

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ДВОРСЬКИЙ ДАВИД ПАВЛОВИЧ

УДК 631.3.02:631.3.04

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
РЕГУЛЯТОРІВ ВИТРАТИ РОБОЧОЇ РІДИНИ ОБПРИСКУВАЧІВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. П. Дворський

Керівник роботи

Білецький В. Р.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Дворський Давид Павлович. Дослідження ефективності застосування регуляторів витрати робочої рідини обприскувачів. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Дослідження було проведено для самохідного обприскувача зі штангою з автоматичним регулюванням норми внесення відповідно до параметра відхилення від норми внесення. У дослідженні розглядалось низьковитратне обприскування із фіксованою нормою внесення 150 л/га у трьох робочих режимах самохідного обприскувача: Робочий режим 1– 10 км/год, режим 2– 13 км/год та режим 3 – 15 км/год.

За допомогою вологоміра ґрунту AM-128 SOIL було виміряно миттєву вологість ґрунту у досліджуваній ділянці, щоб оцінити її вплив на роботу обприскувача. Застосований одновимірний аналіз дисперсії (Univariate ANOVA) показав наявність значущих відмінностей ($p < 0,05$) між обраними робочими режимами обприскувача. Проведений аналіз виявив низхідний, слабкий зв'язок між швидкістю роботи обприскувача (SWS) та вологістю ґрунту (SM) для трьох робочих режимів.

Суттєву залежність було виявлено між робочою швидкістю та відхилення від норми внесення, тобто із збільшенням SWS значення рівномірності зменшується. Було порівняно два типи регресійних моделей (лінійну та кубічну) при $p < 0,05$ для визначення зв'язку між швидкістю та рівномірністю у трьох робочих режимах. Кубічна модель у режимі 2 13 км/год показала високим коефіцієнтом ($R^2 = 0,937$) та найкраще описує досліджувані параметри.

Ключові слова: *хімічний захист рослин; норма внесення; налаштування, обприскувач, штангою; результати досліджень.*

ABSTRACT

Dvorskyi Davyd. Investigation of the Efficiency of Using Flow Rate Regulators of Sprayer Working Fluid. – *Qualification thesis (manuscript).* Master's qualification thesis for the degree of Master in Specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The experiment was carried out using a self-propelled boom sprayer equipped with an automatic system that regulates the application rate based on deviations from the target value. The study focused on low-volume spraying with a constant application rate of 150 l/ha across three operating modes of the sprayer: mode 1 – 10 km/h, mode 2 – 12 km/h, and mode 3 – 15 km/h.

Soil moisture at the test site was measured in real time using a moisture meter to evaluate its effect on sprayer performance. Univariate ANOVA indicated statistically significant differences ($p < 0.05$) between the examined operating modes. The analysis revealed a weak but decreasing correlation between the machine's travel speed and soil moisture for all three modes.

A significant relationship was also observed between the sprayer's working speed and deviations from the intended application rate, indicating that greater SWS leads to reduced application uniformity. To determine how speed affects uniformity in each operating mode, two regression models (linear and cubic) were compared at $p < 0.05$. Among them, the cubic model for Mode 2 (12 km/h) showed the highest determination coefficient ($R^2 = 0.947$) and most accurately described the studied variables.

Keywords: *hemical plant protection; application rate; sprayer adjustment; boom sprayer; research findings.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. СТАН ПИТАННЯ ПО ТЕМІ РОБОТИ	
1.1. Огляд та аналіз інформаційних джерел за темою роботи.....	8
1.2. Аналіз способів нанесення робочих розчинів обприскувачами.....	9
1.3. Розширений опис принципів роботи регуляторів.....	12
Висновки до розділу 1.....	14
2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НОРМИ ВНЕСЕННЯ ПЕСТИЦИДІВ ДЛЯ ПРИЧІПНОГО ШТАНГОВОГО ОБПРИСКУВАЧА	
2.1. Обґрунтування параметрів заданої норми витрати робочого розчину.....	16
2.2. Розрахунок хвилиної витрати рідини через отвір форсунки розпилювача для змінної норми внесення розчину з регулятором витрати.....	17
Висновки до розділу 2.....	22
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБПРИСКУВАЧА З РЕГУЛЯТОРОМ ВИТРАТИ РОБОЧОЇ РІДИНИ	
3.1. Дослідження системи автоматичного регулювання норми внесення пестицидів для самохідного штангового обприскувача.....	24
Висновки до розділу 1.....	28
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	31

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур передбачають широке застосування хімічних засобів захисту рослин, ефективність яких значною мірою залежить від точності та рівномірності їх внесення. Неправильно підібрані режими роботи обприскувачів або нестабільність подачі робочої рідини призводять до перевитрати препаратів, зростання виробничих витрат та підвищення хімічного навантаження на довкілля. Водночас недостатня норма внесення або її нерівномірність спричиняє зниження ефективності захисту рослин, формування резистентності патогенів і шкідників та зменшення врожайності.

У зв'язку з розвитком прецизійних технологій у рослинництві зростає потреба у впровадженні автоматичних систем регулювання витрати робочої рідини, здатних підтримувати стабільну норму внесення за змінних умов роботи — швидкості руху, рельєфу, вологості ґрунту та інших факторів. Тому дослідження ефективності застосування регуляторів витрати робочої рідини є важливим напрямом підвищення точності, технологічності та екологічної безпеки хімічного захисту рослин. Отримані результати сприятимуть удосконаленню систем керування обприскувачами та забезпечать покращення якості виконання технологічних операцій у сучасному аграрному виробництві.

Метою цієї роботи є: дослідження ефективності роботи систем автоматичного регулювання витрати робочої рідини самохідних обприскувачів шляхом впливу на точність і рівномірність внесення пестицидів за різних режимів роботи машини.

Щоб досягнути сформульованої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Проаналізувати сучасні методи автоматичного регулювання витрати робочої рідини обприскувачів.
- Визначити вплив швидкості руху обприскувача та вологості ґрунту на рівномірність внесення пестицидів.

- Виконати дослідження самохідного обприскувача з різними робочими режимами.
- Провести статистичний аналіз отриманих даних (ANOVA, кореляційний та регресійний аналіз).
- Розробити рекомендації щодо оптимізації налаштувань обприскувача для підвищення точності та ефективності внесення робочої рідини.

Об’єкт дослідження – ефективність технологічного процесу систем автоматичного регулювання витрати робочої рідини самохідних обприскувачів.

Предмет дослідження – вплив режимів роботи обприскувача та параметрів ґрунтово-кліматичних умов на точність і рівномірність внесення робочої рідини при автоматичному регулюванні витрати.

Методи дослідження. Робота виконувалась із застосуванням задач механіки рідин та моделювання процесів її регулювання, теорії руху рідин, методи вирішення оптимізаційних задач.

Перелік публікацій автора за темою роботи:

1. Заєць М. Л., Дворський Д. П. Дослідження ефективності нанесення пестицидів при зміні робочої швидкості обприскувача. Технічний прогрес в АПК: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, 21-22 травня 2025 року / Державний біотехнологічний університет. Харків, 2025. С 150-154.
2. Заєць М. Л, Дворський Д. П. Оцінка ефективності нанесення пестицидів при зміні робочої швидкості обприскувача з регулятором норми внесення. ВНАУ Журнал "Техніка, енергетика, транспорт АПК", м. Вінниця, 2025. №: 3 (122), С.63-71. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2
3. Білецький В. Р., Д. П. Дворський Результати дослідження ефективності роботи обприскувача з регулятором норми внесення. Зб. тез доп. XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" НУБіПУ. Київ. 2025. С. 162-167.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 33 сторінки комп'ютерного тексту, 8 рисунків та 5 таблиць.

1. СТАН ПИТАННЯ ПО ТЕМІ РОБОТИ

1.1. Огляд та аналіз інформаційних джерел за темою роботи

Типи обприскування за нормою внесення. Обприскування рослин можна класифікувати залежно від способу регулювання кількості робочого розчину на одиницю площі (л/га). [1]

Основні типи: Обприскування з нерегульованою нормою внесення (CNS, Conventional Nozzle System); Норма внесення фіксована і залежить від швидкості руху обприскувача та робочого тиску. При зміні швидкості руху фактична кількість внесення на одиницю площі змінюється. Переваги: проста конструкція, низька вартість. Недоліки: нестабільна норма внесення при нерівномірній швидкості руху, що може призвести до недостатнього або надмірного внесення пестицидів. [2]

Обприскування з автоматичним регулюванням норми внесення (SRC, Section Rate Control / Speed Rate Control), кількість розчину автоматично змінюється відповідно до швидкості руху обприскувача. Стабільна норма внесення на одиницю площі забезпечує більш точне та ефективне внесення. Переваги: зменшення втрат робочого розчину, підвищення ефективності пестицидів, економія коштів. Недоліки: складніша конструкція, вища вартість обприскувача та обслуговування. [1]

Обприскування з секційним регулюванням (Section Control). Робоча ширина обприскувача поділяється на секції, які автоматично включаються або відключаються для запобігання перекриттю та надлишкового внесення.

Використовується разом із регулятором норми внесення для оптимального покриття. Зональне або диференційоване обприскування (Variable Rate Application, VRA). Використовуються карти полів або датчики рослинності для точного внесення різної кількості робочого розчину у різних зонах. [2]

Найбільш сучасний метод, дозволяє економити пестициди та зменшувати вплив на навколишнє середовище. [1]

1.2. Аналіз способів нанесення робочих розчинів обприскувачами

Система CNS (Constant Nozzle System) – постійна подача робочого розчину. Принцип роботи наступний, У системі CNS подача робочого розчину залишається сталою незалежно від зміни швидкості руху агрегату. Форсунок працюють із постійною витратою, і тиск у системі залишається стабільним. Кількість внесення (л/га) змінюється пропорційно швидкості руху. Під час руху машини відбувається Збільшення швидкості → зменшення норми внесення, оскільки поле проходиться швидше, але витрата на хвилину не змінюється. [4]

Зменшення швидкості → збільшення норми внесення, тому що агрегат рухається повільніше при тій самій витраті. Особливості даної системи Недостатня точність дозування, високий ризик недовнесення або перевнесення на ділянках зі складним рельєфом або змінною швидкістю трактора. [3]

Система SRC (System Rate Control) – система контролю витрати, принцип роботи наступний. SRC автоматично регулює тиск у системі залежно від швидкості руху машини, щоб підтримувати незмінну норму внесення (л/га). При збільшенні швидкості тиск у системі зростає, збільшуючи витрату форсунок, при зменшенні швидкості тиск зменшується. під час руху відбувається підтримка сталої норми внесення, проте, збільшення тиску може призвести до утворення дрібніших крапель, що підвищує ризик зносу (drift); зниження тиску робить краплі надто великими, що погіршує покриття поверхні рослин. Особливості даної системи - точніше дозування, ніж у CNS, зміна тиску може впливати на якість розпилення, потребує калібрування та контролю стану форсунок. [5]

Система VRA (Variable Rate Application) – система змінної норми внесення полягає у VRA регулюванні норми внесення незалежно від швидкості, спираючись на: карту-завдання, показники датчиків, параметри рослин (NDVI, біомаса), дані ґрунтових датчиків. Подача робочого розчину змінюється лише відповідно до потреб рослин або умов поля, а не через швидкість. під час роботи система сама визначає, де збільшити чи зменшити подачу, і регулює параметри

тиску, частоту імпульсів (у PWM-системах), відкриття/закриття окремих форсунок. [6]

Графік у схемі (рис.1.1.) показує, що зміна робочого розчину залежить не від швидкості, а від алгоритму зміни норми. Особливістю даного процесу є високий рівень точності, оптимальна норма внесення для кожної ділянки поля, значне зменшення перевитрати пестицидів та навантаження на довкілля, але потребує цифрових карт, контролерів і датчиків. [7]

Залежність витрати від швидкості для CNS / SRC / VRA (ілюстрація)

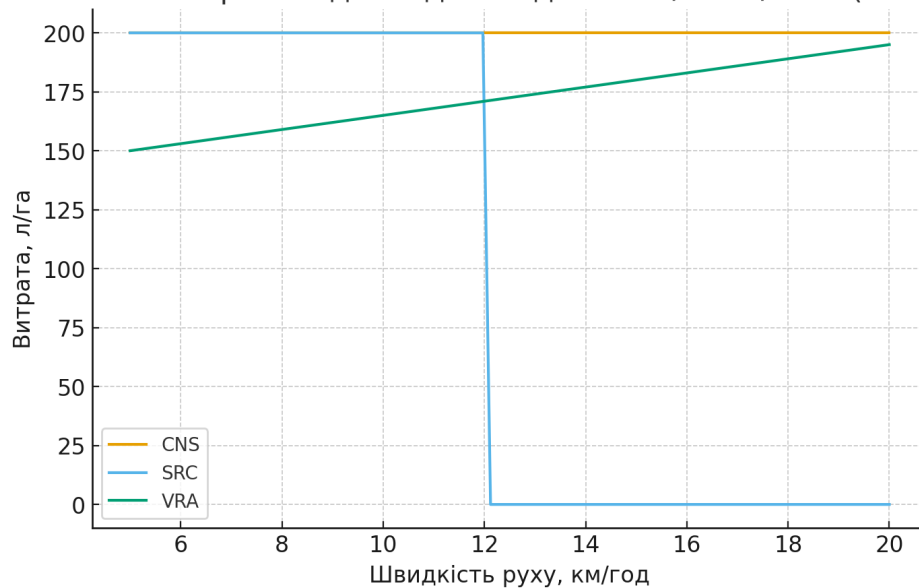


Рис. 1.1. Графічна залежність витрати від швидкості при різних типах контролю норми

- CNS (Constant Nozzle System) — простий, дає постійну подачу на форсунку; підходить для однакових умов.
- SRC (Sectional Rate Control) — керування секціями штанги (вкл/вимк) для зниження перекриттів.
- VRA (Variable Rate Application) — змінна норма внесення по карті або в реальному часі (GPS/сенсор), забезпечує економію і точність.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика

Система	Залежність від швидкості	Стабільність норми внесення	Якість розпилення	Рівень точності
CNS	Висока	Нестабільна	Від стабільної до неякісної	Низький
SRC	Середня	Стабільна	Залежить від тиску	Середній
VRA	Немає	Залежить від карти/датчиків	Стабільна	Дуже високий

Таблиця 1.2.

Порівняння систем CNS, SRC та VRA за принципом подачі робочого розчину та залежністю від швидкості руху

Показник	CNS (Constant Nozzle System)	SRC (Speed Related Control)	VRA (Variable Rate Application)
Тип регулювання	Фіксований тиск → постійна витрата через форсунку	Залежність від швидкості: система автоматично регулює тиск	Зміна норми внесення відповідно до карти-завдання або датчиків
Реакція на зміну швидкості	Витрата <i>не змінюється</i> , а норма внесення зростає при зменшенні швидкості та зменшується при збільшенні	Система збільшує або зменшує тиск, щоб витрата (л/хв) відповідала постійній нормі	Працює незалежно від швидкості: норма змінюється за агрономічними умовами
Залежність тиску від швидкості	Тиск постійний	Тиск прямо пропорційний швидкості руху	Тиск може змінюватися, але основний фактор — норма внесення
Рівномірність внесення	Низька при роботі на різних швидкостях	Висока	Дуже висока (диференційоване внесення)

Показник	CNS (Constant Nozzle System)	SRC (Speed Related Control)	VRA (Variable Rate Application)
Переваги	Простота, дешевизна, надійність	Стабільна норма внесення незалежно від швидкості	Економія ЗЗР, адаптація до умов поля
Недоліки	Нестабільна норма внесення	Обмеження через діапазон тисків; зміна спектра крапель	Необхідність карт-завдань/сенсорів, складність
Тип керування	Механічно-гідравлічне	Електронно-гідравлічне (контролер + датчик швидкості)	Програмно-кероване, інтегроване з GPS/сенсорами
Потреба в сенсорах	Мінімальна	Датчики швидкості	GPS, датчики врожайності, NDVI, карти ґрунтів

1.3. Розширений опис принципів роботи регуляторів

1.3.1. CNS — Constant Nozzle System (Система з постійним тиском): Ця система працює за принципом фіксованого тиску в магістралі обприскувача.

Фізичний принцип:

Витрата через форсунку визначається формулою: [10]

$$Q = k \cdot \sqrt{P_0} \quad (1.1)$$

де Q - витрата,

k - коефіцієнт форсунки,

P - тиск.

Оскільки тиск не змінюється, витрата також постійна.

При збільшенні швидкості агрегату об'єм рідини, внесений на гектар, зменшується, бо: Норма = $Q / \text{швидкість}$. Крапля і спектр розпилу стабільні, але норма «плаває» — що є великим недоліком. Фізично система працює як «водопровід під постійним тиском»: швидше їдеш — менше поливаєш. [6]

1.3.2. SRC — Speed Related Control (Швидкісно-компенсаційна система)

SRC автоматично регулює тиск залежно від швидкості руху обприскувача.

Фізичний принцип: [7]

- В основі — та сама формула силового розпилення рідини через отвір:

$$Q = k \cdot \sqrt{P}. \quad (1.2)$$

- Завдання системи - зберегти норму внесення постійною, підлаштувавши Q .
- Коли швидкість зростає:
 - контролер збільшує тиск,
 - витрата через форсунку зростає (бо \sqrt{P} збільшується),
 - норма внесення повертається до заданої.
- Коли швидкість падає:
 - система знижує тиск,
 - витрата зменшується,
 - норма зберігається.

SRC - це «розумний регулятор тиску», який вирівнює подачу розчину пропорційно швидкості. Обмеженнями є неможливість точно контролювати розмір краплин при дуже високих чи низьких тисках; форсунки мають рекомендований робочий діапазон. [9]

1.3.3. Система змінних норм внесення VRA - Variable Rate Application (3)

VRA працює за іншим принципом — гнучкого регулювання норми внесення відповідно до просторової варіабельності поля. Фізичний принцип полягає в наступному, система отримує дані з карт-завдань, GPS, датчиків NDVI чи датчиків густоти рослин. Контролер у реальному часі змінює тиск у магістралі, частоту імпульсів (у системах PWM), або відкриття/закриття секцій. Витрата Q змінюється не лише через швидкість (як у SRC), а через агрономічну потребу ділянки поля. Швидкість впливає лише другорядно — система просто компенсує її, але основна мета — зміна норми внесення. Фізично VRA — це «адаптивна

система», яка працює за принципом керування потоком через імпульсну модуляцію або гідравлічний контроль. [9,10,11]

Висновки до розділу 1.

Система CNS (Constant Nozzle System) забезпечує постійну витрату робочого розчину через форсунку незалежно від зміни швидкості руху агрегату. Такий підхід є технологічно простим і дешевим, але він не компенсує вплив варіацій швидкості на норму внесення, що призводить до недовнесення або перевнесення препарату на ділянках із різними робочими швидкостями.

SRC (Section Rate Control) представляє більш прогресивний рівень автоматизації, оскільки дозволяє вмикати та вимикати окремі секції штанги, зменшуючи перекриття та підвищуючи точність внесення. Однак система все ще регулює витрату на рівні секції, а не окремих форсунок, тому точність обмежена шириною секції та не забезпечує індивідуального контролю по мікроділянках.

VRA (Variable Rate Application) є найбільш технологічно досконалою системою, що дозволяє змінювати норму внесення у просторі та часі відповідно до карт-завдань або сигналів сенсорів у реальному часі. Такий підхід мінімізує нераціональні витрати препаратів, підвищує ефективність обробки та сприяє зменшенню екологічного навантаження на агроєкосистему.

Порівняння трьох систем показує чітку еволюцію точності: CNS → SRC → VRA, де CNS виконує базове внесення, SRC знижує перекриття, а VRA забезпечує максимально адаптивну та технологічно обґрунтовану подачу робочого розчину.

Ефективність роботи обприскувача значною мірою залежить від взаємодії системи керування з швидкістю руху агрегату. CNS фактично не враховує швидкість, SRC компенсує лише включенням/виключенням секцій, тоді як VRA здійснює повноцінний динамічний контроль норми залежно від швидкості та просторових особливостей поля.

Упровадження системи VRA дозволяє підвищити економічну ефективність внесення на 15–30%, а інколи й більше, за рахунок зменшення надмірного використання ЗЗР та добрив і забезпечення диференційованої обробки рослин відповідно до їх потреб.

Використання систем від CNS до VRA відповідає концепції точного землеробства, спрямованої на оптимізацію витрат ресурсів, точну реакцію на просторову неоднорідність поля та підвищення продуктивності агротехнологічних процесів.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НОРМИ ВНЕСЕННЯ ПЕСТИЦИДІВ ДЛЯ ПРИЧІПНОГО ШТАНГОВОГО ОБПРИСКУВАЧА

2.1. Обґрунтування параметрів заданої норми витрати робочого розчину

Програмування бортового комп'ютера здійснюється вручну шляхом введення норм, з якими працюватимуть залежно від потреби (кількості пестициду). На рисунку 3 показано послідовність встановлення параметрів агрегату. У даному дослідженні контролер запрограмований на норму витрати 150 л/га пестициду. Відстань, на якій вимірюється використана кількість розчину, становить 33,3 м, що відповідає 0,1 га обробленої площі (згідно з робочою шириною машини). Бак обприскувача заповнюється 1000 л води.

Комп'ютер агрегату налаштовується на роботу, і досліджувану ділянку проходять в автоматичному режимі, намагаючись підтримувати задану швидкість руху агрегату. Відбираються розпилювачі, придатні для відповідних умов, та проводиться налаштування машини. Обприскувач проходить через експериментальне поле, після чого кількість розчину, що залишилася в баку, зчитується з дисплея. Бак доливається розчином до рівня 1000 л.

Для кожної встановленої швидкості агрегату (10 км/год, 13 км/год і 15 км/год) випробування виконувалося з повторюваністю 10 разів.

Відхилення від заданої норми витрати розраховується за формулою:

$$\Delta Q = Q_{га} - (1000 - Q_{ф}), \quad (2.1)$$

де:

ΔQ – відхилення від норми витрати, л/га;

$Q_{га}$ – задана норма витрати (150 л/га);

$Q_{ф}$ – фактична витрата робочого розчину.

Статистичний аналіз даних. Значущі відмінності між показниками роботи обприскувача швидкостей руху обприскувача, км/год (v_{sWS}), для різних режимів роботи машинного агрегату, а також відмінності між відхиленнями від норми витрати робочого розчину, л/га (ΔQ), аналізують за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (Univariate ANOVA) з подальшим тестом Тьюкі[8].

Кореляційний аналіз застосовується для визначення сили та напрямку взаємозв'язку між швидкістю руху обприскувача, відхиленнями норми витрати та миттєвою вологістю ґрунту (SM), вимірюною на експериментальній ділянці.

Вплив швидкостей руху обприскувача на відхилення норми витрати для різних режимів роботи агрегату вивчають за допомогою регресійного аналізу при $p < 0,05$. Основна мета — розрахувати прогностичні моделі, що визначають взаємозв'язки між досліджуваними параметрами. Порівнюються дві регресійні моделі - лінійна (2) та кубічна (3), які подано формулами:

$$Y = const \cdot x + b, \quad (2.2)$$

$$Y = const \cdot x + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3. \quad (2.3)$$

де:

Y - спостережуваний параметр відхилення від норми витрати робочого розчину, л/га, за різних режимів роботи агрегату;

x - фіксований фактор робоча швидкість обприскувача;
 $const, b_1, b_2, b_3$ – коефіцієнти моделі.

Для обробки даних використовували програмне забезпечення IBM® SPSS® Statistics 26.0.

2.2. Розрахунок хвилиної витрати рідини через отвір форсунки розпилювача для змінної норми внесення розчину з регулятором витрати

Щоб визначити конструкційні параметри розпилювачів форсунок, необхідно враховувати основні фактори їх роботи: витрату робочої рідини, робочий тиск, ширину кута розпилювання, розмір утворюваних крапель та рівномірність нанесення. До головних параметрів конструкції належать діаметр

соплового отвору, кут факела розпилу, швидкість виходу рідинного струменя, а також інші геометричні та функціональні особливості.

Витрата робочого розчину ($Q_{га}$) через отвір форсунки визначимо з формули: [12]

$$Q = C_d \cdot A \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2.4)$$

де:

$Q_{га}$ - витрата робочого розчину, $м^3/с$),

C_d – коефіцієнт, що враховує втрати (0,6...0,9 для стандартних розпилювачів), [12]

A - площа поперечного перерізу отвору, $м^2$,

P - робочий тиск, Па,

ρ – об'ємна маса робочого розчину, $кг/м^3$ (прийmemo $\rho=1000$ $кг/м^3$). [6]

Визначимо діаметр отвору розпилювача з площі (A) (d): [12]

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.5)$$

отримаємо

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Розмір діаметра отвору обирають від заданої хвилинної витрати і робочого тиску рідини в системі.

Значення кута факелу розпилювання (α) встановлюється в залежності від профілю щілини чи отвору обраного розпилювача, тобто форми вихідного отвору, розмірів сопла та швидкості виходу рідини (V), яку можна розрахувати по залежності: [8]

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2.6)$$

Середній розмір діаметру краплин (D) залежить від форми розпилювача та показника динамічної в'язкості рідини: [12]

$$D = K \cdot \left(\frac{\mu}{\rho v} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.7)$$

де:

K – коефіцієнт, що враховує конструкційні особливості розпилювача форсунки, (носить емпіричний характер)

μ – показник динамічної в'язкості робочої рідини, Па·с,

V – швидкість виходу розчину з сопла розпилювача, м/с.

2.2. Обгунтування конструктивних параметрів розпилювача

Вхідні дані:

1. Фактична витрата рідини через форсунку: $Q_{\text{ф}}=1,3$ л/хв ($2,20 \times 10^{-5}$ м³/с).
2. Тиск в системі подачі: $P_{\text{н}}=0,3$ МПа.
3. Коефіцієнт, що враховує втрати: $C_d=0,7$. [12]
4. Густина робочого розчину: $\rho=1000$ кг/м³.

Визначимо площу поперечного перерізу отвору (A), за формулою [12]:

$$A = \frac{Q}{C_d \sqrt{2P \cdot \rho}}, \quad (2.6)$$

Підставивши значення параметрів отримали:

$$A = \frac{2,2 \cdot 10^{-5}}{0,7 \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 10^5 / 1000}} = 6,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Визначимо діаметр отвору розпилювача (d) із залежності:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,23 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 2,8 \cdot 10^{-3} = 2,8 \text{ мм}$$

Значення діаметру отвору розпилювачів, для умов регульованої чи змінної подачі рідини повинен становити $d=2,8 \dots 3,0$ мм.

Визначимо швидкість руху виходу робочого розчину з сопла розпилювача (V) за формулою (2.6):

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^5}{1000}} = 24,49 \text{ м/с}$$

Встановимо середній розмір краплин, що утворюються даним розпилювачем (d):

Прийmemo емпіричний коефіцієнт рівним $K=1,5$ (для щілинних розпилювачів), в'язкість робочого розчину рівним $\mu=0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [12]:

тоді

$$d = 1,5 \cdot \left(\frac{0,01}{1000 \cdot 24,49} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,026 \text{ мм}$$

Отриманий середній розмір краплин – 0,026 мм, задовольняє ефективно покриття поверхні рослин робочим розчином.

Залежність витрати від швидкості для CNS / SRC / VRA (ілюстрація)

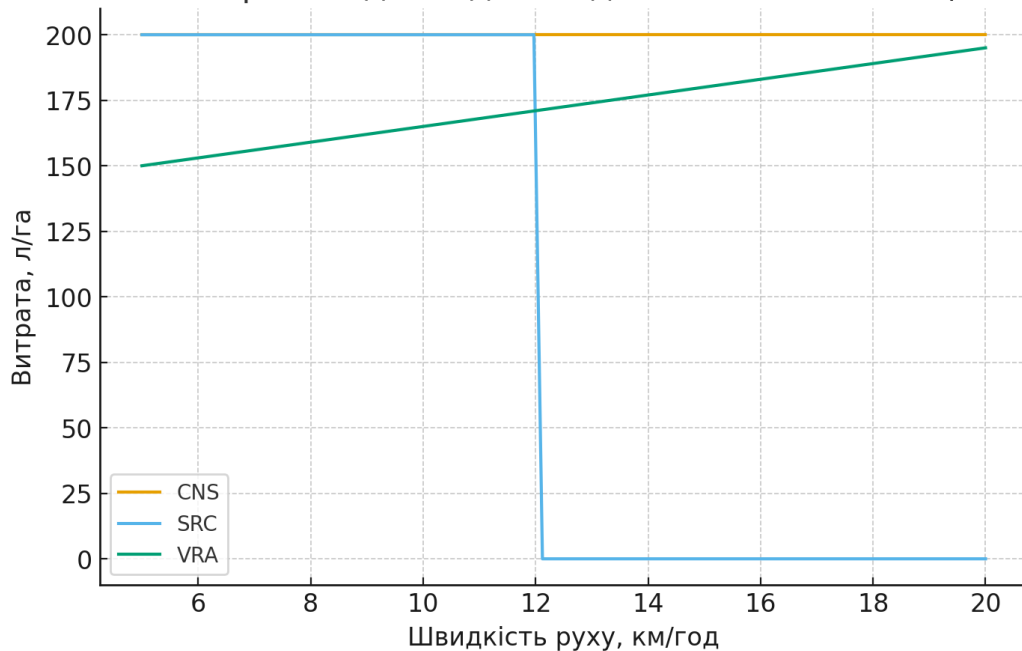


Рис. 2.1. Залежність витрати робочої рідини при зміні швидкості на різних типах контролю норми внесення

Н обприскувач було встановлено регулятор норми витрат внесення Micro-Trak MT-2405F II (виробництво США) разом із регулюючим клапаном TeeJet® 346BPR-2F-03 (TeeJet Technologies, рис. 2,2b,2,2c).



a)

Рис.2.2. Обприскувач M701, що використовувався для дослідження ефективності роботи контролера(a). Встановлений регулятор норми виливу, (b) та клапан регулювальний TeeJet® 346BPR-2F-03, (c).

Протягом обох років інші параметри обприскувача (висота штанги, тип форсунок) залишалися незмінними, а єдиною відмінністю була наявність регулятора норми внесення. Обприскувач без регулятора (2024 р.) позначено як CNS, із регулятором (2025 р.) — як SRC.

Для формування крапель середнього, великого та надвеликого розміру відповідно до стандарту ASABE S572.1 [13] застосовувалися форсунки з розпилювачами XRC, AIXR та TTI (рис. 2.3a, 2,3b, 2,3c).

Дослідження підтверджують, що нерівномірність розподілу робочого розчину через коливання швидкості руху агрегату може спричинити перевитрату пестицидів на 30–40%, що значно перевищує допустимі норми. Тому

використання регуляторів норми внесення з інтегрованими швидкісними контролерами є особливо актуальним.

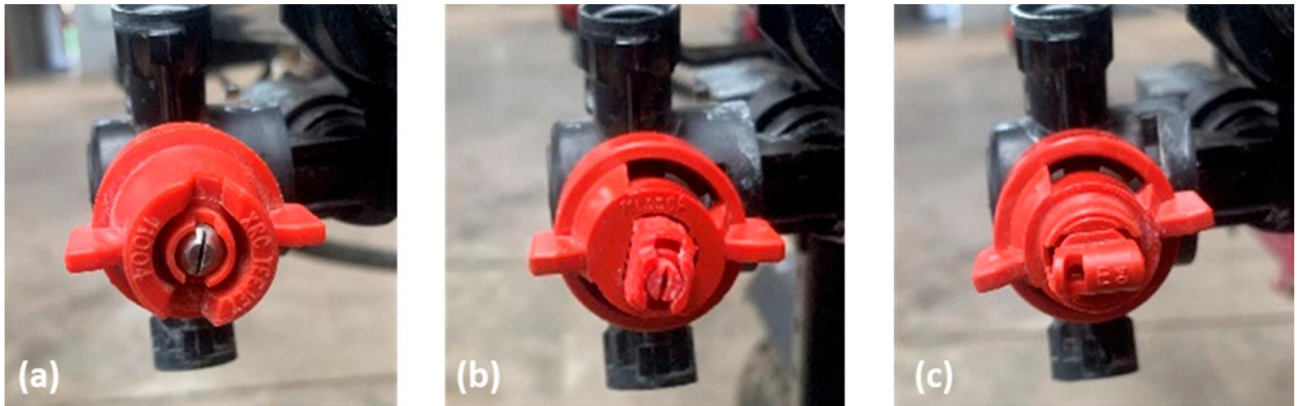


Рис. 2.3. Встановлені типи розпилювачів робочої рідини TeeJet®(a): XRC 11004 - утворює середньорозмірні краплини, AIXR 11004 - утворює великорозмірні краплини (b), TTI 11004 - утворює ультравеликі краплини (c).

Основні характеристики розпилювачів: факел розпилення становив 110° , розмір щілини – 0,4 мм. Розпилювачі було рівномірно розміщено по штанзі агрегату (18м) у такому порядку зліва направо (рис. 1a): XRC → AIXR → TTI. Під час випробувань кожна форсунка охоплювала шість рядків (відстань між рядами – 0,9 м), формуючи ділянку шириною 5,5 м та довжиною 180...220 м, що відповідало довжині поля.

Калібрування обприскувача перед випробуваннями включало: норму внесення 150 л/га, тиск розпилення 0,3 МПа, швидкість руху становила 10,12,15 км/год, розмір щілини – 0,4 мм.

Під час проведення досліджень змінювали лише швидкість руху, тоді як тип та типорозмір розпилювачів лишався постійним.

Висновки до розділу 2.

Головним параметром, що визначає якість роботи обприскувача та ефективність внесення пестицидів, є рівномірність нанесення робочої рідини по всій ширині захвату штанги. Відповідно до агротехнічних норм, коефіцієнт рівномірності щільності нанесення повинен становити 75%. Експерименти

показали, що нерівномірність розподілу робочого розчину через коливання швидкості руху агрегату може спричинити перевитрату пестицидів на 30–40%, що значно перевищує допустимі норми. Тому використання регуляторів норми внесення з інтегрованими швидкісними контролерами є особливо актуальним.

Програмування бортового комп'ютера обприскувача з регулятором норми внесення дозволяє точно підтримувати задану витрату робочого розчину (150 л/га), що забезпечує контрольоване покриття поля та економію пестицидів.

Нерівномірність розподілу рідини через коливання швидкості руху агрегату може призводити до перевитрат пестицидів на 30...40%, що перевищує допустимі норми, що підкреслює актуальність використання систем із регулятором норми витрат.

Використання форсунок ХРС, АІХР та ТТІ відповідно для крапель середнього, великого та надвеликого розміру забезпечує рівномірне покриття рослин робочим розчином і дозволяє адаптувати обприскувач до конкретних умов обробки.

Основні параметри обприскувача — кут факела розпилення, діаметр соплового отвору та розташування форсунок по штанзі — критично впливають на ефективність внесення та рівномірність покриття.

Статистичний та регресійний аналіз показали, що швидкість руху агрегату є ключовим фактором, що впливає на відхилення від заданої норми витрати, а застосування регуляторів норми внесення дозволяє мінімізувати ці відхилення.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБПРИСКУВАЧА З РЕГУЛЯТОРОМ ВИТРАТИ РОБОЧОЇ РІДИНИ

3.1. Дослідження системи автоматичного регулювання норми внесення пестицидів для самохідного штангового обприскувача

Дослідження проводилося у 2024-25 роках на базі СФГ «Костишина». (Рис.3.1, 3.2.). Об'єктом дослідження був причіпний штанговий обприскувач з гідравлічною штангою довжиною 18 метрів (Рис. 2.2). Проведений експеримент імітує малогабаритне обприскування за встановленою нормою витрати 150 л/га при трьох робочих швидкостях (10 км/год, 13 км/год та 15 км/год). Робочі режими обприскувача визначалися таким чином:

– Робочий режим 1 – агрегат налаштований на швидкість 10 км/год та норму витрати 150 л/га. режим 2 - 13 км/год та норму витрати 150 л/га., та режим 3 – агрегат налаштований на швидкість 15 км/год та норму витрати 150 л/га.

Вологість ґрунту вимірювали через рівні інтервали по 2 м уздовж усієї довжини експериментального поля на глибині 15 см за допомогою датчика вологості ґрунту AM-128 SOIL. Це робилося для оцінки впливу вологості ґрунту на зміну продуктивності обприскувача, тобто швидкісного режиму руху.



Рис. 3.1. Експериментальне поле

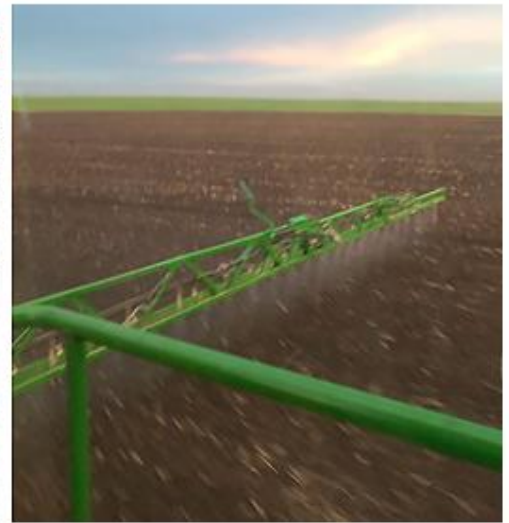


Рис. 3.2. Гідравлічна штанга
обприскувача



Рис. 3.3. Налаштування параметрів агрегату

А – дисплей налаштування машини, В – дисплей для зчитування кількості пестициду в баку, С – регулювання висоти гідравлічного штока

Відхилення норми витрати пестициду контролювали під час руху обприскувача на трьох різних робочих швидкостях (10 км/год, 13 км/год та 15 км/год), а регресійні моделі дослідження Встановлення взаємозв'язку між ними здійснюється шляхом побудови регресійних моделей. Виміряна миттєва вологість ґрунту на досліджуваній ділянці варіює від 38,6 % до 43,2 %, тобто середня вологість для всієї досліджуваної площі становить 40,05 %.

Однофакторний дисперсійний аналіз (Univariate ANOVA) та кореляційний аналіз

У табл. 1 представлені середні значення розрахованих параметрів SWS та DCR для трьох робочих режимів агрегату та для зафіксованої миттєвої вологості ґрунту на експериментальному полі.

Що стосується робочої швидкості обприскувача, результати застосованого однофакторного дисперсійного аналізу показують наявність значущих відмінностей при $p < 0,05$ між середньою швидкістю WM1 та швидкостями інших двох робочих режимів, а також між WM2 та WM3. Зі значення коефіцієнта детермінації (0,982) можна зробити висновок, що 98,2 % варіацій робочої швидкості агрегату пояснюються вибраним робочим режимом.

Що стосується параметра Відхилення від норми витрати (DCR), відзначено значущі відмінності між середніми значеннями DCR, отриманими для робочих режимів WM1 та WM3. Значущих відмінностей цього параметра між WM1 та WM2, а також між WM2 та WM3 не виявлено. Низький коефіцієнт детермінації (0,148) вказує, що лише 14,8 % варіацій DCR пояснюються різними робочими режимами агрегату.

Кореляції між робочою швидкістю обприскувача, миттєвою вологістю ґрунту та відхиленням від норми витрати для трьох робочих режимів агрегату табл. 1. Основна статистика та однофакторний дисперсійний аналіз (Univariate ANOVA) спостережуваних параметрів: робоча швидкість обприскувача та відхилення від норми витрати для різних робочих режимів агрегату

Робочий режим (n = 3)	Швидкість роботи обприскувача, км/год (x ± SD)	Sig. (p)	R ²	Відхилення від норми витрати, л/га (x ± SD)	Sig. (p)	R ²
WM1	9,93 ± 0,133 a	0,0049	0,982	-0,110 ± 1,226	0,0116	0,148
WM2	12,94 ± 0,346 ab			-0,195 ± 1,138		
WM3	15,17 ± 0,386 ab			-0,207 ± 0,890		

* Одні й ті ж нарядкові букви у колонці означають значущі відмінності на рівні значущості $p < 0,05$:

a-a – між WM1 та усіма іншими робочими режимами

b-b – між WM2 та усіма іншими робочими режимами

Примітки: SD – стандартне відхилення;

R² – коефіцієнт детермінації;

n – кількість спостережень;

У режимі 3 коефіцієнти детермінації найвищі ($R^2 = 0,954$), тобто близько 95,4% варіацій у відхиленні від норми витрати можна пояснити впливом швидкості роботи обприскувача. На рисунку 3.4с показано оцінку кривих розроблених регресійних моделей для третього режиму роботи WM3. Як видно з рисунка, дві моделі майже повністю накладаються одна на одну. Хоча їхні коефіцієнти детермінації найвищі, похибки оцінки найменші (0,2012; 0,2021), а

DCR найменший (-2,07; табл. 1), визначити, яка з двох моделей більш придатна для опису досліджуваних параметрів, неможливо.

Що стосується регресійних рівнянь для інших двох робочих режимів, WM2 відзначається вищими коефіцієнтами детермінації (0,908; 0,937) порівняно з WM1. Більше того, помилки оцінки моделей менші порівняно з WM1, як і відхилення від норми витрати (-1,95; табл 1).

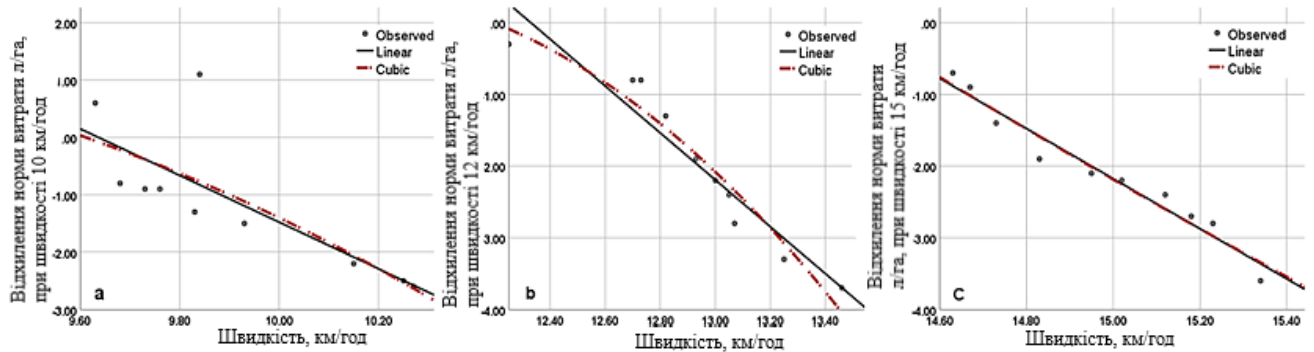


Рис. 3.4. Оцінка кривих регресійних моделей, що показують Залежність Відхилення норми витрати від швидкості роботи обприскувача

Як видно з рис. 3.4а і 3.4б, обчислені регресійні моделі для WM2 обприскувача описували досліджувані параметри краще, ніж обчислені моделі для WM1. Крім того, кубічна модель має вищий коефіцієнт детермінації (0,937; табл. 2), ніж лінійна модель.

Таблиця 3.2.

Таблична кореляція між досліджуваними параметрами: швидкістю роботи обприскувача, вологістю ґрунту та відхиленням від норми витрати для різних робочих режимів агрегату

	режим1 (10 км/год)			режим2 (13 км/год)			режим3 (15 км/год)		
	SWS	SM	DCR	SWS	SM	DCR	SWS	SM	DCR
SWS	1	-0,410	-0,783*	1	-0,412	-0,953*	1	-0,227	-0,977*
SM	-	1	0,243	-	1	0,488	-	1	0,069
DCR	-	-	1	-	-	1	-	-	1

* Кореляція значуща при $p < 0,01$

Пояснення скорочень:

SWS – швидкість роботи обприскувача (км/год)

SM – вологість ґрунту (%)

DCR – відхилення від норми витрати (л/га)

WM1, WM2, WM3 – робочі режими обприскувача

Проведено дослідження із причіпним обприскувачем зі штангою та автоматичним регулюванням норми витрати у трьох робочих режимах: WM1 (10 км/год), WM2 (13 км/год) та WM3 (15 км/год) при нормі внесення пестициду 150 л/га.

Висновки до розділу 1.

Встановлено, що середня швидкість обприскувача у режимі 1 (9,93 км/год) значущо відрізнялася від швидкостей у режимі 2 (12,94 км/год) та режимі 3 (15,17 км/год). Також було зафіксовано значущу різницю між режимі 2 та режимі 3.

Щодо відхилення від норми витрати пестициду (DCR), для трьох режимів отримано такі значення: режимі 1: -1,10 л/га, режимі 2: -1,95 л/га, режимі 3: -2,07 л/га

Значущі відмінності середніх значень відхилень спостерігалися переважно у WM1, що вказує на більшу стабільність витрати пестициду при підвищенні швидкості обприскувача у інших режимах.

У режимі 1 та режимі 3 обприскувача спостерігалися значущі відмінності, тоді як для інших робочих режимів значущих відмінностей у відхиленнях від норми витрати пестициду не зафіксовано.

Виявлено низхідну, від слабкої до помірної кореляцію (-0,227; -0,410; -0,412) між швидкістю роботи обприскувача та вологістю ґрунту, а також слабку до помірної, але позитивну кореляцію (0,069; 0,243; 0,488) між вологістю ґрунту та відхиленнями від норми витрати пестициду для всіх трьох робочих режимів. Найсильніша негативна кореляція (-0,783; -0,953; -0,977) спостерігалася між швидкістю роботи обприскувача та відхиленнями від норми витрати.

Було розраховано два типи регресійних моделей (лінійну та кубічну), що описують вплив швидкості роботи обприскувача на параметр відхилення від норми витрати для трьох робочих режимів агрегату. Серед усіх розроблених моделей кубічна модель для режиму 2 відзначалася найменшою похибкою оцінки та високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,937$), найкраще описуючи досліджувані параметри.

Розроблені моделі можуть бути використані фермерами для оптимізації роботи систем автоматичного керування внесенням пестицидів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Ефективність роботи обприскувача значною мірою залежить від взаємодії системи керування з швидкістю руху агрегату. CNS фактично не враховує швидкість, SRC компенсує лише включенням/виключенням секцій, тоді як VRA здійснює повноцінний динамічний контроль норми залежно від швидкості та просторових особливостей поля. Упровадження системи VRA дозволяє підвищити економічну ефективність внесення на 15–30%, а інколи й більше, за рахунок зменшення надмірного використання ЗЗР та добрив і забезпечення диференційованої обробки рослин відповідно до їх потреб.
2. Програмування бортового комп'ютера обприскувача з регулятором норми внесення дозволяє точно підтримувати задану витрату робочого розчину (150 л/га), що забезпечує контрольоване покриття поля та економію пестицидів.
3. Нерівномірність розподілу рідини через коливання швидкості руху агрегату може призводити до перевитрат пестицидів на 30...40%, що перевищує допустимі норми.
4. Встановлено, що середня швидкість обприскувача у режимі 1 (9,93 км/год) значущо відрізнялася від швидкостей у режимі 2 (12,94 км/год) та режимі 3 (15,17 км/год). Також було зафіксовано значущу різницю між режимі 2 та режимі 3. Визначено відхилення від норми витрати пестициду (DCR), для трьох режимів отримано такі значення: режимі 1: -1,10 л/га, режимі 2: -1,95 л/га, режимі 3: -2,07 л/га. Отримано два типи регресійних моделей (лінійну та кубічну), що описують вплив швидкості роботи обприскувача на параметр відхилення від норми витрати для трьох робочих режимів агрегату. Серед усіх розроблених моделей кубічна модель для режиму 2 відзначалася найменшою похибкою оцінки та високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,937$), найкраще описуючи досліджувані параметри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sudduth, K. A., Franzen, A. J., Zhu, H., Drummond, S. Variable-rate application technologies in precision agriculture. Розділ у книзі Precision Agriculture. Описує характеристики систем змінної норми внесення (VRA), як для рідких, так і для сухих добрив, приклади кейсів та майбутні тенденції. [Taylor & Francis](#)
2. Mirzakhani-fachi, H., Singh, M., Vector, V., Gupta, O. P., Singh, R. Design and Development of a Variable Rate Applicator for Real-Time Application of Fertilizer. Sustainability 2021. У статті описано конструкцію аплікатора з сенсором NDVI, мікроконтролером і клапаном PWM для реалізації реального часу змінної норми. [MDPI+1](#)
3. Sui, R. Performance Assessment of a Variable-Rate Fertilizer Applicator. Journal of Agricultural Science, 2019. [ars.usda.gov](#)
4. Del-Moral-Martínez, M., Campos, I., та ін. Field validation of a variable rate application sprayer equipped with ultrasonic sensors in apple tree plantations. Precision Agriculture (2024).
Оцінка VRA-обприскувача з ультразвуковими датчиками для фруктових дерев. [SpringerLink](#)
5. Brill/Wageningen Academic – розділ 5: A farm scale evaluation of variable rate application (VRA) for improving liquid digestate agronomic performances. Precisionagriculture'21. Грунтова оцінка VRA технології на масштабах господарства, зокрема для рідких органічних добрив. [Brill](#)
6. Preprint: Zhang, Jicheng, Sun, Wenfeng та ін. Development of a Variable-Rate Spraying System for Small Amounts of Liquid Rhizobial Inoculation Based on Increment PID Control. Описано систему PID-контролю для точного внесення рідкого інокулянта з змінною нормою. [preprints.org](#)

7. Публікація в журналі AgriTechno: Variable Rate Granular Fertilizer for Corn Plants. Розгляд змінної норми внесення гранульованих добрив для кукурудзи. agritech.unhas.ac.id
8. Solving the Riddle of Variable Rate Application. Farm-Equipment.com. Хороший огляд принципів VRA, його переваг, технічних викликів і нюансів впровадження.
9. Variable Rate Seeding in Precision Agriculture: Recent Advances and Future Perspectives Agriculture (MDPI, 2022) — огляд методів змінної сівби (VRS), що є тісно пов'язано з концепцією site-specific management. [MDPI](https://www.mdpi.com)
10. Variable Rate Application in Precision Agriculture Global Journal of Biology, Agriculture & Health Sciences (2022) — загальний огляд VRA, переваги, виклики, технології, економічні аспекти. [@WalshMedical+1](https://www.walshmedical.com)
11. Real-time Variable Rate Applications of Nitrogen in Wheat, using multispectral camera system Kosmos Publishers (2023) — дослідження застосування N-добрив в реальному часі на основі мультиспектральної камери, з контролем NDVI.
12. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. К.: Урожай, 2001. 384 с.
13. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. [in English].
14. <https://www.deere.ua/uk/>
15. <https://www.kuhn.ua>
16. <https://case-ukraine.com.ua>
17. Обладнання для захисту рослин: обприскувачі. ч. 1. Методи випробування насадок для розприскування (ISO 5682-1: 1996, IDT) ДСТУ ISO 5682-1: 2005

18. Хороші розпилювачі - високий ефективний обробіток. Захист та карантин рослин. 2006. №5. С. 44-45.