

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: «Оцінка ефективності застосування системи автоматичного керування секціями причіпного обприскувача»

Виконав:

(підпис)

Олексій САДОВИЙ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2402-1м

Науковий керівник:

(підпис)

Анатолій ЛЕБЕДЄВ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

(підпис)

Михайло ШУЛЯК
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Садовий Олексій Владиславович

Оцінка ефективності застосування системи автоматичного керування секціями причіпного обприскувача.

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

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 50 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 8 таблиць, 4 рисунки, додатків 2, 25 літературних джерел.

Проведено розширені польові випробування, метою яких було детально оцінити вплив зміни швидкості руху на показники осадження робочої рідини та загальну якість обприскування. Дослідження виконувалися із застосуванням штангового обприскувача у двох конфігураціях: без регулятора норми внесення (CNS) та у варіанті, оснащеному регулятором норми (SRC). Випробування проводили у 2025 році в реальних польових умовах, що забезпечило об'єктивність результатів. Штанга обприскувача була рівномірно укомплектована трьома різними типами форсунок — ХРС, АІХР та ТТІ, що дозволило сформувати середній, дуже великий та ультравеликий розмір крапель відповідно, а також порівняти їхню ефективність за однакових умов.

Перед початком дослідної частини обприскувач пройшов ретельну калібровку, необхідну для забезпечення стабільної норми внесення на рівні 187 л/га при робочому тиску 207 кПа і швидкості руху 9,7 км/год. Така попередня підготовка дозволила мінімізувати вплив сторонніх факторів і гарантувати, що зміни у результатах будуть пов'язані саме зі зміною

швидкості руху агрегату. Обприскування та подальша оцінка рівномірності та якості нанесення пестицидів здійснювалися при п'яти різних швидкостях руху: 9,7, 12,9, 16,1, 19,3 та 22,5 км/год. Дані збирали шляхом розміщення водочутливого паперу в різних точках штанги обприскувача та на ділянках поля, що дало змогу визначити характер осадження по всій робочій ширині та оцінити вплив швидкості на якість застосування.

Отримані результати показали чітку тенденцію: обприскувачі, оснащені регулятором норми внесення, забезпечують стабільніше, адекватне та більш послідовне осадження робочої рідини, порівняно із звичайними обприскувачами без такого регулятора, особливо за умов зміни швидкості руху в процесі нанесення пестицидів. Це свідчить про важливість застосування систем автоматичного підтримання норми внесення для підвищення ефективності та точності обприскування у сучасних технологіях захисту рослин.

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

ABSTRACT

Sadovy Oleksiy Vladyslavovich

Evaluation of the effectiveness of the use of the automatic control system for the sections of a trailed sprayer.

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

The final qualification work is presented on 50 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 8 tables, 4 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

Extensive field tests were conducted, the purpose of which was to assess in detail the effect of changing the speed of movement on the indicators of the

deposition of the working fluid and the overall quality of spraying. The studies were carried out using a boom sprayer in two configurations: without a rate controller (CNS) and in a version equipped with a rate controller (SRC). The tests were conducted in 2025 in real field conditions, which ensured the objectivity of the results. The sprayer boom was evenly equipped with three different types of nozzles - XRC, AIXR and TTI, which allowed to form medium, very large and ultra-large droplet sizes, respectively, and to compare their efficiency under the same conditions.

Before the start of the experimental part, the sprayer underwent a thorough calibration necessary to ensure a stable application rate of 187 l/ha at an operating pressure of 207 kPa and a travel speed of 9.7 km/h. Such preliminary preparation made it possible to minimize the influence of extraneous factors and ensure that changes in the results would be associated precisely with changes in the speed of movement of the unit. Spraying and subsequent assessment of the uniformity and quality of pesticide application were carried out at five different speeds: 9.7, 12.9, 16.1, 19.3 and 22.5 km/h. Data were collected by placing water-sensitive paper at different points on the sprayer boom and in sections of the field, which made it possible to determine the nature of deposition across the entire working width and assess the effect of speed on the quality of application.

The results obtained showed a clear trend: sprayers equipped with a rate controller provide more stable, adequate and consistent deposition of the working fluid, compared to conventional sprayers without such a controller, especially under conditions of changing speed during pesticide application. This indicates the importance of using automatic rate control systems to increase the efficiency and accuracy of spraying in modern crop protection technologies.

Keywords: spraying, quality, rate, pesticides, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8	
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11	
1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування	11	
1.2 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин	21	
1.3 Аналіз досліджень роботи обприскувачів.....	24	
Розділ	2.	Методика
досліджень.....	29	
2.1 Обладнання та його застосування	29	
2.2 Розпилення та збір даних	31	
2.3 Аналіз даних	33	
Розділ 3. Аналіз результатів досліджень.....	36	
3.1 Аналіз показників розпилення	36	
3.2 Якість спрею	39	
Висновки.....	46	
Список використаних джерел.....	48	

ВСТУП

1. Актуальність теми

У сучасних господарствах спостерігається тенденція до збільшення швидкостей руху під час виконання операцій обприскування, що, з одного боку, підвищує продуктивність, але з іншого — створює ризики погіршення якості внесення. Відтак питання оцінки ефективності та стабільності роботи систем автоматичного керування секціями у поєднанні з різними типами форсунок та змінними швидкісними режимами набуває суттєвого наукового та практичного значення. Це особливо актуально в умовах упровадження точного землеробства, де якість виконання кожної операції безпосередньо впливає на врожайність, економічну ефективність та екологічну безпеку виробництва.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Проблематика підвищення точності та стабільності роботи штангових обприскувачів активно висвітлюється в наукових публікаціях як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Значна кількість робіт присвячена вивченню впливу конструктивних елементів обприскувачів, типів форсунок, параметрів розпилення, а також режимів роботи на якість нанесення робочих розчинів. Розглядаються питання оптимізації норм внесення, формування спектра крапель, мінімізації зносу та дрейфу, забезпечення рівномірності покриття поверхні рослин.

Сучасні дослідження демонструють, що автоматизовані системи керування нормою внесення та секціями здатні істотно підвищити точність обприскування, однак їх ефективність залежить від умов роботи, технічного стану обприскувача, типів форсунок та швидкості руху агрегату. Водночас недостатньо вивченими залишаються питання поведінки таких систем за різних швидкісних режимів, зокрема при роботі у реальних польових умовах, де зміна швидкості є неминучою. Виявлення особливостей їх

роботи в умовах різних комбінацій обладнання та режимів обробітку становить важливу наукову задачу.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування системи автоматичного керування секціями причіпного обприскувача за різних швидкісних режимів та умов роботи, а також визначення її впливу на рівномірність і якість нанесення робочої рідини.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес обприскування рослин штанговим причіпним обприскувачем у системах точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є вплив застосування системи автоматичного керування секціями та зміни швидкості руху на показники осадження робочої рідини та якість обприскування.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати фактори, що впливають на якість обприскування, та сучасні вимоги до машин для захисту рослин.
2. Провести польові випробування штангового обприскувача у двох конфігураціях — з регулятором норми внесення та без нього.
3. Визначити особливості роботи системи автоматичного керування секціями та її ефективність у різних режимах обприскування.
4. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів та сформулювати висновки щодо доцільності застосування систем автоматизації у технологіях захисту рослин.

7. Методи дослідження

У роботі застосовано комплекс експериментальних, аналітичних та статистичних методів. Польові дослідження виконувалися з використанням водочутливого паперу для визначення параметрів осадження, калібрувальних методик для забезпечення стабільності норми внесення та

інструментального контролю параметрів роботи обприскувача. Аналітична обробка даних проведена із застосуванням стандартних статистичних підходів, що забезпечило достовірність отриманих результатів.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 50 сторінок машинописного тексту, містить 8 таблиць, 4 рисунки, 25 літературних джерел і 2 додатки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування

На результативність процесу розпилення впливають різноманітні чинники, сукупна дія яких визначає якість покриття, рівномірність внесення й загальну ефективність застосування препарату. Одним із найважливіших параметрів є правильний добір форсунки: її конструкція, діаметр отвору та геометрія визначають формування розміру крапель, швидкість виходу рідини та ширину смуги розпилення. Значну роль відіграє й робочий тиск у системі. Підвищення тиску сприяє появі дрібнодисперсної аерозольної фракції, що покращує покриття поверхні рослин, але одночасно підсилює імовірність дрейфу крапель за межі заданої зони. Натомість зменшення тиску приводить до утворення крупніших краплин, що знижує ризик знесення, проте може погіршити рівень обробки листової поверхні.

Не менш важливим є вплив швидкості руху обприскувача: збільшення темпу пересування часто спричиняє нерівномірність покриття через зменшення часу впливу струменя на ціль. Умови середовища, такі як вітер, температура повітря та показники вологості, також формують якість обробки. Вітрові пориви здатні переносити краплі у непередбачуваному напрямку, що скорочує фактично внесену кількість розчину на призначену ділянку. Високі температурні показники та низька вологість прискорюють випаровування робочої рідини ще в польоті, зменшуючи ефективність засобів захисту рослин.

Склад і властивості розпилюваного розчину мають виняткове значення: концентрація компонентів, густина, в'язкість та взаємодія хімічних речовин впливають як на стабільність потоку в соплі, так і на здатність крапель утримуватися на поверхні рослинного покриву. Додатковим гарантом правильного дозування виступає належне калібрування техніки, яке забезпечує відповідність фактичної витрати рекомендованим нормам та мінімізує як перевищення, так і недовнесення

засобу. Кваліфікація оператора також визначає результат: досвідчений фахівець здатний оперативно адаптувати режими розпилення до мінливих умов у полі, забезпечуючи стабільно високу якість виконання робіт. Загалом усі перелічені фактори підлягають ретельному контролю задля досягнення ефективного обприскування, що зменшує втрати препарату та екологічні ризики.

Окрему й надзвичайно важливу роль у функціонуванні системи обприскування відіграє вода, яка використовується як основний транспортний носій для хімічних речовин — включно з пестицидами, гербіцидами, добривами й різноманітними поверхневими покриттями. На якість операцій суттєво впливають фізико-хімічні параметри води. Такі характеристики, як рівень рН, жорсткість, температурний режим, поверхневий натяг та електропровідність, здатні змінювати процес формування краплин, ступінь змочування, адгезію до листової поверхні та стабільність робочих сумішей. Глибоке розуміння цих взаємозв'язків є необхідною умовою оптимізації технології обприскування та досягнення запланованого агрономічного ефекту.

Одним із ключових параметрів, які визначають якість утворення розпилу, виступає кислотність або лужність робочого розчину, тобто рівень рН. Значна частина гербіцидів і пестицидів є рН-чутливими, і при надмірно високій або низькій кислотності можливе швидке руйнування діючих компонентів унаслідок гідролітичних реакцій. Наприклад, органофосфатні препарати схильні стрімко деградувати у лужному середовищі, що призводить до значного падіння їхньої біологічної активності. Переважно рекомендується підтримувати показник рН у межах 4–6,5, оскільки саме в цьому діапазоні більшість агрохімікатів виявляє найкращу стабільність. Якщо реальні значення відхиляються від оптимальних умов, до води вводять спеціальні буферні суміші або регулятори кислотності, які забезпечують стійкість складу під час обприскування.

Не менш вагомим фактором є жорсткість води, що формується присутністю катіонів кальцію, магнію або заліза. Такі домішки можуть здійснювати негативну взаємодію з окремими хімічними речовинами, зокрема препаратами на основі гліфосату, зменшуючи їхню ефективність через утворення малорозчинних сполук. У результаті погіршується поглинання діючої речовини листовою поверхнею рослин. Щоб запобігти цьому небажаному явищу, у баковій суміші часто додають кондиціонери води або ПАРи, які «зв'язують» катіони й запобігають антагоністичним реакціям.

Температура робочої води також здатна помітно впливати на процес формування крапель та розчинність інгредієнтів. Підігрітий розчин краще розчиняє багато хімічних сполук, проте інколи така умова призводить до посиленого випаровування, а відтак до збільшення дрейфу й втрати препарату поза цільовою ділянкою. Натомість надто прохолодна вода ускладнює розчинення компонентів і може спричинити нерівномірність у концентрації по всій суміші. Отже, найдоцільнішим є використання помірних температур води, що забезпечує баланс між розчинністю та мінімальним випаровуванням.

Ще одним важливим показником є величина поверхневого натягу, від якої залежить здатність крапель води розтікатися та утримуватись на поверхні рослин. Через природно високий поверхневий натяг вода формує більш округлі краплі, які можуть скочуватись із листової пластинки або погано її змочувати. Додавання поверхнево-активних речовин сприяє кращому прилипанню, рівномірному покриттю та підвищенню ефективності проникнення розчину, що є особливо актуальним на культурах з вираженим восковим нальотом або гідрофобними властивостями.

Електропровідність (ЕС), що характеризує кількість розчинених солей у воді для обприскування, також впливає на результативність роботи хімічних препаратів. Високі значення ЕС може змінювати агрохімічні властивості розчину, інколи знижуючи його дієвість. Крім того, підвищена

солоність може спричинити додатковий фізіологічний стрес у рослин, особливо тих, які є вразливими до засоленості. Тому контроль цього параметра під час приготування бакових сумішей є обов'язковим для уникнення небажаних реакцій та можливих ушкоджень культур.

Отже, характеристики води мають визначальний вплив на результативність та якість процесу обприскування. Такі показники, як кислотність (рН), ступінь жорсткості, температурний режим, величина поверхневого натягу та електропровідність, повинні постійно контролюватися, щоб гарантувати максимально ефективне внесення робочої рідини. Виконання спеціальних коригувальних заходів — додавання поверхнево-активних компонентів, використання кондиціонерів для підготовки води або регуляторів кислотності — сприяє покращенню формування крапель, стабільності розчину та запобігає руйнуванню діючих речовин у баковій суміші. Усвідомлення впливу фізико-хімічних властивостей води та їх грамотне регулювання дозволяє підвищити рівень покриття рослин, мінімізувати втрати препаратів і забезпечити вищу ефективність захисту культур від хвороб і шкідників.

Кліматичні умови також мають надзвичайно важливе значення для забезпечення якісного та безпечного обприскування у сільськогосподарському виробництві. Технологічні операції з внесення добрив, фунгіцидів, гербіцидів чи інсектицидів тісно залежать від змін погоди. Зміна швидкості повітряного потоку, рівня вологості, температури або можливі опади здатні серйозно впливати на кінцевий результат, порушуючи біологічну дію препаратів і водночас створюючи ризики для агроєкосистем.

Одним із ключових погодних параметрів виступає сила вітру. У випадках, коли його швидкість перевищує допустиму межу, зростає небезпека дрейфу — перенесення рідких частинок поза межі запланованої обробки. Це призводить до нерівномірного нанесення робочого розчину, втрати його ефективності, а також можливого негативного впливу на сусідні

угіддя або природні території. Культури можуть недоотримувати потрібну дозу препарату, що погіршує контроль шкідливих організмів, тоді як чутливі рослини поблизу зазнають хімічного навантаження. Проте й надто слабкий вітер або повний штиль здатні створювати іншу проблему — частинки рідини зависають у повітрі, їхнє осідання стає непередбачуваним, а за явища температурної інверсії можливе значне випаровування до контакту з рослинами.

Температурний фактор є не менш визначальним під час виконання обприскування. За підвищених температур краплі швидко висихають, що зменшує кількість діючої речовини, яка реально досягає листової поверхні. Такий інтенсивний процес випаровування не лише знижує результативність препаратів, але й збільшує ймовірність небажаного розповсюдження хімікатів у навколишньому середовищі. Натомість низька температура уповільнює фізіологічні процеси у рослин та знижує активність шкідливих агентів, що також негативно позначається на загальній ефективності внесення.

Рівень відносної вологості повітря безпосередньо впливає на поведінку крапель після їх розпилення. За сухих умов і низької вологості розмір крапель швидко зменшується, що збільшує ризик їхнього переносу повітряними потоками й недосягнення рослинної поверхні. Препарат у такій ситуації працює майже безрезультатно. Вища вологість навпаки сприяє збалансованій роботі обприскувача — краплі довше зберігають оптимальні характеристики та забезпечують кращу адгезію до рослинних тканин. Разом з тим надмірна вологість, особливо при низьких температурах, призводить до затримки висихання робочого розчину, створюючи сприятливі умови для розвитку хвороботворних організмів на посівах.

Атмосферні опади до моменту обприскування або відразу після нього здатні суттєво змінювати кінцевий результат обробки. Раптовий дощ одразу після внесення засобів може частково або повністю змити хімічні препарати

з поверхні рослин, тим самим нівелюючи їхню дію та створюючи потребу у повторному проході, що збільшує витрати ресурсів і трудомісткість технологічного процесу. Окрім цього, змив пестицидів із полів може спричиняти забруднення сусідніх водойм, що становить серйозну екологічну загрозу. Для деяких препаратів, зокрема гербіцидів системної дії, необхідний певний проміжок часу для висихання, аби забезпечити повноцінне поглинання рослинними тканинами. Водночас невелика кількість вологи у вигляді роси чи слабкі опади напередодні внесення здатні покращувати розподіл речовини по листовій поверхні та підвищувати проникнення робочого розчину у рослину, хоча у разі неправильного вибору моменту внесення може відбуватися небажане розбавлення хімікатів.

До того ж, сумісна дія кількох погодних чинників часто значно ускладнює процес розпилення. Наприклад, поєднання підвищеної температури повітря, низького рівня вологи та наявності помірного вітру формує у край несприятливі умови, що сприяють як швидкому випаровуванню крапель, так і посиленню дрейфу робочого розчину за межі цільової ділянки. Натомість найбільш придатний час для внесення препаратів зазвичай припадає на ранкові години або вечірній період: у ці проміжки день помірно теплий, повітря містить більше вологи, а швидкість вітру зазвичай нижча, ніж у середині дня.

Отже, кліматичні умови мають визначальний вплив на результативність сільськогосподарського обприскування: вони впливають на формування крапель, рівномірність покриття зеленої маси, дрейф у повітрі та ступінь засвоєння внесених препаратів. З метою досягнення високої ефективності технологічного процесу й одночасного зниження ризиків для природи агропромислом необхідно уважно відстежувати погодну ситуацію та коригувати календар операцій відповідно до фактичних умов навколишнього середовища. Використання сучасних технологій — таких як метеопрогнозні системи, форсунки зі зниженою здатністю до утворення дрібнодисперсного туману, а також різні ад'юванти

— дозволяє з більшою точністю виконувати обприскування і покращувати кінцевий ефект. Глибоке розуміння ролі погодних факторів підсилює екологічну стійкість сільського господарства, сприяє економному використанню хімічних засобів та позитивно позначається на рівні врожайності.

Окремого значення набувають технічні характеристики розпилювальних наконечників — форсунок, адже саме вони визначають якість процесу розпилення у різноманітних галузях, включно з аграрним виробництвом, лакофарбовими роботами та промисловими облицювальними технологіями. Параметри форсунок впливають на просторовий розподіл крапель, їхній розмір, рівень покриття поверхонь і загальну ефективність нанесення робочих розчинів, тобто прямо визначають кінцевий результат операції. Тому детальне вивчення властивостей розпилювального обладнання є ключовою умовою для досягнення максимальної якості обробки.

Однією з ключових характеристик форсунки є діаметр її отвору, тобто розмір сопла. Саме він визначає швидкість руху рідини всередині системи та формування крапель при розпиленні. Сопла з більшим перерізом подають значніші об'єми робочого розчину, утворюючи крупні краплі, які мають нижчу схильність до знесення вітром, проте можуть погіршувати рівномірність покриття поверхні. Натомість дуже малі отвори створюють дрібнодисперсні краплі, здатні краще вкривати об'єкт обробки, але водночас більш уразливі до випаровування та переміщення під впливом повітряних потоків. Отже, оптимальний вибір розміру сопла визначається компромісом між якістю покриття та умовами довкілля під час роботи.

Не менш важливою характеристикою є кут розпилення, що безпосередньо формує структуру факела та площу його перекриття. Ширококутові форсунки забезпечують розширений малюнок розпилення, що дозволяє оперативно обробляти значні площі — наприклад, посіви сільськогосподарських культур чи великі будівельні поверхні під час

фарбування. Проте із збільшенням кута падає щільність нанесення крапель на одиницю площі, і це може зменшувати однорідність покриття. Вузькокутові ж насадки формують більш сфокусований струмінь, що ефективно використовується при потребі точного внесення реагенту: під час локальної гербіцидної обробки бур'янів або нанесення фарби на невеликі деталі. Такі форсунки потребують більшої кількості проходів для покриття тієї ж території.

Тиск робочої рідини на виході із сопла істотно впливає на якість і стабільність розпилення. Підвищений тиск сприяє подрібненню крапель, забезпечує густіше покриття та швидше проникнення розчину, але водночас підвищує ризики дрейфу поза межі оброблюваної ділянки. У агровиробництві це може спричиняти небажане поширення хімічних речовин, що не тільки знижує результативність захисту рослин, а й створює загрозу довкіллю. Надто низький тиск, навпаки, сприяє утворенню великих крапель, які стійкіші до знесення, але можуть нерівномірно лягати на листову поверхню чи ґрунт, особливо в умовах складного рельєфу або густої рослинності. Тому контроль і підтримання оптимального тиску є основою стабільної, якісної та енергоефективної роботи системи розпилення.

Суттєве значення має і тип факела, який формується завдяки конструктивним особливостям обраної насадки. Серед найбільш поширених — віялові, суцільноконусні та порожнисто-конусні розпилювачі. Плоско-віялові моделі призначені для рівномірного розподілу рідини по горизонтальних поверхнях. Краплеутворювачі конусного типу краще підходять для проникнення всередину густих рослинних масивів або обробки поверхонь зі складною геометрією. Особливо ефективними у боротьбі зі шкідниками культур із щільним листям є порожнисто-конусні форсунки — вони забезпечують повноцінне покриття як верхнього, так і нижнього боку листових пластин. Звідси впливає необхідність добирати тип сопла залежно від цільового призначення та технологічних вимог.

На параметри форсунки протягом довгого періоду експлуатації впливають і матеріали, з яких її виготовлено. Найчастіше використовують пластмасу, кераміку або нержавіючу сталь. Ці матеріали мають різну хімічну стійкість та опір стиранню. У міру зношування отвір сопла може деформуватися, що призводить до зростання витрати робочого розчину та зміни характеру факела, внаслідок чого покриття стає нерівномірним, а ефективність обробки — нижчою. Тому регулярна діагностика стану насадок, своєчасна заміна зношених елементів та технічне обслуговування є обов'язковими заходами для забезпечення стабільної якості розпилення протягом всього терміну використання обладнання.

Параметри роботи форсунок — зокрема їхній діаметр, кут факела розпилення, робочий тиск, форма утворення струменя та тип матеріалу — мають вирішальний вплив на характер розпилення робочого розчину. Сукупність зазначених факторів визначає величину крапель, густоту покриття поверхні й точність подачі препарату, що безпосередньо позначається на результативності технологічної операції. Грамотно підібрані характеристики форсунок відповідно до агротехнічних умов і технологічних вимог забезпечують отримання найвищої ефективності внесення, зменшують невиправдані втрати препарату та знижують шкідливий вплив на довкілля.

На кінцевий результат хімічного обробітку культур обприскувачем суттєво впливають і параметри штанги — її висота над рослинами, швидкість руху, кутовий нахил та ступінь стабільності механізму. Кожен із цих показників відображається на якості покриття, рівномірності розподілу крапель за розмірними групами, а також на схильності дрібнодисперсного аерозолю до дрейфування. Усі ці аспекти надзвичайно важливі для надійного контролю шкідників і мінімізації перевитрати робочого розчину.

Висотне положення штанги визначає рівень перекивання факелів сусідніх розпилювачів. Надмірне підняття штанги спричиняє збільшення втрат на знесення повітряними потоками, внаслідок чого зменшується

частка рідини, що досягає листкової поверхні. Протилежна ситуація — надто низьке положення — призводить до нерівномірної обробки, появи необроблених зон, особливо у посівах із густим або неоднорідним наметом. Тому підтримання рекомендованої висоти штанги є основним чинником забезпечення високоякісного покриття й зменшення втрат робочого розчину.

Швидкісний режим руху штанги також визначає однорідність внесення препарату. Занадто велика швидкість призводить до зниження рівномірності осадження крапель, адже форсунки не встигають сформувати оптимальне покриття цільових органів рослин. Це викликає появу непрокритих фрагментів, що особливо помітно на нерівних територіях або великих площах. Надмірне зниження швидкості, навпаки, може позитивно вплинути на якість обприскування, але ускладнює організацію процесу й збільшує експлуатаційні затрати техніки та робочого часу.

Не менш важливими є показники нахилу та стійкості штанги. Якщо її положення порушується, навіть частково, одна сторона конструкції може подавати більшу кількість розчину, тоді як протилежна — істотно меншу. Така нерівномірність поширення препарату знижує загальну ефективність захисних заходів і може в подальшому вимагати повторного обробитку посівів. Крім того, дія вітру або пересічений рельєф здатні спровокувати вібрації штанги, що спотворюють схему розпилення і прискорюють зношування обладнання. Застосування стабілізуючих елементів, систем автоматичного вирівнювання та оптимальної підвіски дозволяє значною мірою компенсувати зазначені негативні ефекти та підвищити точність внесення агрохімікатів.

Отже, такі параметри, як висота розміщення штанги, робоча швидкість обприскувача, його нахил і стійкість у процесі руху, формують взаємозалежний комплекс чинників, що визначають рівень якості внесення препарату. Для досягнення високої ефективності потрібне точне налаштування цих характеристик, яке дає змогу забезпечити рівномірне

покриття поверхні рослин, зменшити втрати робочого розчину через знесення та підвищити результативність технологічного процесу. Постійний контроль технічного стану обприскувального обладнання й коригування його параметрів разом із врахуванням актуальних характеристик метеорологічних умов є ключовими передумовами отримання стабільно бажаних результатів у польовому внесенні засобів захисту рослин.

1.2 Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин

Агротехнічні норми, що висуваються до польових обприскувачів, спрямовані на забезпечення максимальної продуктивності обробітку, високої ефективності використання препаратів та підвищення екологічної стійкості технологічних процесів у сучасному землеробстві. Такі критерії передбачають досягнення рівномірного нанесення розчинів засобів захисту рослин, мінеральних підживлень і регуляторів росту, що дозволяє кожній культурній рослині отримувати задану дозу активних речовин при одночасному зниженні втрат та небажаного впливу на довкілля. Особливе значення має якість та однорідність покриття розпилом, адже саме ці параметри визначають ступінь контролю бур'янів і шкідників, а в кінцевому результаті — величину майбутнього врожаю. Розпилювальні елементи мають формувати краплі оптимального діаметра: надто дрібні частинки можуть переноситися вітром і не досягати цільової поверхні, а завеликі — погіршують рівень покриття. Форсунки, що відповідають за створення крапель, повинні стабільно функціонувати в рекомендованому діапазоні тиску, зберігаючи ефективність навіть за мінливих робочих умов у полі.

Конструктивні параметри і потужність обприскувальної техніки необхідно адаптувати до особливостей вирощуваної культури, геометрії поля, конфігурації земельної ділянки та рельєфних характеристик місцевості. Система має дозволяти коригувати робочу ширину захвату й висоту штанги з урахуванням густоти і висоти рослинного покриву.

Важливо також передбачити об'єм баку, достатній для тривалої роботи без частих зупинок на перезавантаження, що підвищує продуктивність операцій. Техніка повинна бути обладнана точними пристроями контролю подачі робочого розчину, які забезпечують регульоване внесення препарату з точністю до гектарної норми та унеможливають недовнесення чи перевитрату. Нормативи агротехніки визначають і оптимальний діапазон швидкості руху машини, який підтримує рівномірність покриття площі при відсутності пошкоджень посівів.

Дотримання вимог екологічної безпеки під час проведення обприскувань включає комплекс заходів, спрямованих на зменшення ризиків для здоров'я працівників, біорізноманіття та природних ресурсів. Високу роль відіграють ретельна підготовка до роботи й обдуманий підбір препаратів — перевагу слід надавати менш токсичним засобам із підтвердженою відповідністю до цільових культур та санітарно-екологічних норм. Необхідно враховувати метеорологічні умови: за сильного вітру застосування хімікатів заборонене через ймовірність знесення аерозолі, а контроль температури й вологості допомагає зменшити випаровування та небажану міграцію речовин. Важливим елементом безпечної експлуатації є наявність у оператора засобів індивідуального захисту — спецодягу, герметичних рукавиць, окулярів, маски або респіратору, що мінімізують контакт із шкідливими сполуками та запобігають гострому чи накопичувальному отруєнню.

Обладнання для розпилення засобів захисту рослин повинно підтримуватися у справному стані та проходити регулярне калібрування, щоб забезпечити рівномірний розподіл робочого розчину по поверхні поля. Такий підхід мінімізує загрозу перевищення норми внесення або випадкового забруднення територій поза межами оброблюваної ділянки. Додатковим заходом екологічної безпеки є створення буферних смуг поблизу чутливих зон – водойм, житлових районів, навчальних закладів чи біотопів. Вони захищають організми, які не є ціллю обробки, від небажаного

впливу хімічних сполук. Після завершення робіт необхідно проводити ретельне миття обладнання, щоб запобігти перенесенню залишків речовин під час наступних операцій. Крім того, правильне зберігання, чітке маркування каністр і безпечне поводження з тарою після використання допомагає уникнути екологічних інцидентів. Важливо також інформувати населення та підтримувати комунікацію з громадами, особливо коли застосовується масштабне обприскування, що може викликати занепокоєння. Дотримання умов безпеки значно зменшує ймовірні ризики, забезпечуючи сталість виробництва та збереження довкілля.

Сучасні обприскувачі мають бути оснащені технологічними рішеннями для протидії знесенню аерозолу, такими як форсунки з індукцією повітря або спеціальні захисні екрани. Доступні системи фільтрації запобігають блокуванню вихідних отворів і сприяють збереженню стабільної форми факела. Високоточне налаштування тиску, швидкості подачі та робочих характеристик форсунок є обов'язковим для дотримання бажаної дози на гектар. Система аварійного відключення обладнання суттєво підвищує рівень захисту від випадкових витоків або пошкоджень під час транспортування агромашин.

Рівномірність розподілу робочої рідини має визначальний вплив на продуктивність та екологічну відповідність польових робіт. Ключовими факторами точного внесення є оптимальне підбирання насадок, стабільність тиску і періодичне калібрування. Розмір крапель, ширина захвату та рівномірність покриття змінюються залежно від конструкції форсунки, тому її вибір має відповідати конкретній операції. Будь-які коливання тиску здатні спровокувати утворення зон надлишкового або недостатнього внесення. Перевірка герметичності системи, стану сопел та фільтрів забезпечує підтримання точності упродовж усього періоду експлуатації. Навіть погодні фактори — напрям і швидкість вітру, температура та вологість — повинні обов'язково враховуватися, адже вони впливають на дрейф крапель та швидкість їх випаровування. Використання систем

точного внесення на основі GPS та регулювання у режимі реального часу за допомогою змінних норм дозволяє адаптувати роботу агротехніки до неоднорідних умов поля. Навчання персоналу, який відповідає за виконання обприскування, є не менш важливим елементом ефективної та безпечної експлуатації обладнання.

Для підвищення продуктивності необхідно, щоб обприскувачі могли працювати у взаємодії з цифровими технологіями землеробства, зокрема навігаційними системами та елементами диференційованого внесення хімічних засобів. Такий підхід дозволяє охопити саме ті ділянки, де культура потребує захисту, знижуючи непродуктивні витрати препаратів і сприяючи сталому розвитку сільськогосподарського виробництва. Орієнтація на легкість обслуговування — ще одна важлива вимога: всі основні вузли повинні швидко діагностуватися і за потреби замінюватися без тривалих перерв у роботі техніки. Обов'язковим залишається й дотримання чинних екологічних приписів і технологічних норм, що перешкоджає забрудненню природних ресурсів.

Узагальнюючи, можна зазначити, що комплекс вимог до обприскувального обладнання підкреслює його роль у гарантованому дотриманні точності, екологічної безпеки, надійності та ефективності процесу внесення. Якісне виконання цих положень забезпечує оптимальне використання засобів захисту рослин, сприяє підвищенню урожайності та водночас скорочує негативний вплив на навколишнє середовище, підтримуючи розвиток сталого землеробства.

1.3 Аналіз досліджень роботи обприскувачів

Застосування засобів захисту рослин становить один із ключових компонентів технології вирощування просапних культур. Впродовж останніх десятиліть масштаби їх використання для боротьби з небажаною рослинністю, шкідливими організмами та патогенами неухильно збільшуються [1]. Дані всебічного аналізу щодо 20 основних

сільськогосподарських культур у проміжку між 1990 та 2021 роками демонструють суттєвий приріст використаних пестицидів: обсяги зросли більш ніж утричі — з 90,0 млн кг активних речовин у 1990 році до близько 290,0 млн кг у 2021-му. У певний проміжок часу, зокрема у 2009 році, спостерігалось незначне зменшення цього показника до 246,1 млн кг [4]. Попри тимчасові коливання, загальна тенденція вказує на постійне збільшення залежності від хімічних засобів контролю, що підкреслює вагомість їхнього внеску у формування загальних витрат на виробництво просапних культур.

Обґрунтоване, технологічно правильне внесення пестицидів є запорукою підтримання стабільної ефективності препаратів і продовження терміну їх результативного використання в агровиробництві. Надзвичайно важливо забезпечувати високу точність розпилення та мінімізувати ризики помилок, що можуть призвести до небажаного забруднення або недостатньої обробки окремих ділянок. Такий підхід сприяє не лише підвищенню продуктивності культур, а й зменшенню негативного впливу на довкілля.

Використання сучасних технологічних рішень у сфері розпилення — наприклад, систем автоматичного регулювання норми, відключення окремих секцій штанги або адресного управління кожною форсункою — є одним із найрезультативніших шляхів до підвищення точності застосування агрохімікатів [4–9]. На ефективність захисних заходів впливають численні елементи технічного оснащення та зовнішні фактори під час обприскування. Особливо критичними є швидкість руху агрегату, тип і конструкція розпилювача, а також розміри формованих краплин робочої рідини. Ці параметри здатні істотно впливати на рівномірність покриття поверхні рослин, ступінь втрати матеріалу та якість осадження крапель [11–14].

Сучасна тенденція розвитку машин для обробки посівів характеризується впровадженням обприскувачів зі збільшеною шириною штанги (понад 26,6 м) і роботою на швидкостях, що перевищують

стандартні експлуатаційні режими (понад 19,3 км/год). Метою такого підходу є скорочення витрат часу та збільшення продуктивності польових робіт. Водночас підвищення швидкості неминуче супроводжується зниженням норми фактично внесеної кількості робочої рідини через зменшення числа крапель, що досягають цільової рослинної поверхні [16].

Динамічні зміни швидкості руху техніки під час проведення обробки також істотно впливають на характеристики розпилення, що проявляється у трансформації розподілу краплин за розмірами та зміні поведінки аерозолі. Збільшення швидкості, як правило, спричиняє формування дрібніших частинок, які набагато легше зносить вітром за межі ділянки обробки. Ряд досліджень підтверджує: підвищення робочої швидкості тісно пов'язане з посиленням дрейфу препарату та зниженням рівня покриття рослин [8,13,15]. Саме тому якість розпилення, яку визначають зокрема за медіанним діаметром краплі (VMD), відіграє вирішальну роль у класифікації типів форсунок. Вона суттєво визначає і рівень ризику знесення частинок, і рівномірність їх осадження на культурі [14].

Зазвичай під час внесення контактних засобів захисту рослин використовують стандартні розпилювальні форсунки з плоским типом сопел (наприклад, Teejet, XRC). Вони формують дрібні частинки робочої рідини, що забезпечує підвищене покриття поверхні листя або ґрунту. Проте використання надмірно малих крапель часто супроводжується вагомою проблемою — збільшенням дрейфу пестицидів, через що широкого поширення набули форсунки типу Вентурі. Такі розпилювачі, що здатні працювати в автоматизованих системах керування, створюють помітно більші за розміром краплини, що значно краще відповідає умовам внесення системних пестицидів і суттєво зменшує ризику зносу краплин у процесі обробки посівів [18].

У наукових роботах низка дослідників повідомляє про підвищену здатність форсунок із інтелектуальним управлінням контролювати дрейф крапель [14, 17], а також про порівняне або подекуди навіть краще покриття

об'єкта і ефективність у порівнянні з традиційними плоскоструминними розпилювачами [13, 20]. Тому вибір форсунки має бути ретельно обґрунтованим, щоб досягти оптимальної будови факела розпилення та знайти належний баланс між рівнем покриття і мінімізацією втрат препарату за рахунок зносу [20–24].

Зміни робочої швидкості агрегату разом з людськими факторами підвищують імовірність порушення заданої норми внесення. Утім, утримання правильної подачі пестициду (в л/га) є надзвичайно важливим, щоб рослини отримували необхідну кількість діючої речовини (кг/га) і забезпечувалося достатнє покриття для досягнення бажаної біологічної дії.

Протягом останніх десятиліть у галузі механізації було впроваджено велику кількість технологій точного розпилення, які нині доступні для інтеграції у польові обприскувачі для підвищення точності дозування. Одне з найбільш поширених рішень — система контролю норми внесення, що компенсує похибки роботи класичних обприскувачів. Вона регулює витрату рідини, підтримуючи стабільне дозування незалежно від зміни швидкості руху. Все ж таки варто враховувати, що коригування подачі відбувається через зміну тиску, а це неодмінно впливає на дисперсність крапель. Для розпилювачів із фіксованим діаметром сопла збільшення тиску спричиняє формування значно дрібніших крапель, що з одного боку може позитивно впливати на площу покриття, але водночас суттєво підвищує ймовірність дрейфу [25].

Задля усунення цього мінуса у сучасних машинах усе частіше застосовують системи, де об'єм подачі рідини змінюється залежно від швидкості руху за рахунок керування тривалістю відкриття кожної форсунки (циклом навантаження). При цьому тиск та, відповідно, розмір крапель залишаються стабільними, що дозволяє зберегти якість розпилення.

Аналіз літератури показав, що більшість дослідницьких робіт, присвячених впливу типу сопла або швидкості обприскування, здебільшого концентрується на варіабельності покриття та ризиках дрейфу. Натомість

характеристики робочого розчину та їхня зміна в залежності від використання певних технологій розпилення часто залишалися поза увагою. Крім того, у багатьох випадках не вивчалось, як технології, що вже присутні на ринку (зокрема регулятори норми), впливають на результативність розпилення в умовах різних швидкостей.

Сьогодні велика кількість сільськогосподарських обприскувачів традиційного типу, особливо призначених для малих площ або нішевих культур, усе ще функціонує без систем автоматичного регулювання норми. Водночас більшість сучасних машин, зокрема самохідних агрегатів, оснащені таким обладнанням.

Тому для підвищення ефективності застосування пестицидів як на звичайних, так і на технологічно удосконалених обприскувачах необхідно оцінити їхню роботу в умовах різних швидкісних режимів. Саме тому завданням цієї наукової роботи було визначення показників осадження крапель та загальної якості розпилення для причіпного обприскувача залежно від зміни швидкості руху як з увімкненим регулятором норми внесення, так і при ручному управлінні.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обладнання та його застосування

Полюві випробування в межах цього дослідження виконували у 2024–2025 роках. Для внесення гербіцидів було застосовано причіпний штанговий обприскувач марки Demco X-fold (рис. 1а). Конструкція агрегата передбачала робочу ширину 18,4 м, а форсунки розташовувалися по довжині штанги на рівномірній відстані 44 см одна від одної.

На початковому етапі робіт обприскувач функціонував без системи автоматичного регулювання норми, однак згодом до нього під'єднували контролер витрати Micro-Trak MT-2405F, працюючий у комплексі з керуючим клапаном TeeJe 335BPR-2F-04. Зазначене обладнання було використане під час проведення дослідів 2024 року (відповідно рис. 1b та 1c).

У всіх варіантах досліджень забезпечували ідентичні параметри внесення, зокрема висота розташування штанги над поверхнею посівів та тип використаних форсунок залишалися однаковими незалежно від конфігурації машини. Таким чином, єдиною відмінністю між двома підходами була наявність або відсутність контролера норми подачі робочої рідини.

Для зручності подальшого опису в роботі ці режими експлуатації обприскувача надалі позначаються скорочено:

- CNS — варіант без автоматичного контролера норми,
- SRC — варіант зі встановленим регулятором витрати.

Для того щоб здійснити оцінювання та провести порівняння якості обприскування між системами CNS та SRC, внесення гербіцидів проводили на передпосівно підготовленому полі, застосовуючи п'ять різних швидкісних режимів руху техніки: 9,7; 12,9; 16,1; 19,3 та 22,5 км/год. Додатково використовували три варіанти форсунок — XRC, AIXR і TTI (зображені на рисунках 2а, 2b та 2с). Такі типи розпилювачів було підібрано

для забезпечення формування крапель потрібного калібру — від середнього до великого та навіть надвеликих розмірів — відповідно до вимог стандарту ASABE S572.1 [15]. Всі форсунки, залучені до експерименту, характеризувалися однаковим кутом розпилення — 110° та мали отвір типорозміру 04. Розташування розпилювачів по довжині штанги було організовано рівномірно й упорядковано у визначеній послідовності ліворуч направо (рис. 1а), а саме: спочатку XRC, потім AIXR та наприкінці ТТІ.



Рис. 1 - (а) Обприскувач зі складною штангою Demco X-fold, який використовувався для тестування ефективності розпилення. (b) Контролер норми Micro-Trak MT-2445F і (c) регулятор TeeJet 335BPR-2F-04

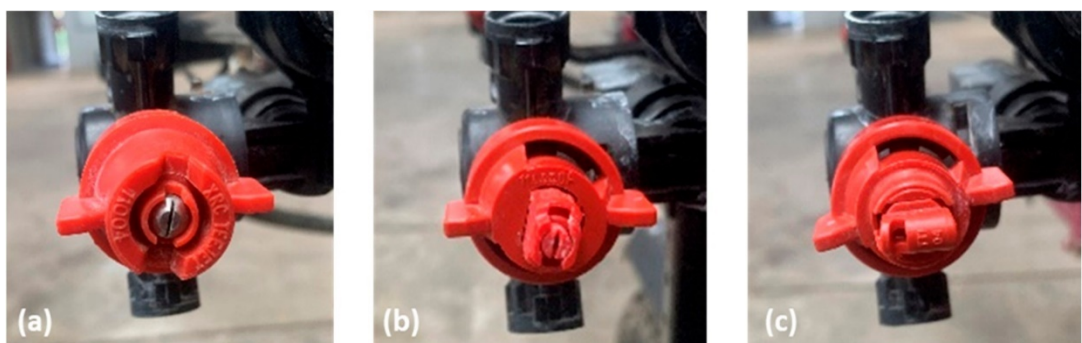


Рис. 2 - Три різні типи насадок: TeeJet (a) XRC 1104; (b) AIXR 1106; та (c) ТТІ 11,05

Під час проведення експериментів кожна форсунка здійснювала обприскування шести посівних рядків (із міжряддями 0,91 м), що разом формували робочу смугу приблизною шириною 5,5 м та довжиною від 180 до 200 м, фактично дорівнюючи протяжності всього поля. У кожному сезоні попередньо виконувалося калібрування обприскувального обладнання для досягнення норми внесення 187 л/га робочої рідини за швидкості руху 9,7 км/год і тиску 207 кПа при використанні сопел розміру 04. Під час дослідження необхідні режими внесення забезпечували, змінюючи швидкість пересування агрегату, водночас залишаючи незмінними тип і параметри розпилювальних наконечників упродовж усього періоду польових випробувань кожного з років.

2.2 Розпилення та збір даних

Протягом обох років досліджень здійснювали два види обробки посівів гербіцидами — до появи сходів і після їх утворення. Перший етап обприскування відбувався під час або одразу після висіву культури, але до появи рослин на поверхні ґрунту. Другий етап хімічного захисту проводили орієнтовно через три–чотири тижні після початкової обробки, коли вже були сформовані сходи.

Таблиця 1 - Інформація про різні гербіциди та їхні відповідні дози діючих речовин, застосовані під час випробувань обприскування, проведених у 2024 та 2025 роках.

Обробіток	Гербіцид	Активний інгредієнт	Норма, кг/га
Досходовий	Prowl	Pendimethalin	1,06
Післяходовий	Valor	Flumioxazin	0,11
Досходовий	Cadre	Imazapic	0,07
Післяходовий	Dual Magnum	S-metolachlor	0,90

У таблиці 1 представлено докладний план використання препаратів для боротьби з бур'янами: зазначено назви засобів, строки внесення та відповідні кількості діючих речовин, застосованих на ділянках у рамках

експериментів 2024–2025 років. Таким чином, таблиця узагальнює повну інформацію про гербіцидні обробки, реалізовані в польових умовах упродовж двох сезонів.

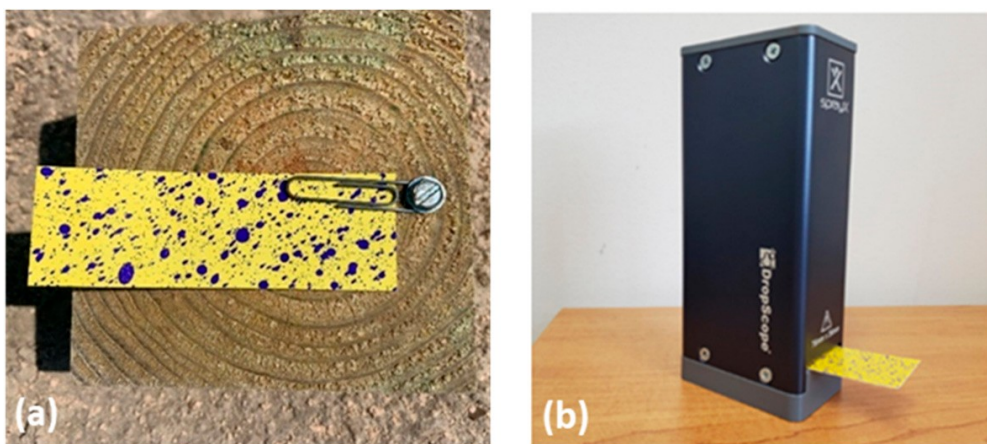


Рис. 3 - (а) Ілюстрація установки збору даних (дерев'яний брусок і водочутливий папір), що використовується в полі, і (b) інструмент DropScope, який використовується для аналізу водочутливого паперу

Для збору інформації використовували дев'ять дерев'яних підставок, кожна з яких була обладнана металевою скріпкою у верхній частині для закріплення індикаторного паперу (рис. 3а). Ці бруски розташовували на поверхні ґрунту за принципом прямокутної сітки розмірами 5,5 × 15,2 м перед кожним внесенням гербіцидів на дослідній ділянці. У межах сформованої сітки елементи розкладали на відстані 15,2 м один від одного вздовж напрямку руху обприскувача, причому кожний поздовжній ряд вважався повторенням досліді. Перпендикулярно до цього, уздовж робочої ширини штанги, відстань між брусками становила 1,8 м. Таким чином, одна сітка у конфігурації 3×3 охоплювала одразу шість посівних рядків і використовувалася для фіксації результатів під час роботи конкретного типу форсунок обприскувача. Перед кожним проходом техніки на всі планки закріплювали індикаторні смужки розміром 26 × 76 мм, щоб забезпечити точну реєстрацію покриття краплями під час внесення робочого розчину.

Таблиця 2 - Метеорологічні умови, зареєстровані під час випробування

Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с
20.8	56.4	0.6

Гербіцид попередньо розводили у воді, яка слугувала основним розчинником, забезпечуючи потрібну концентрацію препарату (табл. 1). Після підготовки робочої суміші проводили обприскування, змінюючи швидкість пересування агрегату залежно від режиму досліду. Чутливі до краплин паперові індикатори після кожного проходу обприскувача залишали висихати на відкритому повітрі кілька хвилин, а згодом акуратно складали у спеціальні пронумеровані конверти. Такий підхід дозволяв уникнути пошкодження або деформації від вологості чи механічного впливу. Після завершення польового етапу всі отримані зразки транспортували до лабораторного приміщення, де вони підлягали подальшому детальному вивченню.

Під час проведення досліджень упродовж кожного сезону постійно контролювали атмосферні показники: швидкість повітряного потоку (м/с), температуру навколишнього середовища (°C), напрям вітру, рівень відносної вологості (%), а також температуру точки роси (°C). Вимірювання здійснювали щохвилини з використанням локально встановленої метеостанції (модель Vantage 6357), яка автоматично реєструвала всі параметри протягом усього процесу розпилення. Середні величини за час проведення обробки представлені у таблиці 2.

2.3 Аналіз даних

У лабораторних умовах зразки чутливого паперу піддавали скануванню за допомогою спеціалізованого обладнання DropScore (рис. 3b) у поєднанні з програмним модулем SprayX. За допомогою цієї системи визначали параметри покриття робочим розчином, кількість краплин на

площі та характеристики процесу розпилення, зокрема показники D0.1, D0.5/VMD та D0.9. Під терміном «покриття» мається на увазі частка поверхні, на яку потрапили краплини препарату, тоді як щільність розпилу — це число окремих крапель на одиницю площі. Показник D0.5 (або VMD) відображає діаметр краплини, при якому 50% об'єму розпиленої рідини представлено частинками, меншими за цю величину, а інша половина — більшими; фактично приблизно 52% загального об'єму препарату зосереджено в краплинах, діаметр яких менший за це значення.

Аналогічно для параметрів D0.1 та D0.9: відповідно 11% і 91% рідини припадає на краплі, розмір яких нижчий за наведені межі. Загальна якість розпилювання оцінюється за класифікацією розміру краплин, заснованою на стандарті ASABE S572.3, використовуючи VMD як ключовий показник. Під час кожного аналізу паперових індикаторів процес розпилення відносили до певного класу: від дуже дрібного VF (61–105 мкм), дрібного F (106–235 мкм), середнього M (236–340 мкм), грубого C (341–403 мкм), дуже грубого VC (404–502 мкм), надзвичайно грубого EC (503–665 мкм) до надвеликих UC (>665 мкм) [18].

ПЗ SprayX розраховувало коефіцієнти покриття та інші залежні параметри згідно з методикою ASABE S572.1, формуючи значення D0.1, D0.5, D0.9 і характеристику розміру краплин для кожного дослідження окремо. Для подальшої обробки інформації використовували програму JMP Pro версії 16.0.0, що забезпечувала повноцінний статистичний аналіз отриманих вибірок.

Результати статистичного тестування зазначили відсутність суттєвих відмінностей у впливі обробки до та після появи сходів на жоден із виміряних параметрів ($p > 0,05$). Таким чином, дані для обох етапів поєднували для подальших розрахунків у межах кожного року спостережень.

Оскільки ключовим завданням роботи було оцінити, як зміна швидкості руху машини впливає на величину осадження та якість

розпилення для систем CNS і SRC, усі показники аналізували окремо для кожної форсунки. Це дозволило уникнути впливу перехресних взаємодій між типами розпилювачів та швидкісними режимами руху техніки. Подальший дисперсійний аналіз проводили, розглядаючи швидкість руху як основний чинник для конкретної форсунки. У випадках, коли вплив фактора був доведений як статистично значущий, різницю між середніми значеннями оцінювали із застосуванням t-критерію Стюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Аналіз показників розпилення

У таблиці 3 подано отримані р-значення дисперсійного аналізу для показників осадження крапель, тобто ступеня покриття поверхні розпилком і кількості відкладених краплин, порівняних між режимами CNS та SRC із використанням трьох різних моделей форсунок, залучених у цьому експерименті. У випадку режиму CNS робоча швидкість агрегату виявила статистично значущий вплив на рівень покриття розпилюваною рідиною: із зростанням швидкості руху відмічалось постійне зниження відсотка площі, що підлягала обробці (див. таблицю 4). Аналогічний характер зміни показника фіксувався для всіх досліджуваних типів форсунок — XRC, AIXR і TTI — коли швидкість обприскувача підвищувалася з 9,5 км/год до 23,5 км/год, що підтверджує загальну тенденцію до зменшення ефективності покриття із прискоренням руху техніки.

Таблиця 3 - Результати дисперсійного аналізу (р-значення) для покриття розпиленням і кількості крапель розпилення за типом сопла для CNS і SRC.

Тип форсунки	CNS	SRC	CNS	SRC
XRC	<0,0001 *	NS	0,0002 *	NS
AIXR	<0,0003 *	0,016 *	NS	0,0027 *
TTI	<0,0002 *	NS	0,0042 *	NS

Таблиця 4 - Вплив швидкості руху на покриття розпилення (%) і кількість крапель розпилення за типом форсунки для CNS

Робоча швидкість, км/год	Покриття			Кількість крапель		
	XRC	AIXR	TTI	XRC	AIXR	TTI
9,7	40,1	35,9	26,3	5746	2733	905
12,9	29,7	29,5	23,4	4933	3089	601
16,1	23,5	22,0	17,0	4589	2074	404
19,3	16,0	21,0	14,1	2819	2921	604
22,5	11,3	18,0	9,4	2363	2955	566

Таблиця 5 - Вплив швидкості руху на покриття розпилення (%) і кількість крапель розпилення за типом форсунки для SRC

Робоча швидкість, км/год	Покриття			Кількість крапель		
	XRC	AIXR	TTI	XRC	AIXR	TTI
9,7	41,0	43,5	37,5	6845	2441	1325
12,9	50,8	49,4	34,3	7893	5736	1677
16,1	46,9	37,9	35,7	8626	3371	2263
19,3	34,5	25,2	31,2	7355	3366	2092
22,5	37,2	32,1	28,0	8218	5970	2334

Серед усіх випробуваних типів форсунок найвищий рівень покриття робочої поверхні краплями (40,1; 35,9 та 26,3% для XRC, AIXR і TTI відповідно) був визначений при найнижчій швидкості руху агрегату — 9,7 км/год. Варто зауважити, що саме ця швидкість застосовувалася як контрольна під час калібрування розпилювача перед проведенням дослідів. Натомість при максимальній швидкості пересування обприскувального обладнання — 22,5 км/год — відмічено найменший рівень покриття: 11,3; 18,0 і 9,4% відповідно для моделей XRC, AIXR і TTI.

Таке різке зменшення площі покриття при роботі без автоматичного регулювання подачі (CNS) було цілком закономірним, адже підвищення швидкості приводить до зменшення кількості крапель, що потрапляють на одиницю площі. Це пояснюється тим, що тиск у системі та швидкість подання робочої рідини залишаються на рівні, встановленому під час калібрування, і не коригуються залежно від зміни швидкісного режиму. Зниження густини крапель зі зростанням швидкості чітко простежується за даними, наведеними у таблиці 4. Проте подібні закономірності спостерігали лише для форсунок XRC і TTI.

На відміну від них, форсунки AIXR демонстрували відмінну поведінку: хоча покриття зменшилося від 35,9% при 16,1 км/год до 18,0% при 22,5 км/год, загальна кількість крапель залишалася майже на однаковому рівні для різних швидкостей. Як уже підкреслювалося, зазвичай скорочення площі покриття супроводжується одночасним зменшенням кількості крапель, якщо відсутнє автоматичне коригування витрати робочої

рідини, тому отримані дані для AIXR можна вважати нетиповими та дещо несподіваними.

За даними джерела [16], швидкість руху є одним із ключових параметрів, що визначає стабільність норми внесення, і тому перед розпиленням препаратів необхідно ретельно встановлювати оптимальну швидкість роботи обприскувача. Результати, отримані для варіанту роботи без регулятора (CNS), підтвердили значущість правильного вибору швидкісного режиму в польових умовах. Аналогічно до наведеного для XRC і ТТІ, зростання швидкості понад еталонні 9,7 км/год закономірно зменшувало ефективність покриття через зниження фактичної норми внесення. Айерс та співавт. [5] також повідомляли, що при використанні обприскувачів без регулятора норми виникають значні похибки розподілу залежно від зміни швидкості руху.

У системі з автоматичною компенсацією (SRC) ситуація була більш стабільною: рівень покриття для XRC та ТТІ практично не змінювався при збільшенні швидкості руху від 9,7 до 22,5 км/год (див. табл. 5), тоді як кількість крапель демонструвала певні коливання, але середні значення не мали статистично значущих відмінностей ($p > 0,05$). Щодо форсунок AIXR, то й у цьому випадку збільшення швидкості дало суперечливі результати — зниження відсотка покриття супроводжувалося непостійною динамікою кількості крапель, яка змінювалася без чітко вираженого закономірного тренду.

Під час застосування засобів захисту рослин на полі при зміні швидкості руху техніки система автоматичного керування нормою внесення забезпечує підтримання заданої дози, коригуючи тиск у системі розпилювання та, як наслідок, інтенсивність подачі робочої рідини через сопла [23]. Випробування форсунок типу XRC і ТТІ підтвердили надійну роботу такої технології: особливо форсунки XRC продемонстрували стабільну якість покриття поверхні у всьому діапазоні швидкостей, який використовувався під час експерименту. Аналогічні результати щодо

високої точності дозування розпилення при застосуванні контролера швидкості були встановлені й іншими дослідниками [5; 7]. Вони підкреслювали, що впровадження електронної системи регулювання обприскувача значною мірою знижує похибки у витратах робочого розчину, гарантуючи підтримання запланованої норми внесення за різних швидкісних режимів.

Зменшення помилок внесення безпосередньо пов'язане з рівномірнішим розподілом крапель на цільовій поверхні, що також було встановлено в межах цього дослідження. Хоча дані свідчать про певне збільшення кількості утворених крапель із підвищенням швидкості від 9,7 до 22,5 км/год для обох видів форсунок — XRC і TTI (див. табл. 5), статистично достовірного впливу цієї зміни зафіксовано не було ($p > 0,05$). У разі використання контролера подачі збільшення швидкості руху призводить до підвищення робочого тиску, що, своєю чергою, викликає утворення дрібніших крапель. Зазвичай такі дрібні краплі забезпечують щільніше покриття рослин, порівняно з більшими частинками рідини, проте вони схильні до знесення вітром і втрати точності обробки на високих швидкостях.

Результати для форсунок типу AIXR — як за даними CNS, так і SRC — продемонстрували неоднозначність дії при зміні швидкості руху та менш передбачувану якість розпилення порівняно з форсунками XRC і TTI. Це може свідчити про складнішу реакцію AIXR на збільшення тиску, і потребує додаткових досліджень щодо поведінки крапель у різних режимах роботи обприскувача.

3.2 Якість спрею

У таблиці 6 наведено р-значення, отримані в результаті дисперсійного аналізу ANOVA для показників якості розпилення — D0.1, D0.5 та D0.9 — при застосуванні CNS і SRC для трьох різновидів форсунок, що використовувалися під час дослідження. Значення D0.1, D0.5 і D0.9

характеризують діаметри крапель у мікрометрах, при яких 11%, 52% та 92% відповідно від загального об'єму розпилюваної рідини міститься в частинках меншого розміру. Для системи CNS швидкість руху машини мала статистично значущий вплив на показник D0.1 для всіх досліджуваних форсунок. Водночас для діаметрів D0.5 і D0.9 вплив зміни швидкості переважно не проявлявся, за винятком показника D0.5 для насадки AIXR (див. табл. 7). Виявлена закономірність демонструє зменшення D0.2 при збільшенні швидкості руху незалежно від конструкції форсунки. Для AIXR додатково зафіксовано зниження значення D0.6 зі зростанням швидкості.

На рисунку 4 представлено графічне зіставлення характеристик розпилення, зокрема класифікації розміру крапель на основі VMD, для насадок XRC, AIXR та ТПІ за різних швидкісних режимів, використаних у варіанті CNS. Аналізуючи діаграми, можна чітко простежити послідовну зміну дисперсності факелу розпилення зі зростанням швидкості для кожного типу розпилювачів. Зокрема, для XRC найбільш виражені відмінності зафіксовано в дрібнокрапельних категоріях VF та F: частка крапель класу F збільшилася з 2,5% до 5,8%, а крапель VF — із 12,6% до 19,0% при зростанні швидкості обприскувача з 9,7 до 22,5 км/год.

Аналогічні тенденції було виявлено й у форсунок AIXR та ТПІ: найбільше зменшення продемонстрували краплі категорії UC, а за ними – фракції F, VF і M. Так, коли швидкість зросла з 9,7 до 22,5 км/год, частка крапель UC знизилася на 12,8% у обприскувача з форсункою AIXR та на 14,5% у варіанті з ТПІ. Оскільки робочий тиск у системі CNS залишався стабільним для всіх швидкостей, виявлені відмінності у дисперсному складі можна пояснити загальним скороченням кількості крапель, що потрапляють на одиницю площі під час швидшого руху обприскувача. Це узгоджується з результатами, наведеними у таблиці 4. Здійснений аналіз літературних джерел показав, що наукових робіт, присвячених саме впливу коливань швидкості пересування на комплексні показники якості розпилення в

широкому діапазоні крапель — від VF до UC — наразі бракує, що підкреслює актуальність напряму проведеного дослідження.

Таблиця 6 - Результати ANOVA (р-значення) для D0.1, D0.5 і D0.9 за типом сопла для CNS і SRC.

Впливи	D0.1		D0.5		D0.9	
	CNS	SRC	CNS	SRC	CNS	SRC
XRC	0,0101 *	NS	NS	NS	NS	NS
AIXR	0,0115 *	0,004 *	0,0317 *	0,0014 *	NS	NS
TTI	0,0096 *	NS	NS	NS	NS	NS

* означає значні впливи ($p < 0,05$), а NS означає незначущі впливи ($p > 0,05$).

Отже, отримані результати поки що неможливо безпосередньо зіставити з раніше опублікованими дослідженнями, що стосувалися впливу швидкості руху техніки на процес утворення та осідання крапельного аерозолі. Водночас наведені експериментальні дані можуть стати важливою основою для порівняння, а також для подальшої верифікації висновків у майбутніх роботах, спрямованих на оцінювання ефективності процесів розпилення засобів захисту рослин у схожих умовах.

Для системи SRC не виявлено суттєвого впливу швидкості пересування обприскувача на параметри розподілу розмірів крапель D0.2, D0.6 і D0.8 у випадку використання форсунок типів XRC та TTI (див. табл. 6). Разом з тим для насадки AIXR встановлено відчутний статистично значущий вплив цього фактора на значення D0.2 і D0.6: при зростанні швидкості руху з 9,6 км/год до 23,5 км/год спостерігалось поступове зменшення вказаних показників (табл. 8).

Аналогічні тенденції зі зниженням величин D0.2, D0.6 і D0.8 були помічені і для форсунок XRC та TTI, однак у цих випадках зміни не досягали статистичного рівня значущості ($p > 0,04$), що не дає підстав стверджувати про чітко виражений ефект швидкості руху агромашини на формування спектра крапель у зазначених варіантах.

Таблиця 7 - Вплив дорожньої швидкості на D0.1, D0.5 і D0.9 за типом сопла для CNS

Тип насадки	Швидкість, км/год	D0.1, мкм	D0.5, мкм	D0.9, мкм
XRC	9,7	205,8	420,4	719,3
	12,9	180,2	350,6	687,5
	16,1	174,4	374,4	713,0
	19,3	178,4	374,5	697,0
	22,5	164,6	399,5	774,1
AIXR	9,7	338,0	822,6	1385,3
	12,9	330,0	841,8	1410,7
	16,1	329,4	818,3	1435,3
	19,3	271,1	719,1	1561,4
	22,5	244,5	692,1	1405,0
ГТІ	9,7	617,1	1396,5	1975,0
	12,9	663,0	1319,7	2397,0
	16,1	659,5	1486,7	2467,0
	19,3	556,3	1229,3	2019,3
	22,5	412,1	985,7	1607,2

Рис. 5 ілюструє якість розпилення з точки зору класифікації розміру крапель за типом сопла при різних швидкостях руху для SRC.

Форсунка моделі XRC показала істотне зростання частки дуже дрібних (VF) та дрібних (F) крапель у загальній структурі спектра розпилення: частка F-крапель збільшилася з 12,0% до 19,8%, а VF-крапель — із 19,3% до 29,8% при підвищенні швидкості руху обприскувача від 9,7 до 22,5 км/год. Натомість частина більш грубих крапель UC та EC

зменшилася на 14,8% і 9,9% відповідно при тих самих умовах випробувань та збільшенні швидкісного режиму.

Аналогічний характер змін зареєстровано і для форсунок типів AIXR та ТТІ: із підвищенням швидкості руху відмічено поступове збільшення вмісту менших за розміром краплин (VF і F), тоді як частка крапель із грубшим спектром (EC та UC) демонструвала тенденцію до зниження. Таким чином, зростання швидкості переміщення техніки під час обробки посівів сприяло зміщенню спектра розпилення у бік формування більш дрібної фракції.

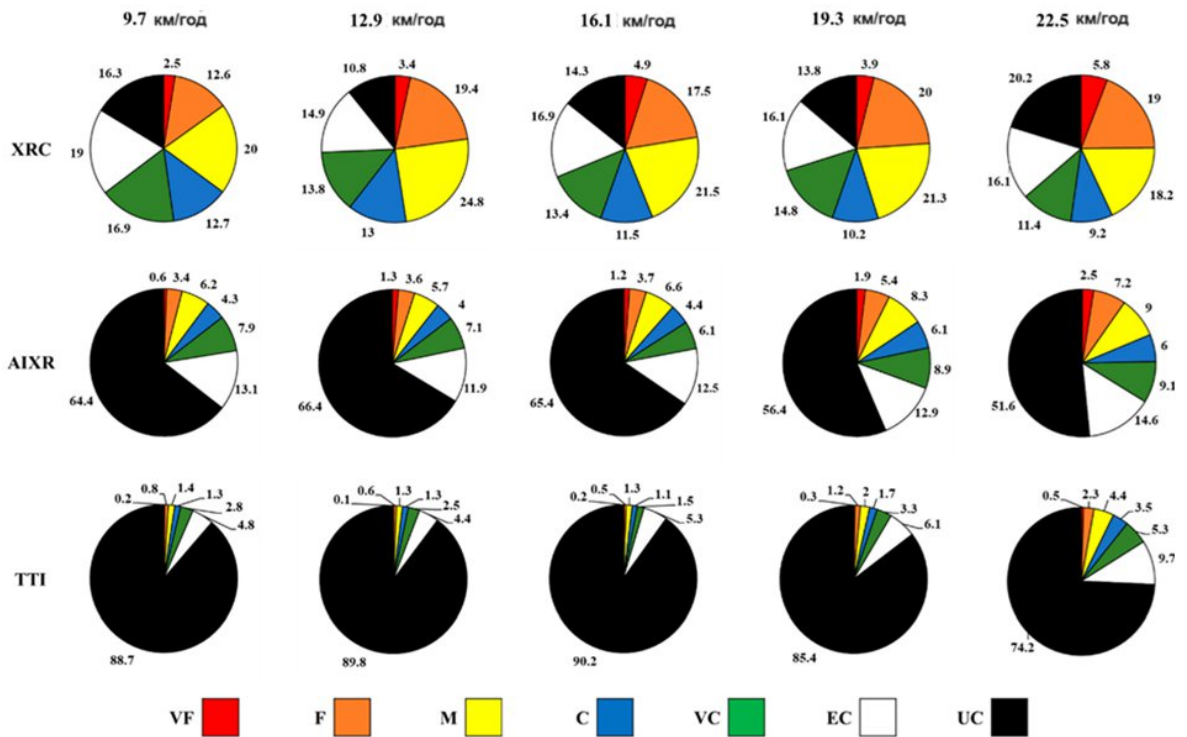


Рис. 4 - Якість розпилення (класифікація розміру краплі на основі медіанного діаметра об'єму) для форсунок XRC, AIXR і ТТІ на різних швидкостях руху для CNS

Оскільки під час обробки на системі SRC застосовувався автоматичний регулятор подачі, отримані результати є логічними та цілком передбачуваними. Підвищення швидкості руху машини компенсується збільшенням тиску в системі, завдяки чому підтримується необхідна норма внесення. Однак зростання тиску через один отвір форсунки призводить до

формування значно дрібніших частинок розпилу, що було зафіксовано для всіх трьох конфігурацій розпилувачів, задіяних у досліді.

Таблиця 8 - Вплив робочої швидкості на D0.2, D0.6 і D0.8 за типом сопла для SRC

Тип насадки	Швидкість, км/год	D0.1, мкм	D0.5, мкм	D0.9, мкм
XRC	9,7	195,5	385,3	693,1
	12,9	200,7	382,5	680,4
	16,1	189,0	388,8	667,0
	19,3	175,0	331,3	583,7
	22,5	175,0	323,3	548,9
AIXR	9,7	350,5	818,2	1320,8
	12,9	282,5	693,9	1281,3
	16,1	279,3	608,3	1099,5
	19,3	251,2	571,9	1152,6
	22,5	224,4	550,3	1040,0
TTI	9,7	572,9	1236,0	1897,6
	12,9	416,0	944,0	1602,2
	16,1	385,6	916,0	1584,3
	19,3	397,4	877,2	1452,9
	22,5	333,0	756,4	1601,7

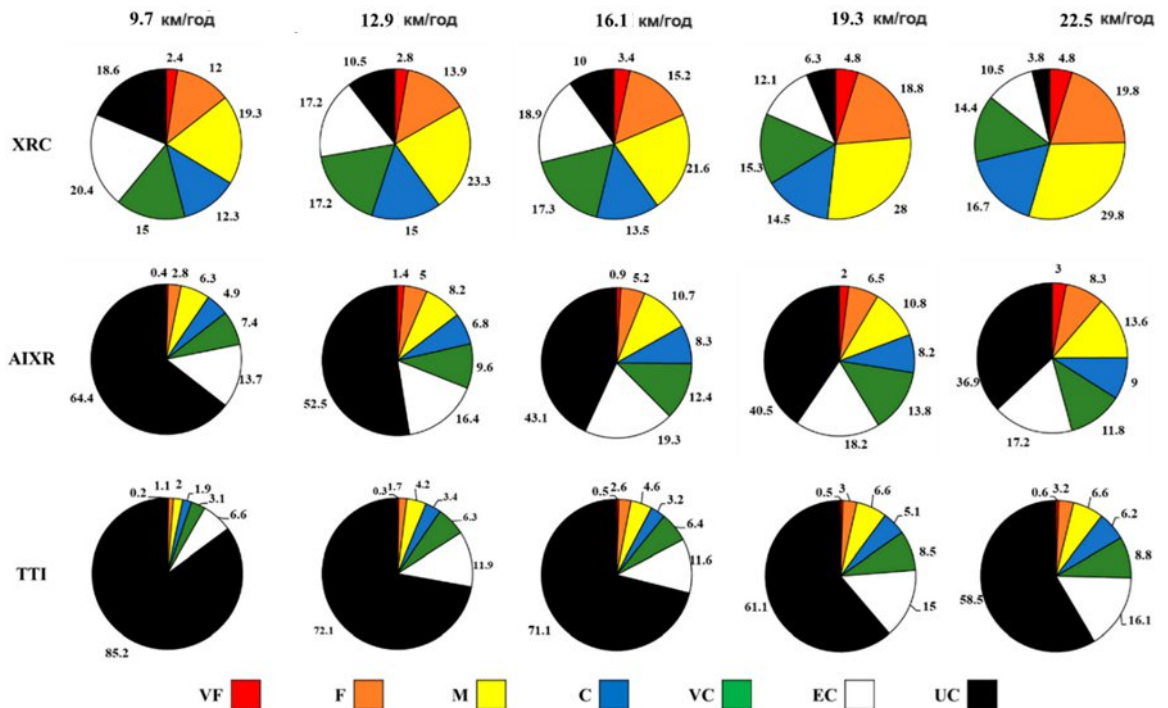


Рис. 5 Якість розпилення (класифікація розміру краплі на основі медіанного діаметра об'єму) для форсунок XRC, AIXR і TPI на різних швидкостях руху для SRC

Представлені емпіричні дані також підтверджують факт суттєвого зниження якості утворюваного спектра крапель на високих швидкісних режимах порівняно зі швидкістю 9,7 км/год — саме при ній обприскувач було налаштовано на досягнення цільової норми та оптимального розміру крапель. Хоча залежність якості розпилення від швидкості була зафіксована як для традиційної системи CNS, так і для SRC, саме в SRC спостерігалися значно виразніші коливання, що пов'язано з динамічними змінами тиску під час збільшення швидкості руху агрегату.

Разом із загальним зменшенням ефективності розпилювача, інтенсифікація руху техніки за технологією SRC підсилює ймовірність дрейфу робочої рідини за межі цільової оброблюваної поверхні. Причиною цього є підвищена схильність дрібнодисперсних крапель до перенесення вітром. Відповідно до результатів, відображених на рисунку 5, ця проблема найбільш характерна для розпилювачів типу XR, оскільки саме вони формують найбільшу кількість частинок дуже малого діаметра (V та F-фракції) на підвищених швидкостях серед усіх форсунок, випробуваних у межах експерименту.

ВИСНОВКИ

Ефективність розпилення двох різних налаштувань розпилювача (CNS і SRC) була оцінена при різних швидкостях руху шляхом оцінки осадження та якості розпилення для трьох типів форсунок (XC, AR і TI). З результатів, отриманих у дослідженні, можна зробити наступні висновки:

1. Для CNS збільшення швидкості руху зменшило кількість крапель спрею, що наноситься на одиницю площі, і, отже, зменшило осадження спрею;

2. Для CNS якість крапель спрею та осадження спрею були більш узгодженими серед робочих швидкостей через коригування швидкості потоку (і, відповідно, зміни тиску спрею) контролером норми зі збільшенням швидкості руху;

3. Як для CNS, так і для SRC спостерігалися зміни якості розпилення (різниця в розподілі крапель за розміром) зі збільшенням швидкості руху. Однак ці варіації були більшими для SRC через зміни тиску розпилення зі швидкістю руху;

4. Серед типів форсунок тенденції осадження та якості розпилення були подібними для форсунок XRC і ETI, що спостерігалось в кожній установці розпилювача (CNS і SC). Форсунка AIXR показала суперечливе осадження та якість розпилення, коли швидкість руху змінювалася.

5. Наслідки та майбутні дослідження Як показують результати цього дослідження, зміни швидкості руху під час застосування пестицидів є звичайним явищем і можуть суттєво вплинути як на осадження, так і на якість.

Недостатнє покриття може призвести до зниження ефективності пестицидів, що призведе до поганого контролю над шкідниками. Результати цього дослідження свідчать про те, що сільськогосподарські обприскувачі, обладнані контролером норми, можуть забезпечувати адекватне та послідовне осадження, коли відбуваються коливання швидкості руху під

час застосування пестицидів. Дослідження також підкреслює одне з обмежень, пов'язаних із контролером норми, яке полягає в погіршенні якості розпилення та утворенні більш чутливих до дрейфу дрібних крапель розпилювача через збільшення тиску розпилення зі швидкістю руху. Це більше стосується застосувань пестицидів, які вимагають використання певного розміру крапель для досягнення належного покриття, наприклад краплі дрібного та середнього розпилення для застосування фунгіцидів, або для пом'якшення зносу розпилення, наприклад ультрагрубі краплі для застосування ауксинових гербіцидів.

Зведення до мінімуму дрейфу розпилювача при збереженні адекватного покриття розпиленням є складним, але важливим моментом для ефективного застосування пестицидів. Таким чином, для ефективного використання технології слід завжди дотримуватися найкращих практик управління, включаючи правильний вибір форсунок і застосування в межах номінального діапазону швидкості руху. Крім того, оскільки передові технології розпилення, такі як системи, які підтримують постійний тиск розпилення, а також регулюють потік для досягнення цільової норми внесення, доступні сьогодні для використання на сільськогосподарських обприскувачах, майбутні дослідження повинні вивчити вплив системи на осадження розпиленням і якість під час застосування пестицидів.

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.; Kraszkievicz, 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