

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 внесення засобів захисту рослин в системах точного землеробства»

Виконав:

(підпис)

Владислав ГУЙВА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

_____ СТЗ 2402-2М

Науковий керівник:

(підпис)

Владислав ЗУБКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Гуйва Владислав Сергійович

Дослідження факторів, що впливають на показники якості внесення засобів захисту рослин в системах точного землеробства.

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 50 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 1 таблицю, 9 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

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

Загальна мета цього дослідження полягала у тому, щоб наочно продемонструвати масштаб варіацій у нормі внесення пестицидів, які можуть виникати під час реального польового застосування самохідним обприскувачем, оснащеним регулятором норми з компенсацією потоку. Дослідження було спрямоване на виявлення того, наскільки стабільним є процес внесення за умов змінної швидкості руху, маневрування техніки та роботи секцій штанги. Серед основних завдань було: сформулювати детальні геопросторові карти фактичних норм внесення на основі даних про тиск у соплах, статус увімкнення чи вимкнення секцій штанги, а також GPS-траєкторій руху обприскувача; здійснити кількісний та якісний аналіз отриманих даних; визначити, у який спосіб зміни швидкості руху, активація секцій штанги та поворотні операції впливають на рівномірність покриття посівів робочим розчином.

Отримані результати дослідження свідчать, що значна частина площ оброблених полів отримала фактичні норми внесення, які помітно відхилялися від заданого значення. Основними причинами цього стали коливання тиску в системі обприскування та специфіка руху техніки під час роботи в полі. Лише від 25% до 36% площі трьох досліджуваних полів відповідали встановленому

цільовому діапазону норми внесення (84,2–102,9 л/га), що свідчить про суттєву нерівномірність покриття.

Було встановлено, що на більшості ділянок фактична норма внесення виявилася меншою ніж 90% від заданої. Імовірно, це спричинено поворотними рухами техніки, під час яких система керування не встигає оперативно адаптувати витрату робочої рідини, а також інерційністю регулятора норми. Затримка системи контролю у відпрацюванні змін швидкості руху призводила до того, що під час прискорення обприскувача фактична норма зменшувалася, оскільки контролер не встигав компенсувати підвищену потребу у подачі рідини. Навпаки, під час уповільнення техніки інерційність системи спричиняла перевищення подачі у окремих секціях штанги, що також негативно впливало на рівномірність нанесення пестициду.

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

ABSTRACT

Guyva Vladislav Serhiyovych

Study of factors affecting the quality indicators of plant protection products application in precision farming systems.

The final qualification work is presented on 50 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 1 table, 9 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

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

The general goal of this study was to clearly demonstrate the scale of variations in the rate of pesticide application that can occur during real field application by a self-propelled sprayer equipped with a rate controller with flow compensation. The study was aimed at identifying how stable the application process is under conditions of variable speed, maneuvering of equipment and

operation of boom sections. The main tasks were: to create detailed geospatial maps of actual application rates based on data on nozzle pressure, boom section on/off status, and GPS trajectory of the sprayer; to conduct quantitative and qualitative analysis of the data obtained; to determine how changes in speed, boom section activation, and turning operations affect the uniformity of crop coverage with the working solution.

The results of the study indicate that a significant part of the areas of the treated fields received actual application rates that significantly deviated from the set value. The main reasons for this were fluctuations in pressure in the spraying system and the specifics of the movement of the equipment during field work. Only 25% to 36% of the area of the three studied fields corresponded to the established target application rate range (84.2–102.9 l/ha), which indicates significant uneven coverage.

It was found that in most areas the actual application rate was less than 90% of the set one. This is probably caused by the turning movements of the equipment, during which the control system does not have time to quickly adapt the flow rate of the working fluid, as well as the inertia of the rate controller. The delay of the control system in working out changes in the speed of movement led to the fact that during the acceleration of the sprayer the actual rate decreased, since the controller did not have time to compensate for the increased need for fluid supply. On the contrary, during the deceleration of the equipment, the inertia of the system caused an excess of supply in individual sections of the boom, which also negatively affected the uniformity of pesticide application.

Keywords: spraying, repeated application, application rate, pesticides, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	10
1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин	10
1.2 Фактори, що впливають на якість обприскування	15
1.3 Використання технологій точного землеробства для операцій обприскування.....	26
Розділ 2. Методика досліджень.....	30
2.1 Налаштування форсунок та збір даних.....	30
2.2 Аналіз даних.....	32
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	36
3.1 Розподіл норми внесення та картографування.....	36
3.2 Вплив прискорення обприскувача.....	38
3.3 Наслідки приведення в дію секції штанги.....	40
3.4 Вплив поворотів.....	43
Висновки.....	47
Список використаних джерел.....	48

ВСТУП

1. Актуальність теми

Самохідні обприскувачі, обладнані автоматичними регуляторами норми та секційним контролем, є важливою складовою сучасних агротехнологій. Проте їх робота за умов змінної швидкості, маневрування та складної конфігурації поля може супроводжуватися суттєвими коливаннями подачі робочого розчину. Це зумовлює необхідність детального вивчення факторів, що впливають на якість внесення ЗЗР, та удосконалення методів контролю їх роботи в польових умовах. Таким чином, дослідження стабільності норми внесення та характеристик роботи систем керування обприскувачів є актуальним як у науковому, так і в практичному аспекті.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Проблема рівномірності обприскування традиційно розглядається у працях вітчизняних та зарубіжних дослідників, які акцентують увагу на параметрах форсунок, робочому тиску, швидкості руху техніки, вітровому навантаженні та характеристиках робочого розчину. Потребують подальшого вивчення просторові закономірності розподілу фактичних норм внесення, а також взаємозв'язок між динамікою руху обприскувача та стабільністю роботи регулятора норми подачі. Це зумовлює необхідність проведення комплексного дослідження з використанням геопросторових даних та сучасних інструментів аналітики.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є встановлення впливу ключових факторів роботи самохідного обприскувача на якість внесення засобів захисту рослин у системах точного землеробства, а також оцінка просторової варіабельності фактичної норми внесення у реальних польових умовах.

4. Об'єкт дослідження

Процес внесення робочого розчину самохідним обприскувачем у системах точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Фактори, що впливають на рівномірність і стабільність норми внесення засобів захисту рослин, зокрема зміни швидкості руху, робота секцій штанги, поворотні маневри та динаміка тиску в системі обприскування.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати стан питання щодо технологій обприскування та вимог до якості внесення ЗЗР;
- здійснити збір даних про роботу обприскувача, включаючи тиск у форсунках, статус секцій штанги та GPS-траєкторію руху;
- визначити вплив швидкості руху, активації секцій штанги та поворотних маневрів на рівномірність внесення ЗЗР;
- оцінити ступінь відхилення фактичної норми внесення від заданої та визначити ключові причини варіацій.

7. Методи дослідження

У роботі застосовано комплекс методів, що включають: теоретичний аналіз наукових джерел; інструментальні методи збору даних під час роботи обприскувача; методи геоінформаційного аналізу та цифрової обробки просторових даних; статистичний аналіз варіабельності параметрів; візуалізацію даних у вигляді цифрових карт та діаграм.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Робота викладена на 50 сторінках машинописного тексту, містить 1 таблицю, 9 рисунків та 25 джерел у списку літератури.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин

Оприскувачі є ключовими засобами механізації в аграрному виробництві, що використовуються для внесення різноманітних хімічних препаратів — пестицидів, гербіцидів, фунгіцидів, а також рідких і рідко-сухих добрив на посівні площі. Їх продуктивність і надійність визначають якість захисту культур від шкідливих організмів і рівень забезпечення рослин необхідними поживними елементами. Виконання встановлених агротехнічних вимог має вирішальне значення для ефективної роботи обприскувальної техніки, досягнення запланованих агрономічних результатів і одночасного зниження ризику негативного впливу на навколишнє середовище. До таких вимог належать конструктивні характеристики машин, точність дозування та розподілу робочої рідини, екологічна безпечність, зручність технічного обслуговування й експлуатації тощо.

Однією з найважливіших агротехнічних умов ефективної роботи обприскувачів є забезпечення високої точності внесення хімічних препаратів. Машина повинна рівномірно розподіляти задану норму робочого розчину по всій площі обробітку, незалежно від рельєфу чи погодних факторів. Це вимагає точного регулювання тиску подачі, розміру крапель і швидкості потоку робочої рідини. Особливу увагу слід приділяти вибору форсунок, адже різні культури, погодні умови й типи обробки вимагають індивідуального підбору параметрів розпилення. Наприклад, дрібнодисперсні краплі доцільно використовувати для інсектицидів, коли потрібно впливати на дрібних шкідників, проте вони легко зносяться вітром. Натомість крупні краплі ефективніші при внесенні гербіцидів, оскільки краще осідають на поверхні бур'янів і зменшують ризик знесення препарату.

Висока точність обприскування дозволяє забезпечити надійний контроль над шкідниками, хворобами та бур'янами, скорочуючи при цьому кількість використаних хімікатів і знижуючи навантаження на екосистему.

Для досягнення цього необхідно дотримуватися комплексу техніко-агротехнологічних вимог, які охоплюють правильний вибір обладнання, оптимальні параметри роботи, екологічні умови обробки та своєчасність проведення операцій. Таке дотримання є запорукою максимальної ефективності, економічності використання препаратів і збереження довкілля.

Вибір типу обприскувальної техніки є базовим чинником точного внесення. Різновиди машин — штангові, вентиляторні або авіаційні обприскувачі — підбираються з урахуванням площі поля, виду культури, густоти насаджень і характеру застосовуваних речовин. Форсунки визначають ступінь подрібнення рідини й форму факела розпилення, що безпосередньо впливає на рівномірність покриття поверхні рослин. Необхідно підбирати насадки, сумісні з конкретним препаратом і встановленою нормою витрати. Важливим елементом є також точне калібрування обладнання, яке гарантує відповідність фактичної подачі розчину заданим параметрам, що унеможливорює надлишкове або недостатнє внесення хімічних речовин.

Окрім правильного вибору обладнання, надзвичайно важливо здійснювати постійний і точний контроль робочих параметрів, адже саме це забезпечує досягнення максимальної точності розпилення. Такі показники, як тиск розпилення, інтенсивність подачі рідини та швидкість руху машини, повинні бути узгоджені між собою, щоб забезпечити стабільну норму внесення препаратів. Підвищення тиску сприяє утворенню дрібніших краплин, які рівномірніше покривають поверхню рослин, однак водночас зростає ймовірність їхнього зносу повітряними потоками. Натомість зниження тиску формує більші краплі, що зменшує ризик дрейфу, але може призвести до неповного покриття цільової поверхні. Не менш важливою є швидкість руху обприскувача: занадто швидке пересування спричиняє нерівномірне нанесення робочої рідини, тоді як надмірно повільний темп викликає перевитрату хімікатів і затримує виконання польових робіт.

Ключову роль у результативності розпилення відіграють також зовнішні умови, зокрема погодні фактори. Швидкість і напрямок вітру, температура

повітря та рівень вологості безпосередньо впливають на рух і випаровування крапель після їх виходу з форсунок. Сильні пориви вітру можуть переносити аерозоль за межі оброблюваної ділянки, що спричиняє втрату діючої речовини та шкодить сусіднім посівам або природним біотопам. Високі температури в поєднанні з низькою вологістю повітря сприяють швидкому висиханню крапель, унаслідок чого менша кількість препарату досягає мети. Щоб мінімізувати подібні втрати, рекомендується проводити обприскування за помірного вітру, у прохолодніші години доби — переважно на світанку або під вечір, коли вологість підвищена.

Не менш важливим аспектом є правильне визначення часу проведення обприскування, адже саме від цього залежить ефективність обробки культур. Різні рослини й бур'яни проходять певні фази розвитку, і потрапляння в потрібну стадію забезпечує максимальну результативність дії препаратів. Так, гербіциди дають найкращий ефект, коли бур'яни ще молоді й активно ростуть, тоді як фунгіциди слід застосовувати заздалегідь, до прояву симптомів захворювань. Несвоєчасне обприскування може істотно знизити ефективність засобу, спричинити повторні обробки, підвищити витрати та збільшити навантаження на екосистему.

Сучасний розвиток агротехнологій значно розширив можливості точного землеробства. Використання систем супутникової навігації GPS, автоматичних контролерів дозування та цифрових карт полів дозволяє аграріям здійснювати високоточне внесення препаратів. Технології змінної норми внесення (VRT) забезпечують адаптацію дозування в режимі реального часу залежно від неоднорідності ґрунтів, стану посівів і рівня ураження шкідниками. Такий підхід дає змогу знизити витрати пестицидів, зменшити негативний екологічний вплив і водночас підвищити продуктивність культур.

Отже, вимоги до точності обприскування є комплексними, оскільки поєднують технічні, агротехнологічні та екологічні аспекти. Гармонійне поєднання правильно підбраного обладнання, стабільного контролю робочих режимів, урахування кліматичних умов і своєчасного проведення операцій є

запорукою якісного розпилення. Впровадження інноваційних цифрових рішень і автоматизованих систем керування ще більше підвищує ефективність процесу, допомагаючи сільгоспвиробникам працювати раціонально, зберігаючи довкілля та забезпечуючи стабільні врожаї. Дотримання цих принципів робить сучасне обприскування невід'ємним елементом сталого сільського господарства, де ефективність тісно поєднана з екологічною відповідальністю.

Норма витрати робочої рідини обприскувачем має узгоджуватися з агрономічними вимогами конкретної культури. Сучасні моделі цього обладнання оснащуються системами контролю тиску та регуляторами подачі потоку, що дозволяє точно налаштувати кількість пестицидів або добрив, які розподіляються на визначену площу поля. Така можливість адаптації гарантує, що рослини отримують оптимальну дозу препаратів, запобігаючи як дефіциту, який спричиняє неефективну боротьбу зі шкідниками чи бур'янами, так і передозуванню, котре може викликати пошкодження посівів, марні втрати хімікатів та забруднення природного середовища. Тому ретельне калібрування системи перед кожним виходом у поле має вирішальне значення для збереження стабільних норм внесення.

Ще однією невід'ємною вимогою агротехнічного характеру є продуктивність та надійність обприскувача за різних умов роботи. Машина повинна ефективно функціонувати на схилах, у місцевостях із неоднорідним рельєфом, за різної висоти культур та густоти стояння рослин. Навісні й самохідні обприскувачі мають забезпечувати достатній кліренс, щоб уникнути контакту з посівами та запобігти механічним пошкодженням. Водночас конструкція агрегату повинна бути продумана для зручного маневрування на обмежених ділянках, вузьких міжряддях і нерівних поверхнях. Штангові системи мають відзначатися міцністю, а механізми регулювання висоти — забезпечувати постійний кут розпилення та стабільну відстань до верхівки культури, що гарантує рівномірне покриття робочим розчином.

Не менш важливою є екологічна безпечність роботи обприскувача, яка належить до ключових агротехнічних аспектів. Сучасне обладнання проектується з урахуванням технологій мінімізації дрейфу крапель, щоб обмежити випадкове перенесення препаратів на прилеглі території. Це особливо важливо для запобігання шкоди корисним комахам, забрудненню водойм і ризикам для здоров'я людей. Застосування спеціальних анодрифових форсунок, захисних екранів та автоматичних систем регулювання висоти штанги суттєво зменшує знесення. Додатково інтеграція технологій точного землеробства на основі GPS-навігації забезпечує внесення препаратів відповідно до конкретних ділянок поля, підвищуючи ефективність використання ресурсів і знижуючи негативний вплив на екосистему.

До переліку додаткових агротехнічних вимог належать простота експлуатації та обслуговування машин. Оператори повинні мати можливість без труднощів налаштовувати, очищати й ремонтувати обладнання, забезпечуючи його довговічність і стабільну роботу. Такі елементи, як швидкознімні форсунки, електронні панелі управління чи системи автоматичного калібрування, істотно полегшують роботу, скорочують час простою та підтримують стабільну продуктивність. Вбудовані датчики контролюють основні параметри — тиск, швидкість руху й подачу робочої рідини, що дозволяє в режимі реального часу коригувати процес розпилення безпосередньо під час польових робіт.

Крім технічних характеристик, велике значення мають питання безпеки та відповідності чинним нормативам. Конструкція обприскувачів повинна забезпечувати захист оператора та навколишнього середовища. Використання закритих кабін у самохідних моделях, систем аварійного скидання тиску та матеріалів, стійких до агрохімікатів, сприяє безпечній експлуатації й запобігає контакту людини з токсичними речовинами. Дотримання вимог національного й міжнародного законодавства у сфері застосування пестицидів гарантує законність і екологічність роботи техніки, а також охорону здоров'я працівників та природних екосистем.

У підсумку слід зазначити, що агротехнічні критерії, яким має відповідати обприскувальне обладнання, є основою для формування ефективних, результативних і сталих технологій землеробства. Вони охоплюють точність дозування, здатність адаптуватися до змінних умов поля, екологічну надійність, ергономічність конструкції та відповідність нормам безпеки. Виконання цих вимог дозволяє агровиробникам підвищувати ефективність захисту культур, оптимізувати витрати засобів захисту та зменшувати негативний екологічний вплив. Подальший розвиток високих технологій — GPS-систем навігації, автоматизованих контролерів і цифрового моніторингу — відкриває нові можливості для вдосконалення точності та функціональності обприскувачів, роблячи їх невід’ємною частиною сучасного розумного землеробства.

1.2 Фактори, що впливають на якість обприскування

Рівень якості процесу обприскування у сфері сільського господарства, промислового виробництва чи дезінсекції визначає загальну ефективність, результативність і безпечність проведених робіт. На формування якісного розпилення впливає сукупність чинників, серед яких ключовими є фізико-хімічні властивості робочої рідини, конструкційні особливості обладнання, параметри зовнішнього середовища та кваліфікація оператора. Глибоке розуміння цих взаємозалежностей дозволяє досягти високої точності застосування речовин, зменшити обсяги втрат і знизити ризики негативного впливу на довкілля.

Хімічна структура, рівень в’язкості та концентрація робочого розчину мають визначальний вплив на ступінь якості розпилення. Суміші з підвищеною в’язкістю складніше розділяються на дрібні частки, що спричиняє формування більших крапель і, відповідно, обмежує площу покриття. Для покращення властивостей розпилення до складу часто вводять поверхнево-активні речовини або ад’юванти, які знижують поверхневий натяг і сприяють рівномірному розподілу рідини на оброблюваній поверхні. Водночас

порушення технології змішування компонентів може викликати забивання форсунок, нерівномірне розпилення чи неоднорідність нанесення робочої суміші.

У сільському господарстві, системах охорони здоров'я або промислових технологічних процесах усвідомлення впливу властивостей рідини на результативність обприскування є ключовим для підвищення продуктивності, раціонального використання ресурсів та зменшення обсягів відходів.

В'язкість — це показник внутрішнього опору рідини до течії, який безпосередньо визначає утворення та розмір крапель під час розпилення. Високов'язкі речовини зазвичай формують великі краплі, які повільно розпадаються на дрібні частинки, що спричиняє нерівномірне нанесення і знижує ефективність покриття. У протилежному випадку, при низькій в'язкості, рідина легко подрібнюється, утворюючи дрібнодисперсний туман, який забезпечує більш рівномірне покриття. Проте надмірно низька в'язкість може призвести до знесення крапель потоками повітря, що знижує точність обробки. Тому оптимальний рівень в'язкості є критичним для підтримання балансу між якістю покриття та контролем дрейфу розчину.

Ще одним вагомим параметром є поверхневий натяг, який характеризує сили когезії на межі поділу фаз. Речовини з високим поверхневим натягом формують більш округлі краплі, що обмежує їх розтікання та знижує рівномірність нанесення. У результаті оброблена поверхня може мати фрагментарне покриття з окремих краплин. Натомість рідини з низьким поверхневим натягом здатні швидко розтікатися при ударі, утворюючи суцільний рівномірний шар. У технологіях аграрного обприскування часто застосовують поверхнево-активні речовини для зменшення поверхневого натягу, покращення змочуваності листової поверхні та підвищення ефективності потрапляння діючої речовини на цільові об'єкти — шкідники, бур'яни чи хвороботворні організми.

Не менш суттєвим чинником є щільність рідини, яка визначає імпульс, енергію руху та проникну здатність крапель. Більш щільні розчини утворюють

важкі краплі, здатні долати опір повітря і проникати крізь густі рослинні покриви чи щільні шари матеріалу. Однак надмірна маса таких крапель може призвести до швидкого осідання, що викликає нерівномірність нанесення або надмірне насичення певних ділянок. Рідини з меншою щільністю, навпаки, створюють легкі краплі, які довше утримуються в повітрі, але під дією вітру можуть відхилятися від заданої траєкторії, що зменшує точність потрапляння на цільову поверхню.

Летючість, тобто здатність рідкої речовини переходити в газоподібний стан, має особливе значення в тих ситуаціях, коли потрібно, щоб рідина залишалася на оброблюваній поверхні достатньо довго для прояву своєї дії. Рідини з високою летючістю швидко зникають унаслідок інтенсивного випаровування, що знижує результативність таких спреїв, як антисептики, інсектициди чи інші засоби захисної дії. Випаровування під час процесу розпилення здатне змінювати розмір окремих крапель, через що покриття стає нерівномірним, а самі краплі можуть відхилятися від цілі. Для зменшення цих негативних наслідків іноді до складу розчину вводять спеціальні речовини, які сповільнюють випаровування, що сприяє підвищенню стабільності та ефективності розпилення, особливо за умов високих температур чи низької вологості.

Взаємний вплив різних фізико-хімічних властивостей рідини робить динаміку процесу розпилення ще складнішою. Так, суміш із великою в'язкістю та значним поверхневим натягом часто утворює нерівномірні, погано розподілені бризки з великими краплями. У той же час зміна лише однієї характеристики, наприклад, додавання поверхнево-активних речовин для зменшення натягу, може непередбачено вплинути на інші параметри — в'язкість або інтенсивність випаровування. Тому формування складу для ефективного розпилення потребує ретельного підбору компонентів і врахування їх взаємодії.

Підсумовуючи, можна зазначити, що такі параметри, як в'язкість, густина, поверхневий натяг і летючість, мають вирішальне значення для

визначення характеристик розпилення. Кожен із цих чинників впливає на формування розміру крапель, рівномірність їх розподілу й повноту покриття, що безпосередньо визначає кінцеву ефективність процесу. Глибоке розуміння взаємозв'язку між властивостями рідини та якістю розпилення дає можливість удосконалювати технології обприскування, досягаючи більш точного нанесення робочих розчинів, зменшуючи втрати й підвищуючи продуктивність.

Сучасні технології розпилення мають важливе значення для аграрного виробництва, промислових галузей і систем екологічного управління. Одним із головних чинників, що визначає якість утвореного спрею, є діаметр крапель. Цей показник описує розмір окремих частинок рідини, які розсіюються через сопло під час роботи форсунки. Він безпосередньо впливає на ефективність покриття, ступінь осадження, ймовірність дрейфу, швидкість випаровування та глибину проникнення у цільову поверхню. Розуміння взаємозв'язку між розміром краплі й цими параметрами є ключовим для вдосконалення методів розпилення, що дозволяє отримати потрібний результат із мінімальними втратами, меншим впливом на довкілля та нижчими витратами.

Однією з визначальних характеристик ефективного розпилення є якість покриття. Зменшення розміру крапель збільшує їх кількість на одиницю площі, завдяки чому поверхня обробляється рівномірніше. Це особливо важливо для сільського господарства, де рівномірне нанесення пестицидів чи рідких добрив забезпечує стійкий розвиток культур і їхній захист від шкідників. Дрібніші краплі мають більшу ймовірність досягти важкодоступних зон, наприклад нижніх сторін листків, які часто залишаються вразливими до ураження. Водночас надто дрібні частинки рідини можуть швидше випаровуватися, дрейфувати під дією повітряних потоків або не проникати достатньо глибоко, що знижує загальну ефективність.

Дрейф спрею є однією з найчастіших проблем, пов'язаних із використанням дрібних крапель. Зменшення їх розміру підсилює вплив

вітрових потоків на траєкторію польоту, що підвищує ризик відхилення крапель від запланованої зони нанесення. Такі відхилення можуть стати причиною потрапляння препарату на сусідні посіви, у водойми або навіть у житлові райони, створюючи небезпеку для екосистем і здоров'я людей. Саме тому нормативні вимоги у більшості країн передбачають застосування розпилювачів, які утворюють більші краплі у чутливих до забруднення зонах. Визначальними чинниками, що дають змогу контролювати розмір крапель і зменшити дрейф без втрати ефективності, є конструктивні особливості форсунки та тиск робочої рідини.

Окрім дрейфу, на швидкість випаровування істотно впливає й розмір краплі. Дрібніші частинки рідини мають вищу пропорцію площі поверхні до об'єму, що сприяє інтенсивнішому випаровуванню, особливо в умовах підвищеної температури або сильного вітру. Прискорене випаровування зменшує ефективність обробки, адже краплі можуть зникнути ще до досягнення цільової зони, роблячи процес нанесення речовини марним. Щоб уникнути таких втрат, агровиробники застосовують антивипаровувальні добавки або змінюють параметри обприскування, зокрема проводять роботи у прохолодніші години доби, коли температура нижча, а вологість вища.

У той же час збільшений діаметр крапель має власні переваги, пов'язані з кращим проникненням та зниженням ризику дрейфу. Під час промислового чи польового обприскування особливо важливо, щоб рідина могла досягати нижніх шарів рослин або проникати крізь ґрунтову поверхню. Масивніші краплі володіють більшою кінетичною енергією, завдяки чому вони здатні подолати опір щільного листя й досягти глибших зон у рослинному покриві. Така властивість є критичною у випадках боротьби зі шкідниками, що переховуються під поверхнею або у внутрішніх частинах стебел. Проте надто великі краплі нерідко створюють нерівномірне покриття — на одиницю площі потрапляє менше частинок, що підвищує імовірність появи необроблених ділянок.

Крім того, діаметр крапель визначає їхню здатність утримуватись на різних типах поверхонь. Гладенькі, воскові або шорсткі структури іноді відштовхують великі краплі, викликаючи їх скочування чи розбризкування, що призводить до втрати препарату. У таких ситуаціях дрібнодисперсні частинки можуть забезпечити кращу адгезію. Водночас занадто малі краплі здатні залишатися завислими в повітрі, зменшуючи ефективність осадження на рослинах. Тому оптимізація розміру краплі є ключовим завданням для досягнення рівноваги між прилипанням, мінімізацією втрат і запобіганням надмірному дрейфу.

Отже, розмір частинок під час розпилення суттєво впливає на якість нанесення, охоплення поверхні, швидкість випаровування, ступінь проникнення та стійкість до дрейфу. Менші краплі забезпечують більш рівномірне покриття, але водночас є схильними до втрат через випаровування та відхилення потоком повітря. Натомість крупні частинки краще проникають у рослинну масу, зменшують ризик знесення, однак часто спричиняють неоднорідність розподілу. Вибір оптимального розміру визначається конкретними умовами застосування, типом цільової поверхні й навколишнім середовищем. Точне регулювання параметрів форсунок, тиску та форми факела дозволяє агрономам досягти потрібного балансу між ефективністю обприскування та екологічною безпекою. Правильне налаштування цих чинників є запорукою раціонального, стійкого й економічно виправданого використання техніки розпилення у сільському господарстві та промисловості.

Вода відіграє провідну роль у більшості сільськогосподарських і технічних процесів — від внесення пестицидів і гербіцидів до нанесення покриттів. Проте її фізико-хімічні характеристики, особливо показник жорсткості, можуть істотно впливати на ефективність і стабільність робочих розчинів. Під жорсткістю води розуміють вміст розчинених мінеральних речовин, головним чином іонів кальцію (Ca^{2+}) та магнію (Mg^{2+}). Саме ці компоненти здатні змінювати властивості робочих сумішей, впливаючи на

хімічну стабільність і здатність до перенесення діючих речовин. Розуміння механізму цього впливу є необхідним для підвищення результативності обприскування та отримання прогнозованих результатів у полі.

Коли для приготування робочих розчинів використовується вода з високою жорсткістю, мінерали вступають у реакцію з активними компонентами добрив, інсектицидів або гербіцидів. Через це можуть утворюватися малорозчинні сполуки, які осаджуються, зменшуючи фактичну концентрацію активної речовини у суміші. Як наслідок, знижується ефективність препарату. Особливо чутливими до цього явища є гербіциди на основі гліфосату, адже кальцієві йони утворюють з ним стійкі солі, що перешкоджають проникненню діючої речовини в тканини рослин.

Окрім хімічної взаємодії, твердість води здатна впливати також на фізичні характеристики робочих розчинів, що використовуються під час обприскування. Вода з високим вмістом солей жорсткості підвищує поверхневий натяг рідини, унаслідок чого формуються краплі більшого розміру під час розпилення. Такі збільшені краплі часто відскакують від листової поверхні замість того, щоб утримуватися на ній, що знижує рівень покриття та проникнення діючих речовин. Подібна неефективність обробки нерідко зумовлює слабкий контроль над бур'янами або шкідниками, спричиняючи необхідність підвищення концентрації препаратів або повторного проведення обприскувань. У результаті цього зростають витрати господарства та збільшується антропогенний тиск на навколишнє середовище.

Системи розпилювального обладнання також чутливі до впливу жорсткої води. Високий вміст розчинених мінералів може спричинити утворення відкладень і закупорювання отворів форсунок, а також накопичення накипу на внутрішніх деталях. Через це порушується рівномірність факела розпилення, що веде до нерівного нанесення робочих сумішей. У практиці польових робіт це проявляється тим, що частина ділянки отримує менше препарату, тоді як інша зазнає надмірної концентрації, підвищуючи ризик ушкодження культурних рослин. З плином часу мінеральні відкладення

провокують корозію деталей, скорочують строк служби обприскувача та потребують частішого технічного обслуговування чи заміни окремих вузлів.

Для зменшення негативного впливу жорсткої води застосовують різні способи. Поширеним рішенням є використання спеціальних кондиціонерів або ад'ювантів, здатних нейтралізувати дію іонів кальцію й магнію. Приміром, сульфат амонію додають до робочих розчинів гербіцидів, щоб зв'язати іони кальцію та не допустити їх реакції з діючими речовинами. У деяких виробничих процесах також практикується використання пом'якшеної або деіонізованої води для приготування сумішей, що повністю усуває проблему твердості. Регулярне очищення та профілактика обприскувального обладнання, включно з видаленням накипу, допомагають підтримувати його продуктивність і продовжують термін експлуатації системи.

Підсумовуючи, твердість води має суттєвий вплив на якість і результативність процесу розпилення. Надмірна кількість мінеральних солей у воді може зменшити активність хімічних речовин, погіршити рівномірність покриття і викликати технічні несправності обладнання. Усвідомлення цих процесів та впровадження відповідних профілактичних заходів є ключовими для підвищення ефективності обприскування. Незалежно від сфери застосування — сільське господарство, боротьба зі шкідниками чи промислове виробництво — контроль за якістю води гарантує стабільну дію препаратів, економію ресурсів і зменшення негативного екологічного впливу.

Окреме значення має вибір типу розпилювальної насадки, який визначає форму струменя, розмір крапель і ступінь покриття поверхні. Так, форсунки з плоским віяловим розпиленням формують вузьку смугу, що підходить для точкових обробок, тоді як конусні насадки забезпечують ширший і рівномірніший розподіл рідини. Зношення або пошкодження форсунок призводить до утворення крапель різного діаметра й появи стікання, що помітно знижує результативність нанесення. Тому правильний добір насадки з урахуванням конкретних умов і своєчасне її технічне обслуговування є обов'язковими передумовами якісного розпилення.

Тиск подачі робочої рідини також суттєво впливає на розмір крапель і рівень покриття. Підвищення тиску сприяє утворенню дрібніших крапель, які краще розподіляються, але водночас підвищується ризик знесення препарату вітром. Зниження тиску, навпаки, формує більші краплі, менш схильні до дрейфу, проте вони можуть не забезпечити достатнього охоплення поверхні. Оптимальний баланс між тиском, швидкістю потоку та типом форсунки гарантує рівномірне розпилення без надмірного стікання або втрат у повітрі.

Фактори зовнішнього середовища, зокрема швидкість вітру, рівень температури та показники вологості, істотно впливають на якість процесу розпилення робочої рідини. Пориви вітру можуть спричинити дрейф крапель, що зумовлює їх випадкове осадження поза межами запланованої ділянки та сприяє забрудненню довкілля. Підвищені температури у поєднанні з низькою вологістю призводять до інтенсивнішого випаровування крапель ще до досягнення ними цілі, що суттєво зменшує їх ефективність. Виконання обприскування у безвітряні періоди або в ранкові та вечірні години допомагає зменшити негативний вплив таких факторів.

Досвідченість і професійні навички оператора мають вирішальне значення для отримання якісного результату під час розпилення. Працівник повинен регулярно проводити калібрування обприскувального обладнання, щоб упевнитися, що воно подає потрібну кількість рідини на певну площу. Неправильне налаштування може призвести як до надлишкового внесення препаратів, так і до їх нестачі, що, у свою чергу, спричиняє неефективність обробки або навіть шкоду для посівів. Тому важливими є відповідна підготовка персоналу, знання правил безпечного змішування хімічних компонентів і правильне користування технікою, адже все це безпосередньо впливає на якість розпилення.

Швидкість руху агрегату під час обприскування визначає рівномірність розподілу рідини. Якщо техніка рухається занадто швидко, покриття стає нерівномірним, а надмірно повільний хід може спричинити локальне перевищення норми внесення. Аналогічно, висота розташування штанги

впливає на конфігурацію факела розпилення. Підтримання оптимальної відстані між форсунками та оброблюваною поверхнею забезпечує правильне перекриття смуг розпилення, запобігаючи утворенню пропусків або зон надмірної концентрації препарату. Висота штанги, тобто вертикальний проміжок між розпилювальним соплом і цільовою поверхнею, безпосередньо впливає на рівномірність покриття, розподіл крапель за розміром, ризик дрейфу та загальну якість нанесення. Знання та дотримання оптимальних параметрів висоти є ключовими для досягнення ефективного захисту культур і внесення поживних речовин при мінімальному впливі на навколишнє середовище.

Коли штанга налаштована відповідно до рекомендацій, форсунки розпилюють рідину під правильним кутом і тиском, утворюючи рівномірне покриття цільової ділянки. Зменшена висота подачі скорочує шлях, який проходять краплі, тим самим знижуючи вплив зовнішніх чинників, зокрема вітру та випаровування. Це збільшує ймовірність досягнення запланованої дози цільової поверхні — листя або ґрунту, — що забезпечує дію препарату відповідно до його призначення. Якщо ж штанга встановлена занадто високо, краплі мають більшу схильність до розсіювання, унаслідок чого знижується рівномірність нанесення і зменшується ефективність обробки.

Одним із найсерйозніших наслідків неправильно підібраної висоти штанги є дрейф крапель, тобто небажане їх переміщення за межі ділянки обробки. Підвищене положення штанги посилює цей ефект, особливо за наявності вітру, адже краплі довше перебувають у повітрі та сильніше піддаються дії потоків. Найдрібніші частинки найчастіше відхиляються від цілі, що може стати причиною забруднення довкілля, пошкодження сусідніх посівів або зниження ефективності дії засобу захисту. Зменшення висоти штанги допомагає запобігти цьому явищу, утримуючи краплі ближче до цільової зони та підвищуючи точність застосування препарату.

Рівномірність нанесення робочої рідини є одним із ключових показників ефективності обприскування, на який істотно впливає висота розташування

штанги. Форсунки розроблені так, щоб їхні конуси розпилення частково перекривалися, утворюючи однорідне покриття поверхні поля. Коли штанга встановлена надто низько, зони перекриття зменшуються, через що певні ділянки отримують недостатню кількість препарату. Якщо ж стріла розташована занадто високо, то навпаки — ділянки перекриття стають надмірними, що призводить до надлишкового внесення засобу. Оптимальна висота дозволяє зберігати гармонійне співвідношення між перекриттям факелів розпилу та рівномірністю нанесення, що є визначальним для максимальної продуктивності рослинництва й скорочення витрат на хімікати.

Параметр висоти штанги тісно пов'язаний із вибором типу розпилювачів і режимом тиску. Так, форсунки віялового типу або насадки зі зменшеним дрейфом чутливі до зміни висоти, оскільки геометрія факелу розпилення та розмір крапель розраховані для конкретної відстані від оброблюваної поверхні. Використання невідповідної висоти може порушити форму факелу, погіршити структуру крапель і знизити якість розподілу препарату. До того ж підняття штанги вище оптимального рівня часто змушує збільшувати тиск у системі, щоб зберегти покриття, але це призводить до формування дрібніших крапель, які легше відносить вітром. Така ситуація наочно підтверджує тісний взаємозв'язок між висотою штанги, типом насадки, тиском і стабільністю розпилення.

У системах точного землеробства впроваджуються інноваційні технології, зокрема автоматизовані механізми регулювання висоти штанги, які дозволяють утримувати її в оптимальному положенні під час руху по полю. Такі пристрої оснащені сенсорами, що безперервно відстежують нерівності рельєфу та оперативно коригують положення штанги в реальному часі, забезпечуючи стабільність схеми розпилення незалежно від зміни висоти поверхні. Використання подібних систем мінімізує ризик людського чинника, підвищує точність обприскування та сприяє впровадженню екологічно безпечних і сталих агротехнологій, одночасно оптимізуючи витрати на засоби захисту рослин.

Отже, висота розташування штанги має визначальний вплив на ефективність процесу обприскування, оскільки вона формує рівномірність покриття, впливає на розмір крапель і визначає ступінь можливого знесення рідини. Дотримання рекомендованої висоти сприяє раціональному використанню хімічних препаратів, знижує їх перевитрати й водночас зменшує потенційний негативний вплив на довкілля. Під час налаштування обладнання агропромислам слід враховувати не лише висоту штанги, а й характеристики форсунок, рівень тиску, погодні умови та стан рослинного покриву, щоб досягти максимальної ефективності технологічного процесу.

Завдяки сучасним системам автоматичного керування підтримка правильної висоти стає простішою, що забезпечує стабільне обприскування, підвищення урожайності та більш екологічно орієнтоване землеробство.

У підсумку можна зазначити, що на кінцеву якість розпилення впливає цілий комплекс взаємопов'язаних чинників. Досягнення найкращих результатів можливе лише за умов грамотного підбору технічних параметрів, систематичного технічного обслуговування обприскувача, контролю навколишніх умов і професійної підготовки оператора. Раціональне керування цими параметрами дозволяє підвищити точність обприскування, скоротити втрати препаратів і знизити ризики для екосистем, забезпечуючи стабільну якість обробки посівів і бажані агрономічні результати.

1.3 Використання технологій точного землеробства для операцій обприскування

Використання агрохімічних засобів захисту рослин залишається ключовим елементом сучасного землеробства, адже саме вони допомагають мінімізувати втрати врожаю або пошкодження посівів, спричинені дією грибкових хвороб, комах-шкідників і бур'янів. Упродовж останніх років спостерігається стрімке зростання впровадження технологій точного землеробства, зокрема систем автоматичного керування секціями штанги, що працюють за картами покриття. Такі інновації набули особливого поширення

при використанні самохідних обприскувачів у сільському господарстві. Основне призначення цих технологічних систем полягає у зменшенні надлишкового застосування пестицидів шляхом автоматичного вимкнення окремих секцій штанги (у поєднанні з GPS-навігацією) у моменти, коли обприскувач проходить над уже обробленими ділянками або виходить за межі поля.

Було здійснено низку експериментальних досліджень, спрямованих на визначення можливого зменшення площі покриття на полях складної форми за допомогою автоматизованої системи контролю секцій із просторовою роздільною здатністю близько 1,0 м [1 – 4]. Отримані результати продемонстрували, що площа обробки зменшилась у середньому на 16% у порівнянні з ситуацією, коли вся штанга функціонувала як єдина секція. В іншому експерименті, проведеному на полях різної конфігурації та площі, застосування системи автоматичного керування секціями з роздільною здатністю близько 6,0 м дозволило знизити загальну зону покриття на 6,2% у порівнянні з ручним управлінням.

Попри підтвердженій ефект щодо зменшення надмірного розпилення пестицидів, такі системи одночасно можуть впливати на норми внесення у секціях штанги, що залишаються активними. Дослідження показали, що під час вимкнення окремих секцій спостерігається підвищення тиску в тих частинах системи, які продовжують працювати. Це призводить до того, що у цих секціях фіксуються підвищені норми внесення, адже контролер подачі намагається компенсувати зміну потоку, викликану відключенням частини системи. Крім того, встановлено, що при повторному вмиканні контрольних секцій виникає певна затримка часу, пов'язана зі спробою контролера норм розпилення відновити оптимальний робочий тиск для досягнення запланованої інтенсивності внесення.

Автори робіт [3 – 5] провели оцінку ефективності різних контролерів норми розпилення і з'ясували, що більшість із них здатні досягати заданих параметрів розпилення протягом приблизно 5 секунд після зміни умов роботи,

таких як закриття клапанів штанги або варіації швидкості руху. Водночас окремі моделі контролерів потребують більш тривалого часу для стабілізації показників. Ще одним чинником, який може впливати на точність дозування під час обприскування, є кількість поворотів, необхідних для обробки поля певної форми. Сучасний аналіз траєкторії руху обприскувача продемонстрував, що машина зі штангою завдовжки 24,8 м здатна як перевищувати, так і занижувати кількість пестицидів, нанесених на певні ділянки під час виконання повороту. За даними одного з досліджень, на полі площею 35 га близько 23% території можуть отримати перевищену дозу обробки понад 10% від цільової через неоднорідність покриття при розворотах обприскувача. Хоча й було оцінено потенційні зони похибок, що виникають у процесі поворотів [7], подальша кількісна оцінка цих відхилень є необхідною для точнішого визначення їхнього масштабу та просторового розподілу в межах поля.

Дослідження показали, що надмірне використання окремих гербіцидів, наприклад гліфосату, може пригнічувати ріст рослин при післясходовому внесенні стійкої до гліфосату сої [8]. Натомість внесення гербіцидів у кількості нижче рекомендованої норми здатне зменшити врожайність через конкуренцію з бур'янами, що було зафіксовано на прикладі кукурудзи та сої.

У останні роки значну увагу привертає розробка технологій внесення пестицидів із регульованою швидкістю, які потенційно можуть зменшити помилки під час обприскування. Одним із таких методів є пряме впорскування хімічних препаратів, запропоноване як можливий підхід до зниження неточностей, пов'язаних зі зміною швидкості руху обприскувача.

Ще однією перспективною технологією є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка досліджується як метод для забезпечення змінної норми внесення [9 – 11]. Хоча нині розробляються системи керування обприскувачем, що використовують одну з цих технологій або їх поєднання, залишається багато

невирішених питань щодо розмірів помилок внесення пестицидів, що виникають у польових умовах.

Географічні інформаційні системи (ГІС) широко застосовуються для аналізу просторових даних, отриманих у ході сільськогосподарських польових операцій. Наприклад, Фултон та співавтори використали інструменти ГІС для моделювання розподілу сухих добрив із розкидачів, Джайлс і Дауні застосували ГІС разом із GPS-датчиками для створення карт контролю якості розпилення, а Лоуренс і Юл розробили ГІС-модель для оцінки варіацій внесення сухих добрив у полі. Усі ці приклади демонструють ефективність ГІС для аналізу та візуалізації даних щодо похибок норми внесення. Для подальшого вдосконалення технологій, таких як пряме впорскування або ШІМ, потрібні додаткові дані про вплив керування секціями обприскувача, реакції контролера норми розпилення та маневрів у полі на рівномірність внесення.

Отже, головною метою цього дослідження було оцінити ступінь варіацій норми внесення пестицидів, що може виникати під час роботи самохідного обприскувача з регулятором норми розпилення з компенсацією потоку. Конкретними завданнями були: (1) створення карт норми внесення пестицидів на основі даних про тиск у соплах, стан секцій штанги та GPS-координати руху обприскувача з використанням ГІС, та (2) кількісне визначення та опис даних норми внесення, що дозволило оцінити, як зміни швидкості, активація секцій штанги та поворотні маневри впливають на рівномірність обробки.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Налаштування форсунок та збір даних

Інформація була отримана з трьох полів сільськогосподарських підприємств у Сумській області. Ці господарства мають численні ділянки неправильної конфігурації, на багатьох із яких присутні водні перепони, зарослі травою. Виробник застосував систему автоматичного керування секціями штанги на основі картографічних даних, яка запобігала внесенню на непокриту площі та у межах трав'яних водних шляхів, одночасно мінімізуючи надмірне розпилення через перекриття штанг обприскувача. Кожне поле підлягало післясходовій обробці гліфосатом у період формування врожаю протягом літа 2025 року.

Для робіт використовувався самохідний обприскувач RoGator 1074 із штангою довжиною 30,48 м, оснащеною 60 форсунками, встановленими через кожні 51 см. Автоматизована система керування секціями включала консоль вторинного управління (*ZYNX X22, KE Technologies*) та 30-канальний електронний блок керування (*ECU Spray ECU 33 (KE Technologies)*).

Консоль і ECU забезпечували контроль 30 каналів для активації електромагнітних клапанів форсунок (*TeeJet, Capstan Ag Sys.*), підключених до корпусів форсунок. Для підтримки стабільного потоку через штангу система відстежувала витрату рідини за допомогою витратоміра та регулювала подачу до гідравлічного двигуна, що керував швидкістю насоса. Це здійснювалось через пропорційний гідравлічний клапан, здатний відкриватися або закриватися відповідно до змін швидкості руху або спрацювання секцій штанги.

Форсунки розподілялися між каналами керування наступним чином: форсунки 1–6 з лівого боку та 55 – 60 на правому кінці штанги мали окремі канали; форсунки 7 – 12 і 49 – 54 керувалися попарно; інші 36 внутрішніх форсунок штанги управлялися трійками (рис. 1). Ефективна ширина секцій

керування складала 51 см для окремих форсунок, 102 см для парних і 152 см для груп по три форсунки.

Консоль могла активувати контрольні секції кожні 0,2 секунди (частота 5 Гц). Крім того, вона виконувала функцію збору даних, фіксуючи географічні координати з частотою 1 Гц і збираючи дані до 5 разів на секунду, що узгоджувалося з активаціями секцій штанги, тривалість яких становила менше однієї секунди.

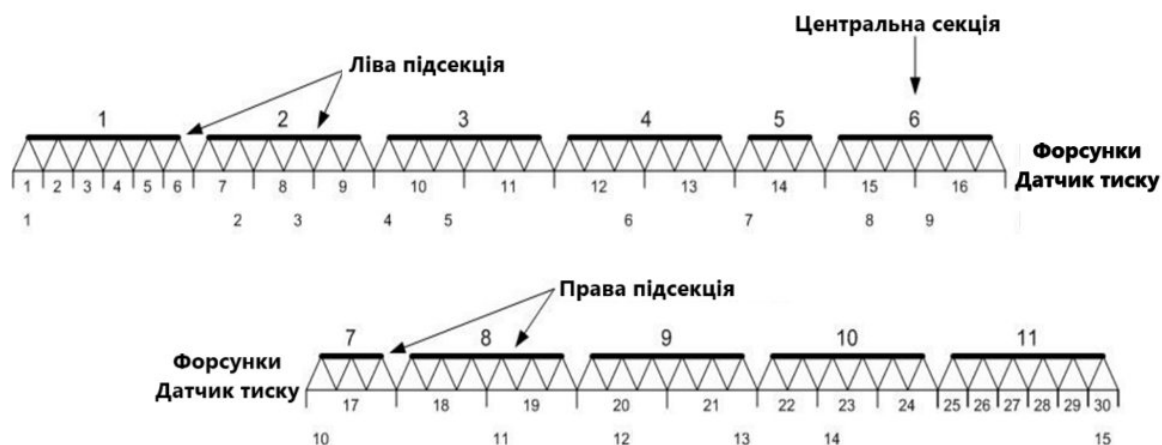


Рис. 1 - Підсекції штанги обприскувача (від 1 до 11), групи форсунок секцій автоматичного керування (від 1 до 30) і датчики тиску (від 1 до 15)

Опорні координати формувалися з частотою 5 Гц за допомогою кінематичного GPS-приймача в реальному часі (*RTK, StarFire 2, Deere & Company, Moline, 122.*) із заявленою точністю менше ніж 2,53 см (*Deere & Company, 2018*). Для кожної пари координат система керування також фіксувала часову мітку та стани каналів керування (увімкнено = 1, вимкнено = 0), представлені 30-бітним двійковим кодом. Консоль керування починала записувати дані, коли хоча б один канал був активним, і завершувала збереження інформації, коли всі канали були відключені. Зібрані дані зберігалися у текстовому файлі з розділенням за допомогою табуляції.

Датчики тиску (модель *1502 B84 EZ 100 PSI G, PC Piezotronic, Inc., Dewey, N.Y.*) були змонтовані на 15 форсунках, розташованих вздовж штанги обприскувача, з принаймні одним сенсором у кожній підсекції штанги (рис. 1). Сигнали від перетворювачів надходили до системи збору даних

(DAQ) для аналогово-цифрового перетворення (аналоговий модуль 9242, *National Instruments*, Остін, Техас), при цьому напруга з кожного датчика записувалася з частотою 10 Гц.

Для зчитування GPS-координат (рядок GGA) використовувався послідовний модуль (модуль послідовного введення 9855, *National Instruments*) разом із додатковим DGPS-приймачем (*Ag144, Trimble Navigation*). Напруга з датчиків тиску (14,5 мВ/кПа) була перетворена у величини тиску (кПа) і записана у текстовий файл за допомогою програми, створеної в LabVIEW, одночасно з часовими мітками DGPS, що реєструвалися на частоті 10 Гц. Для реалізації цих операцій система збору даних була підключена до зовнішнього персонального комп'ютера, окремо від консолі керування.

2.2 Аналіз даних

Стани активації секцій штанги та координати RTK GPS, отримані з консолі управління, були узгоджені з даними тиску, записаними системою збору інформації, шляхом зіставлення часових міток GPS обох наборів даних. Об'єднаний масив включав записи, що містили GPS-мітку часу, RTK GPS – координати у форматі NAD 1983 UTM, стан контрольної секції у вигляді 30-значного двійкового числа та показники тиску з усіх датчиків. Використовуючи методи, детально описані у [11], покриття кожної контрольної ділянки визначалося на основі послідовності GPS-координат із врахуванням радіуса повороту (R), кута обертання та пройденої відстані.

Для оцінки витрат рідини через сопла на основі показників датчика тиску були розроблені калібрувальні криві, спираючись на дані, надані виробником наконечників (*TeeJet TT11050, Spraying Systems, Wheaton*). Залежність витрати через сопло (л/с) від величини тиску (кПа) подана на основі інформації виробника (*Spraying Systems Co., 2019*) на рис. 2.

Рівняння калібрувальної кривої (із нульовим перетином) використовували для визначення витрати через кожне сопло, базуючись на показах найближчого датчика тиску в кожній контрольній секції. Хоча стандартні калібрувальні криві зазвичай будуються без перетину з початком координат (рис. 2), багато вимірювань показали тиск нижче 100 кПа. Тому для цієї області було прийнято рішення продовжити криву через точку початку координат для оцінки витру.

Далі норми внесення розраховували між послідовними GPS-координатами шляхом множення визначеної швидкості потоку сопла (л/с) на інтервал часу між точками, а потім поділу отриманого обсягу на площу покриття відповідної контрольної ділянки (га).

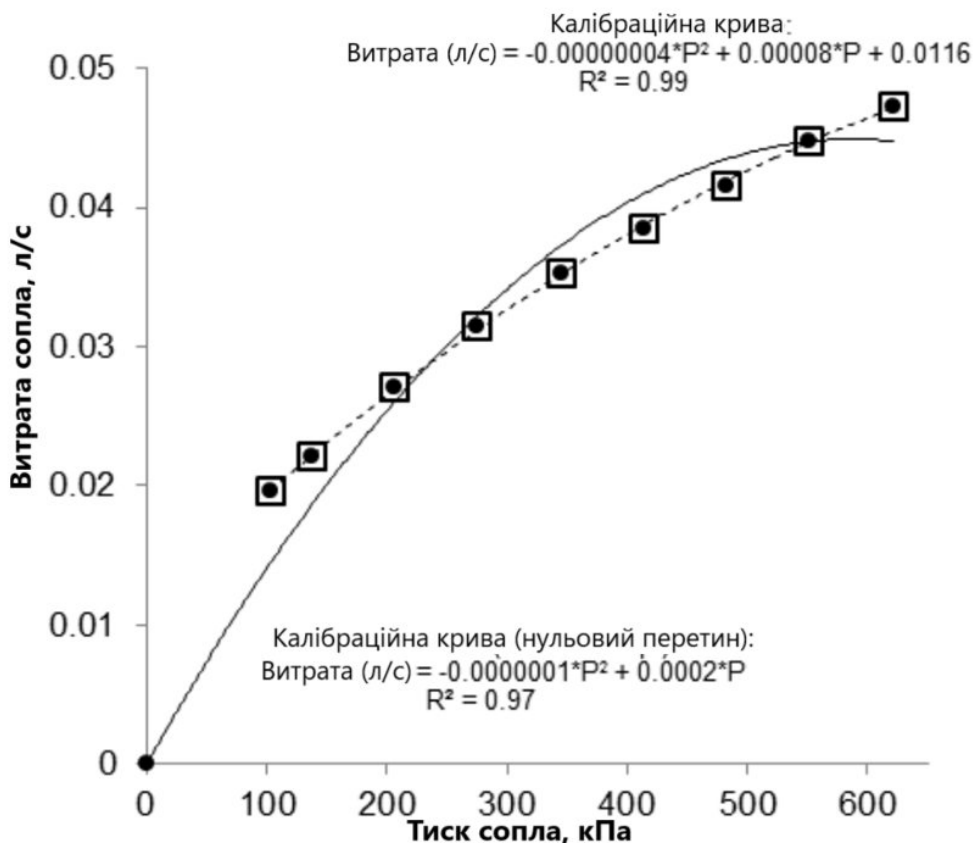


Рис. 2 - Калібрувальна крива для оцінки швидкості потоку сопла за даними датчика тиску сопла зі стандартною калібрувальною кривою (ненульове перетинання) за даними виробника

Розраховані норми внесення для кожної контрольної секції штанги були зафіксовані у літрах на гектар і нанесені на карту в ArcMap із відповідними

GPS-координатами секцій, застосовуючи методики, описані в [14], для створення карт розрахункових норм внесення. Отримані показники порівнювали з цільовою нормою 93,5 л/га, що дозволяло визначити ділянки поля з перевищенням або недоотриманням цього значення. Варто зазначити, що значення, що перевищували 1870 л/га (тобто у 20 разів більше цільової норми), були виключені з подальшого аналізу.

Норми, що перевищували 1870 л/га, зазвичай виникали у щільних поворотах із радіусом менше 15 м, і це пояснювалось тим, що розрахункова витрата через сопло ділиться на дуже малу площу покриття. У результаті для окремих контрольних ділянок значення норми внесення різко зростало, іноді понад 1870 л/га; проте подібні ситуації спостерігалися лише в обмежених частинах полів (переважно у полі 2 через більшу кількість поворотів порівняно з полями 1 та 4). Оскільки такі перевищення траплялися на незначних площах і не впливали істотно на загальний розподіл норм внесення по відсотку покриття, їх було виключено з аналізу.

Щоб оцінити вплив увімкнення секцій штанги, зміни швидкості обприскувача та маневрів на розрахункові норми внесення, були обчислені додаткові параметри на основі польових даних. Швидкість агрегату визначали як відстань між послідовними GPS-координатами, поділену на інтервал часу між відповідними мітками. Прискорення обприскувача оцінювали як зміну швидкості (розраховану для кожної точки GPS), поділену на різницю часових позначок.

Для кількісного визначення коливань норм по штанзі обприскувача стандартне відхилення обчислювали на основі розрахованих норм внесення для всіх контрольних секцій штанги, що включалися на кожній GPS-координаті. Далі розраховані норми та стандартне відхилення усереднювали по довжині штанги, щоб провести порівняння з іншими параметрами, згаданими раніше.

Щоб продемонструвати ефект регулювання норми розпилення на розрахункові норми внесення, для аналізу обрали чотири сценарії. Сценарії А і В відображали випадки уповільнення та прискорення руху обприскувача, з мінімальним або повністю відсутнім увімкненням секцій штанги. Сценарій С ілюстрував рух агрегату з постійною швидкістю при активних секціях штанги, тоді як сценарій D охоплював ділянки постійної швидкості руху з увімкненими секціями. Для кожного сценарію будували графіки швидкості обприскувача та середньої норми внесення штангою у залежності від часу, щоб наочно показати динаміку змін оцінених норм внесення.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Розподіл норми внесення та картографування

На рисунку 3 представлені коливання оцінюваних норм внесення для полів 1, 2 та 4, причому дані були нанесені окремо для кожної керованої секції обприскувальної штанги. Інформація, зображена на цьому рисунку, демонструє ті ділянки, де на обчислені норми використання пестицидів могли впливати різні фактори, зокрема реакція регулятора подачі на включення або відключення конкретної секції штанги, зміни швидкості пересування агрегату та маневри під час поворотів обприскувача. Для зручності аналізу розрахункові норми застосування було поділено на п'ять окремих діапазонів, що дозволило класифікувати ступінь варіативності пестицидів, внесених на кожному з полів, що досліджувались.

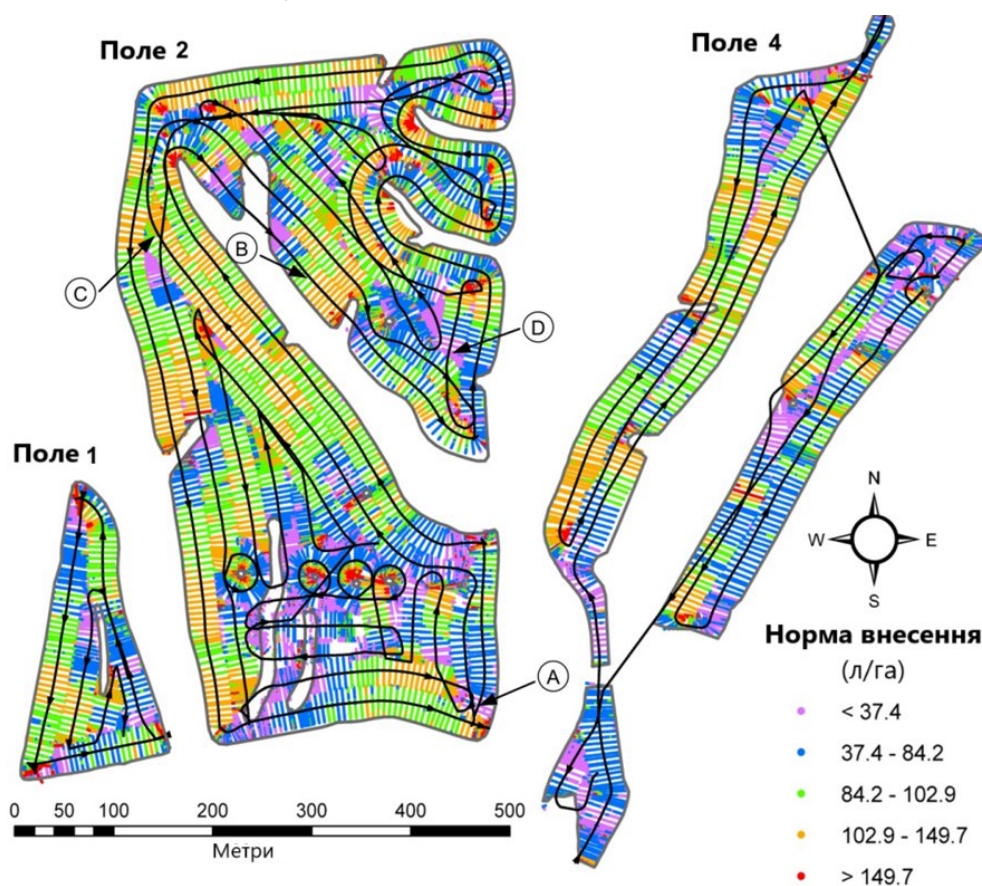
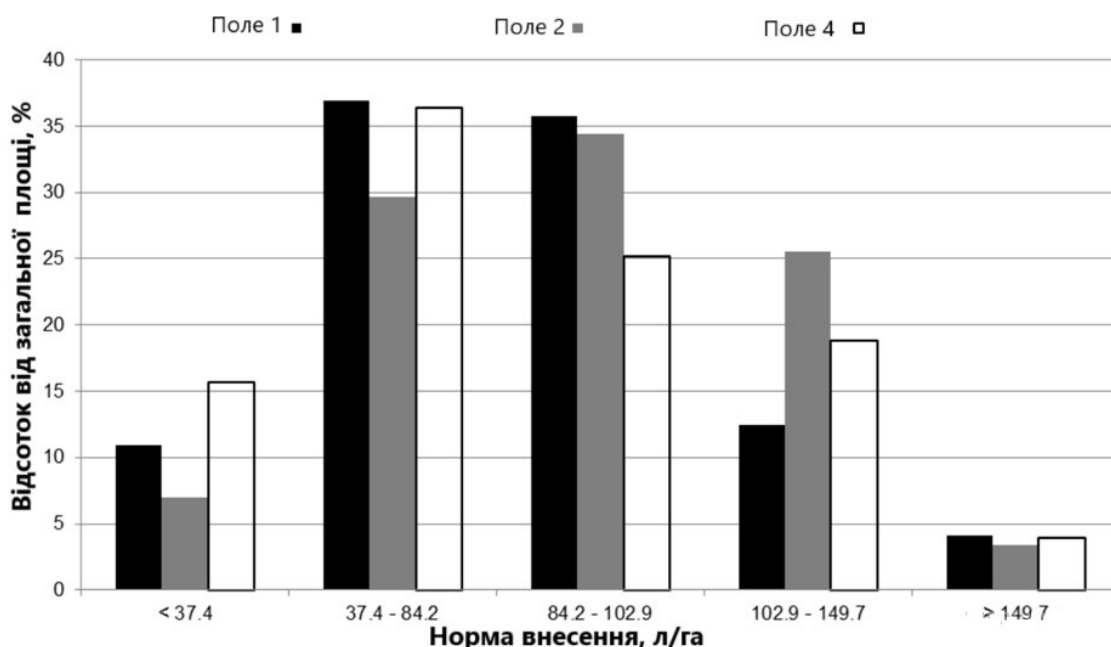


Рис. 3 - Карти орієнтовної норми внесення на основі даних про тиск у соплах та аналізу траєкторії обприскувача для полів 1, 2 і 4 із траєкторією та напрямком руху чорним кольором

На рисунку 4 представлено розподіл норм внесення залежно від частки площі поля, яка піддається цим нормам. Варто відзначити, що виробниками була визначена цільова норма внесення на рівні 93,5 л/га, тоді як діапазон від 84,2 до 102,9 л/га відображав цільову норму з допустимим відхиленням $\pm 10\%$. Похибка GPS-позиціонування ($< 2,54$ см) могла викликати відхилення до 2,5% від розрахункової норми внесення. Це враховувалося при частоті дискретизації 0,2 с, проте фактична помилка зменшувалася, оскільки координати GPS фіксувалися з кроком 1,0 с. Аналіз даних, представлених на рисунках 3 і 4, показує, що більшість ділянок, здається, отримують обробку на



рівні або трохи нижче встановленої виробниками цільової норми.

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

Цікаво підкреслити, що на полі 2 найбільша частина площі (34,5%) отримала внесення в межах цільової норми $\pm 10\%$. У той же час більшість ділянок на полях 1 та 4 (36,9% і 36,4% відповідно) були оброблені дозами, меншими за встановлену цільову норму (від 37,4 до 84,2 л/га). Інформація, представлена на малюнку 4, свідчить, що для всіх полів зазвичай норми

внесення були нижчими за рекомендований діапазон (84,2 – 102,9 л/га), тоді як перевищення цих значень зустрічалося рідше. Варто зауважити, що в цьому дослідженні не враховувалося надмірне внесення, яке могло виникнути через подвійне покриття, наприклад, у зонах окремих рядів або при перекритті штанг обприскувача. Якби такі випадки були включені, очікувано, що розподіл розрахованих норм змістився б трохи вправо, оскільки деякі площі полів отримали б більші дози через перекриття. Оскільки ширина секцій керування обприскувача коливалася від 51 до 152 см, можливе збільшення норми було б незначним і, у цьому випадку, на відміну від обприскувачів із ширшими секціями, не зробило б суттєвого впливу на загальний розподіл норм внесення.

3.2 Вплив прискорення обприскувача

Однією з можливих причин коливань норми внесення може бути реакція регулятора об'єму розпилення на зміни швидкості руху агрегату. Система управління обприскувачем була сконфігурована таким чином, щоб забезпечувати стабільну бажану норму внесення незалежно від варіацій швидкості пересування. Як уже зазначалося, для регулювання роботи насоса застосовувався пропорційний гідравлічний клапан, який змінював швидкість насоса на основі сигналів з датчика потоку, розташованого між насосом та штангою оприскувача.

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

Табл. 1 представляє узагальнені дані щодо польових параметрів, отриманих під час проведення тестів. Середні швидкості обприскувача

варіювалися в межах від 5,0 до 5,56 м/с для трьох перевірених полів, що, ймовірно, пояснюється розмірами ділянок та наявністю перешкод, таких як зарості трави та водні канали, що зустрічалися під час внесення. Максимальна допустима похибка вимірювання швидкості склала 0,127 м/с (враховуючи точність GPS 2,54 см при мінімальному часі вибірки 0,2 с), що забезпечує відхилення не більше 2,5% від середньої швидкості руху обприскувача.

Також у таблиці 1 наведено середні норми внесення робочого розчину по ширині штанги обприскувача під час прискорення та уповільнення на кожному з трьох полів. Результати демонструють, що при зменшенні швидкості обприскувача норма внесення зростала, тоді як під час прискорення вона була нижчою. Це, ймовірно, свідчить про наявність певної затримки, пов'язаної з роботою контролера норми розпилювання, який намагається підтримувати стабільний потік на штангу при зміні швидкості руху.

Сценарії А та В (відповідно позначені на рис. 3) обрано для демонстрації залежності середньої норми внесення штанги від швидкості обприскувача. На малюнку 5 показано графік зміни швидкості руху обприскувача та середньої норми внесення по часу (t, с) із нанесеними лініями регресії, що дозволяє простежити загальні тенденції в отриманих даних.

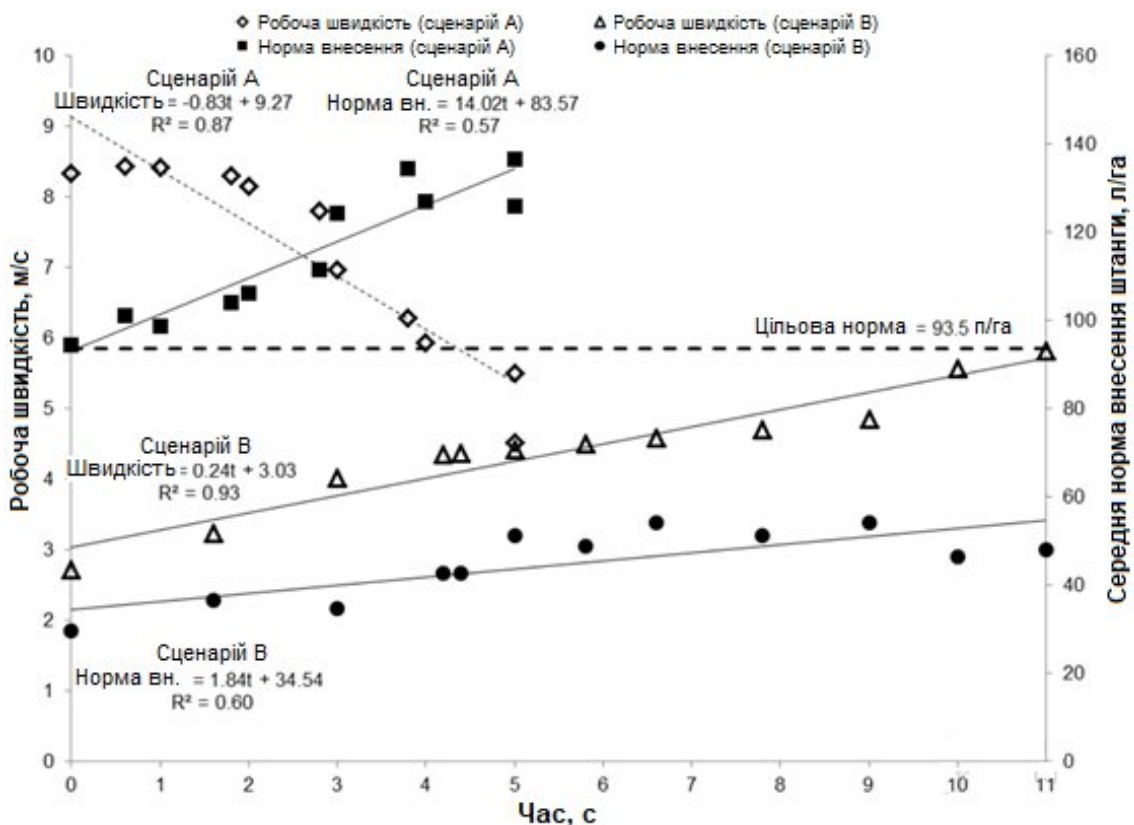


Рис. 5 – Вплив уповільнення (сценарій А) і прискорення (сценарій В) обприскувача на середню норму внесення штангою обприскувача

За сценарію А контролер норми внесення щойно досяг запланованого значення, коли швидкість обприскувача знизилася з 9,0 до 6,0 м/с при вході в трав'яний водний шлях на полі 2 (позначення А на рис. 3). Під час

подальшого сповільнення протягом наступних 5 секунд (з активованими усіма 30 секціями контролю) середнє значення внесення підвищилося приблизно до 140 л/га, після чого штанга обприскувача почала проходити через трав'яний водний шлях. Аналіз сценарію А показав наявність затримки, оскільки контролер намагався адаптуватися до зменшення швидкості, знижуючи потік на штанзі обприскувача.

Сценарій В ілюструє протилежну ситуацію, коли обприскувач збільшив швидкість після початку внесення на полі 2 (розташування В на рис. 3). Під час прискорення з 3,0 м/с до трохи більш ніж 6,0 м/с усі секції штанги були активні, за винятком трьох форсунок на правому кінці, які вимкнулися приблизно через 5 секунд. Як показано на рис. 5, підвищення швидкості супроводжувалося зростанням середньої норми внесення, оскільки контролер намагався компенсувати прискорення, однак запланована норма 93,5 л/га протягом цього часу не була досягнута. У таблиці 1 наведено частини кожного поля, які оброблялися під час прискорення та уповільнення обприскувача, демонструючи, що зміни швидкості мали місце на більшій частині всіх досліджених ділянок.

3.3 Наслідки приведення в дію секції штанги

Ще одним чинником, здатним впливати на зміну норми внесення, є активація управління секціями штанги. Автор [18] відзначав, що при включенні секцій штанги тиск у системі знижувався, що, відповідно, зменшувало швидкість потоку через сопло, і спостерігалася затримка, яка іноді сягала 15 секунд, перш ніж тиск у соплах повертався до оптимального робочого рівня. Для перевірки, чи проявляються схожі закономірності в отриманих експериментальних даних, середні значення норми внесення по штанзі обприскувача були зіставлені з сумарним часом, протягом якого штанга перебувала у включеному стані.

Сумарний час рахувався від моменту активації контрольної секції до її вимкнення, а також до відключення всіх інших секцій. При повторному

ввімкненні контрольної частини відлік кумулятивного часу починався заново. На графіку було відображено середні норми внесення штанги у порівнянні з інтервалами сумарного часу її роботи, що можна побачити на рис. 6.

Аналіз цих даних показав, що норми внесення збільшуються пропорційно тривалості включення штанги. Для полів 1 та 2 середня норма внесення перевищувала задану ціль, коли сумарний час роботи штанги перевищував 15 секунд. Ці результати узгоджуються з висновками [19], який припустив, що тривале включення секцій штанги підвищує ймовірність відновлення робочого тиску, необхідного для забезпечення бажаного рівня внесення.

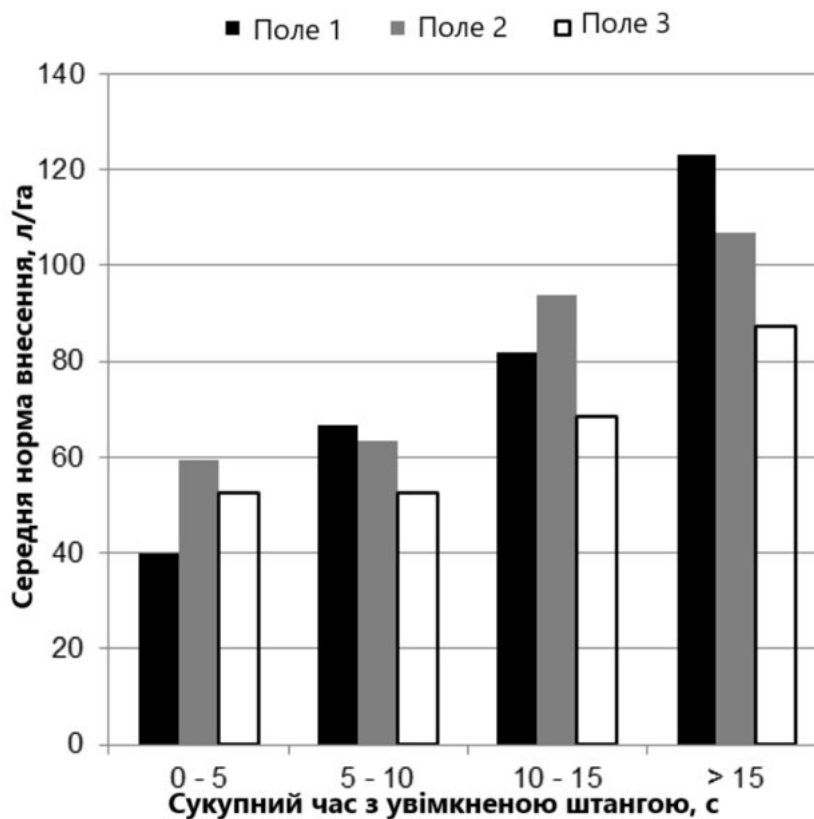


Рис. 6 – Середня норма внесення штанги обприскувача порівняно з вибраними діапазонами сукупного часу, протягом якого штанга обприскувача залишалася увімкненою

Додатково до даних, представлених на рис. 6, були виділені сценарії С та D на основі польових спостережень, щоб проаналізувати вплив увімкнення та вимкнення секцій штанги на розрахункову норму внесення (рис. 7). Сценарій С (позначення С на рис. 3) ілюструє обприскувач, що рухається з

майже сталою швидкістю (0,38 м/с — зміна від максимальної до мінімальної швидкості), коли секції керування штангами залишалися вимкненими. У цьому фрагменті агрегат входить у рядки, і секції штанги поступово відключаються (від 28 секцій до повного вимкнення) протягом 6,0 с (між 3,0 і 9,0 с на рис. 7). Під час цього періоду середній тиск у штанзі обприскувача підвищився з 375 до 470 кПа. На момент нульового часу середня норма внесення по штанзі була трохи вищою за заплановану цільову величину.

Коли почалося відключення секцій штанги, норма внесення в активних секціях збільшилася майже до 140 л/га. Ці спостереження демонструють, що активація системи керування секціями може призводити до підвищення норм внесення, оскільки зростає тиск у секціях, що залишаються активними, адже система автоматично зменшує швидкість потоку для компенсації вимкнення інших секцій.

Такі результати підтверджують висновки роботи [20], де відзначалося підвищення тиску на соплах у контрольних секціях, які залишалися ввімкненими під час відключення інших секцій. За даними [21], система управління через деякий час здатна стабілізувати тиск у секціях, що залишаються активними.

Сценарій D було обрано для демонстрації реакції регулятора норми внесення на процес увімкнення секцій. У цьому випадку (позначення D на рис. 3) обприскувач почав виходити з рядів при майже сталій швидкості (0,33 м/с, коливання від максимальної до мінімальної швидкості), коли секції штанги були активовані.

На нульовий час (рис. 7) були увімкнені шість секцій штанги, починаючи з правого кінця, і активація інших секцій продовжувалася до 2,0 с, коли працювало вже 29 секцій. Середня норма внесення по штанзі поступово збільшувалася ще протягом 5 с, після чого досягла встановленої цільової величини.

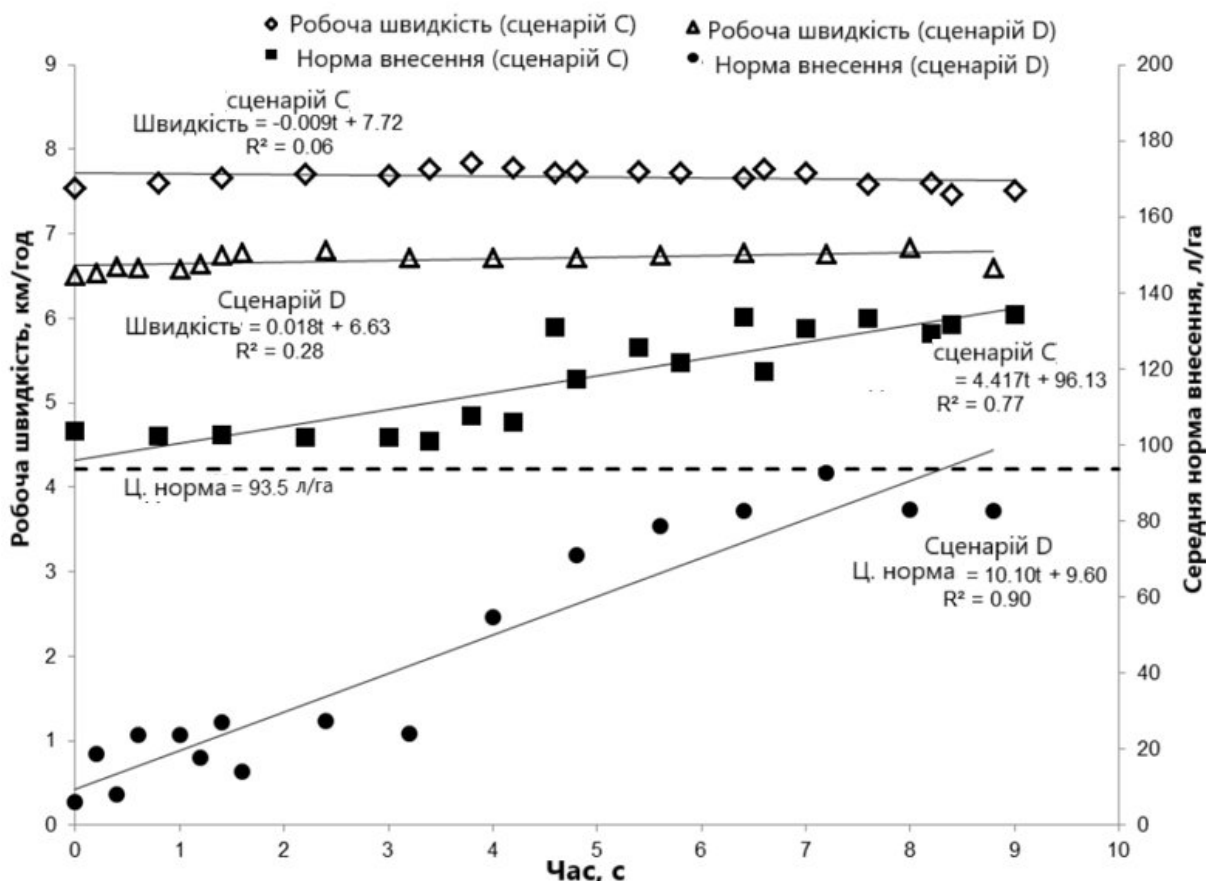


Рис. 7 - Вплив активації секції штанги на середню норму внесення штанги обприскувача, коли секції вимикаються (сценарій С) і вмикаються (сценарій D)

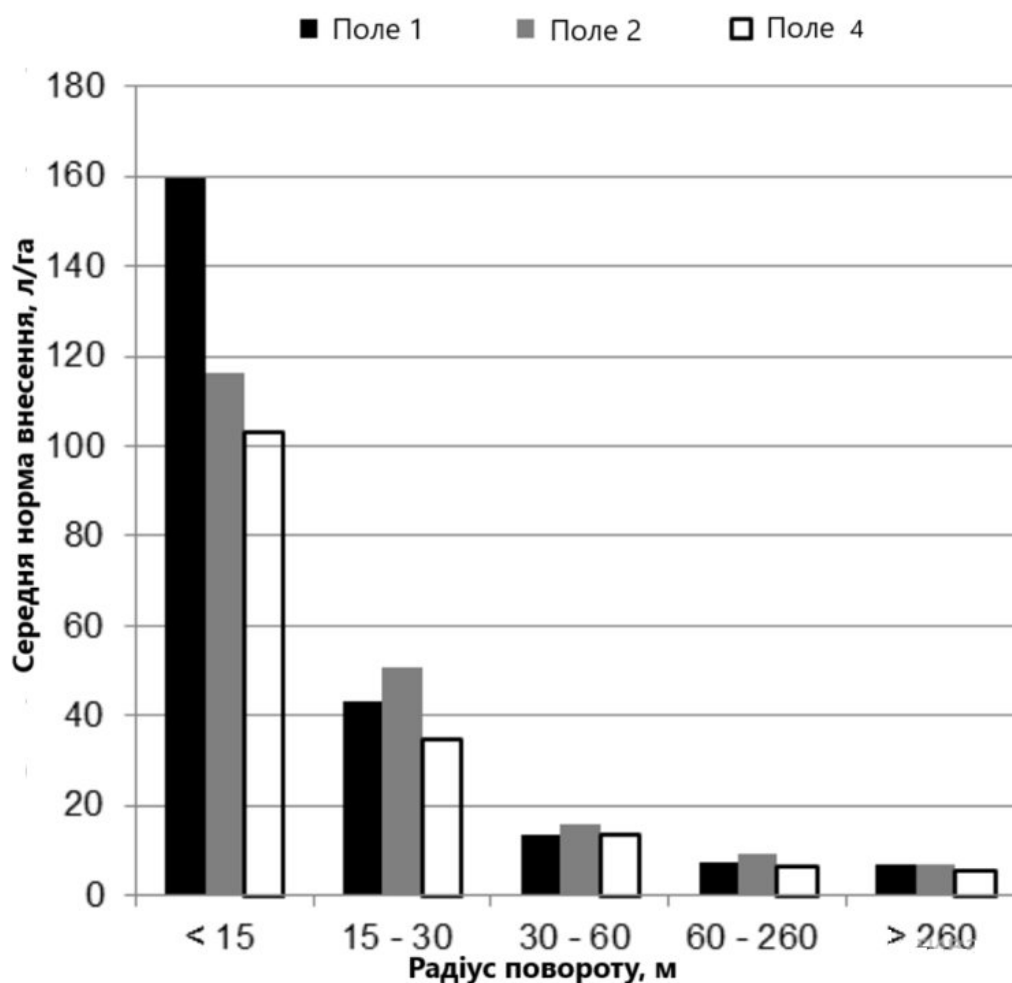
Протягом часу від початку руху до 9,0 с середнє значення тиску в штанзі обприскувача підвищилося з 36 до 286 кПа. Отримані показники свідчать про те, що зменшені норми внесення могли виникнути через запуск секцій керування штангою, оскільки контролер регулювання норми намагався збільшити витрату рідини в системі для компенсації активації відповідних секцій.

3.4 Вплив поворотів

Як зазначено у джерелі [22], зміни у нормі внесення можуть виникати вздовж штанги обприскувача під час здійснення повороту, оскільки внутрішні секції штанги обробляють менші ділянки площі порівняно із зовнішніми секціями. Значення середнього стандартного відхилення для штанги

обприскувача наведено на графіку, який показує залежність цих показників від різних радіусів повороту, що відображено на рис. 8.

Рис. 8 – Середнє стандартне відхилення в нормі внесення залежно від



діапазонів радіусу повороту обприскувача

Ці результати демонструють значну різницю у величині норми внесення по штанзі обприскувача при радіусі (R) менше 15 м, що становить приблизно половину ширини штанги. Для радіусів повороту в межах 15 – 30 м коливання норми внесення залишалися помітними, досягаючи близько 40 л/га на всіх трьох полях. При збільшенні R амплітуда змін норми по штанзі зменшувалася. Середні значення, які обернено пропорційні середньому радіусу, наведені в таблиці 1 для кожного поля і свідчать про те, що поле 2 (3,5°) мало найбільшу кількість поворотів, за ним йде поле 4 (2,75°) та поле 1 (2,5°).

Середнє стандартне відхилення норми внесення для кожної секції штанги у порівнянні з відповідною відстанню до осі штанги (d, м)

представлено на рис. 9, щоб оцінити різницю у варіаціях між трьома досліджуваними полями. Дані показують, що зміни швидкості секцій штанги були більш виразними на полі 2, ніж на інших двох. Поля 1 і 4 виявили мінімальне збільшення або взагалі не демонстрували зміни варіацій, що, ймовірно, пов'язано з меншим числом поворотів під час обприскування порівняно з полем 2.

Цю тенденцію добре видно на рис. 9, де точки для полів 1 і 4 мають схожий розподіл, тоді як поле 2 помітно зростає із збільшенням d . Як зазначалося у [23], обприскування під постійну швидкість під час повороту може забезпечити більшу площу покриття, але при зниженій нормі внесення, адже зовнішня частина штанги охоплює більшу ділянку порівняно з внутрішньою. Раніше представлені дані свідчать, що прискорення обприскувача та включення секцій штанги можуть значно впливати на ці зміни. Під час прискорення під час повороту норми внесення зазвичай зменшуються по всій довжині штанги, тоді як уповільнення може підвищити середні значення. Отримані результати підкреслюють важливість контролю ефективності пестицидів у зонах з коливанням тиску, змінами швидкості або при здійсненні поворотів.

Оператори зазвичай здійснюють перший обхід поля, обприскуючи зони розвороту, і цей підхід застосовувався у даному дослідженні. У такому випадку поля з нерівними межами або наявністю трав'яних водних шляхів потребують значної кількості поворотів для завершення першого проходу (поле 2 є наочним прикладом). Як зазначалося у [19], на полях із високими вимогами до точності можливі більші варіації норми внесення порівняно з рівними полями, де застосовуються прямолінійні паралельні проходи.

Відтак, вибір маршруту обприскування може суттєво впливати на зменшення впливу коливань норми внесення під час поворотів. Разом із тим, модифікація маршруту для досягнення більшої однорідності може знизити загальну ефективність обприскування. Забезпечення правильної норми

внесення під час прискорення машини або активації секцій штанги є ключовою функцією системи управління.

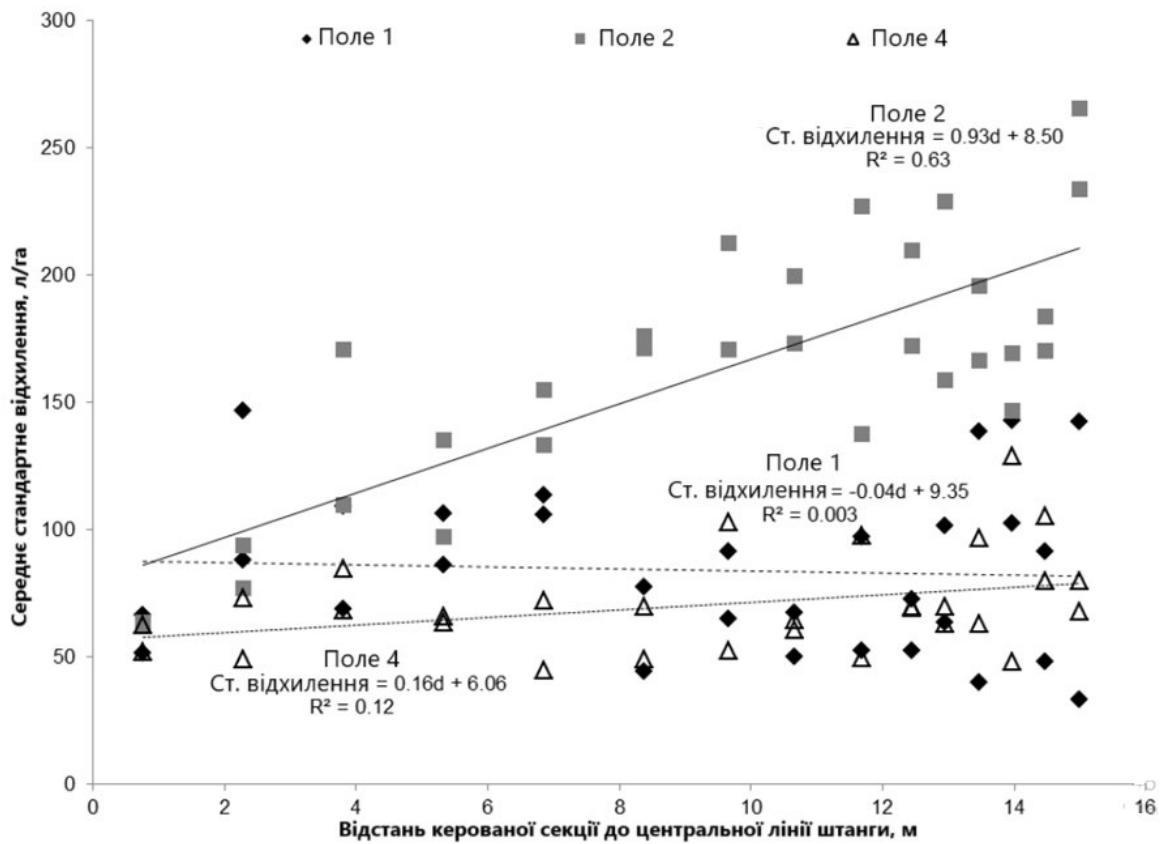


Рис. 9 – Середнє стандартне відхилення секції керування штангою в залежності від відстані до центральної лінії штанги

Виходячи з отриманих результатів, підтримка стабільної швидкості руху обприскувача, ймовірно, сприятиме покращенню однорідності норми внесення, оскільки зменшується потреба в додатковій корекції системи керування. До компонентів системи контролю, що могли впливати на рівномірність внесення у цьому експерименті, відносилися точність витратоміра та конструкція клапана регулювання потоку. Необхідно провести додаткові дослідження щодо ефективності зазначених елементів системи, щоб більш глибоко оцінити роль системи керування у виникненні помилок норми внесення.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження демонструють, що значна частина обстежуваних полів отримала норми внесення, які суттєво відрізнялися від цільового показника, через коливання тиску на штанзі та маневри обприскувача. Лише від 25% до 36% площ трьох аналізованих ділянок підпадали під діапазон цільових норм (84,2 – 102,9 л/га).

Виявлено, що на більшості полів фактичні норми внесення були меншими за 90% від заданого значення, що, ймовірно, пояснюється поворотними рухами техніки та затримками системи керування у регулюванні витрати рідини штангою до потрібного рівня. Часова затримка регулятора норми внесення могла сприяти зниженню фактичних норм, оскільки обприскувач збільшував швидкість руху, а контролер намагався компенсувати ці зміни шляхом регулювання витрати рідини. Навпаки, при уповільненні обприскувача затримка керуючої системи призводила до перевищення норми внесення у деяких секціях.

Додатково результати показали, що досягнення цільової норми було більш ймовірним за умови, якщо секції штанги працювали протягом тривалішого проміжку часу. Для точнішого визначення впливу прискорення руху техніки та спрацьовування секцій керування штангою на тиск рідини та рівномірність внесення необхідні подальші експерименти у контрольованих умовах.

Дослідження проводилося на одному самохідному обприскувачі, який був обладнаний гідравлічним клапаном для регулювання швидкості насоса, встановленою витратою розпилення та автоматичною системою управління секціями штанги. Ураховуючи, що існують інші системи керування та різні моделі обприскувачів з альтернативними контролерами норми розпилення, майбутні випробування повинні охоплювати і такі варіанти, щоб оцінити їхню реакцію на фактори, такі як прискорення руху та активація окремих секцій 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/ (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