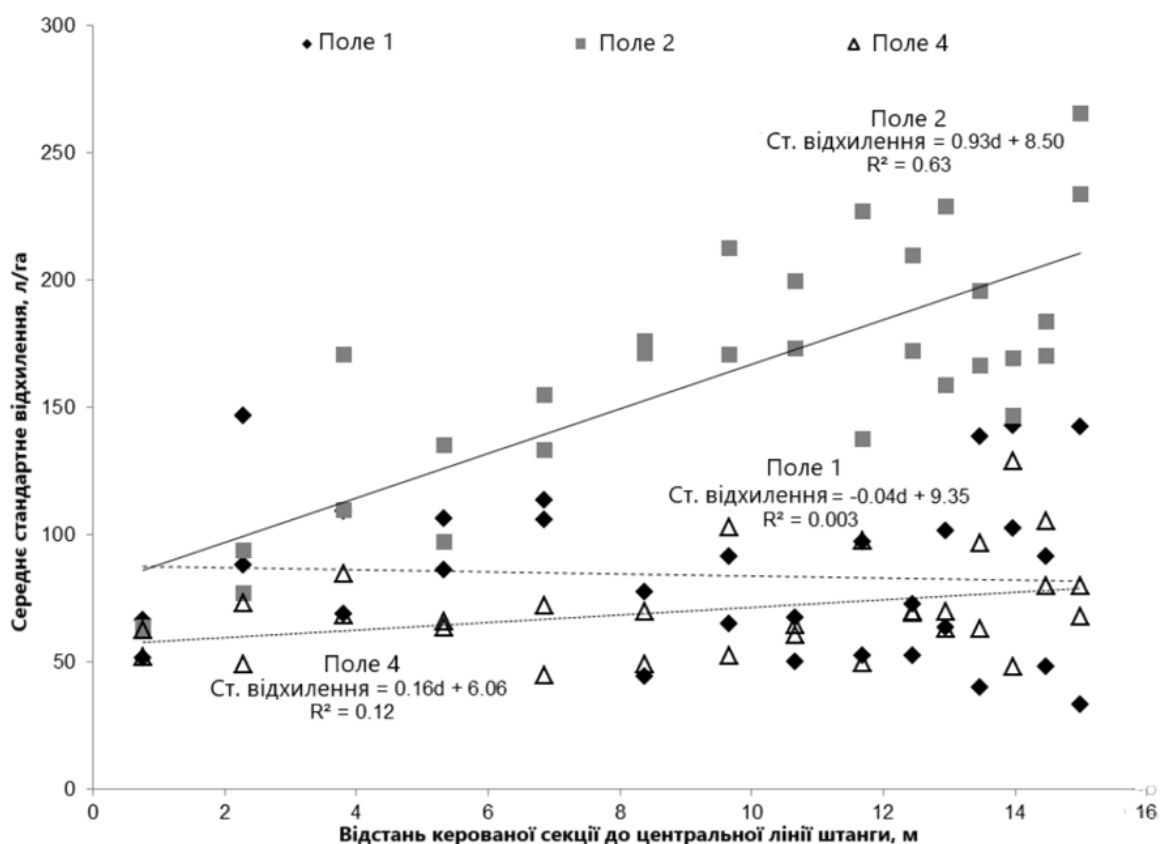


Рис. 9 – Середнє стандартне відхилення секції керування штангою в залежності від відстані до центральної лінії штанги

Виходячи з результатів цього дослідження, підтримання постійної швидкості обприскувача, ймовірно, покращить варіацію норми внесення, оскільки потреба в компенсації системи керування буде зменшена. Компоненти системи контролю, які могли вплинути на рівномірність норми внесення в цьому дослідженні, включали роздільну здатність витратоміра та тип клапана регулювання потоку. Необхідні подальші дослідження ефективності цих системних компонентів, щоб краще зрозуміти внесок системи керування в помилки норми внесення.

## ВИСНОВКИ

Результати цього дослідження показують, що значні частини досліджуваних полів отримали норми внесення, які були значно вищими або нижчими за цільову норму внесення через коливання тиску на штанзі та повороти обприскувача. Лише від 25% до 36% площі для трьох досліджуваних полів отримали норми внесення в межах цільового діапазону (84,2-102,9 л/га).

Виявилось, що більшість полів було покрито з нормами внесення, нижчими за 90% від цільової норми, що, ймовірно, сталося через поворотні рухи та затримки системи керування в налаштуванні потоку штанги до необхідного рівня, як оцінено шляхом вимірювання тиску форсунок уздовж штанги. Час затримки регулятора норми розпилення міг сприяти зниженню норм внесення, оскільки обприскувач прискорювався, а контролер намагався відрегулювати витрати штанги для цих змін швидкості. І навпаки, коли обприскувач сповільнювався, час затримки контролера, здавалося, сприяв вищим нормам внесення.

Результати також показали, що цільова норма внесення була більш імовірною, якщо б секції штанги були активними протягом більш тривалого періоду часу. Потрібне подальше тестування в контрольованих умовах, щоб виділити вплив прискорення обприскувача та спрацьовування секції керування штангою на тиск штанги та, зрештою, рівномірність норми внесення.

Це дослідження було проведено з окремим самохідним обприскувачем, який використовував гідравлічний контрольний клапан для керування швидкістю насоса з певною швидкістю розпилення та автоматичною системою керування секцією штанги. Оскільки доступні інші системи керування обприскувачем (а також інші обприскувачі з різними контролерами норми розпилення), майбутні випробування також повинні включати ці системи, щоб надати інформацію про те, як вони реагують на такі фактори, як прискорення обприскувача та активація секції штанги.

## 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