

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-4>

УДК 631.363.3:632.362.2

М. Л. Заєць, к.т.н., доцент

Поліський національний університет

e-mail: mzaec81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2290-1892

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОБПРИСКУВАЧА З РЕГУЛЯТОРОМ НОРМИ ВНЕСЕННЯ ЗА ЗМІННОЇ РОБОЧОЇ ШВИДКОСТІ

Анотація. Статтю присвячено дослідженню процесу розпилення та оцінювання якості за різних швидкостей руху для сільськогосподарського обприскувача з регулятором норми внесення.

Зміна швидкості руху є поширеним та неминучим під час нанесення пестицидів обприскувачами. Було проведено польові випробування для оцінювання впливу змін швидкості руху на розпилення та якість обприскування за допомогою штангового обприскувача без регулятора норми внесення (CNS) та з регулятором норми внесення (SRC).

Під час проведення досліджень штангу обприскувача було рівномірно розділено між трьома типами форсунок (XRC, AIXR та TTI) для отримання крапель різних розмірів (середніх, дуже великих та надвеликих відповідно). Перед початком випробувань обприскувач було відкалібровано для внесення 180 л/га за робочого тиску 0,207 МПа та швидкості руху 9,7 км/год.

Для оцінювання розпилення та якості обприскування застосування пестицидів проводилося за п'яти різних значень швидкості руху: 9,7, 12,9, 16,1, 19,3 та 22,5 км/год. Дані збирали шляхом розміщення вологочутливого паперу в різних точках уздовж штанги обприскувача в полі.

Результати для CNS (без регулятора) показали, що зі збільшенням швидкості руху кількість нанесених крапель та рівень розпилення значно знижувалися ($p < 0,05$) для всіх трьох типів форсунок, що було спричинено зменшенням кількості крапель на одиницю площі. Для SRC (з регулятором) розпилення залишалося більш стабільним за зміни швидкості руху.

Швидкість руху впливала на якість обприскування як для CNS, так і для SRC. Однак для SRC спостерігалися більші відхилення в якості розпилення через підвищення робочого тиску за збільшення швидкості руху. Для форсунок типу XRC та TTI було зафіксовано подібні тенденції в зміні розпилення та якості для обох варіантів обприскувача (CNS та SRC). Водночас форсунка AIXR демонструвала нестабільне розпилення та якість у разі зміни швидкості руху.

Результати дослідження свідчать, що сільськогосподарські обприскувачі, оснащені регулятором норми внесення, забезпечують більш рівномірне та стабільне розпилення порівняно з традиційними обприскувачами (без регулятора), коли швидкість руху змінюється під час застосування пестицидів. Хоча якість розпилення також зазнає змін у разі використання регулятора норми внесення, дотримання найкращих практик, як-от правильний вибір форсунок і застосування номінальних швидкостей руху, допоможе мінімізувати ці ефекти та забезпечити ефективне використання технологій внесення пестицидів.

Ключові слова: сільськогосподарські обприскувачі, норма внесення, швидкість руху, регулятор норми внесення, покриття розпиленням, якість обприскування.

Постановка проблеми. Застосування пестицидів є невід'ємною частиною виробництва просяних культур в Україні та світі. Використання пестицидів для боротьби з бур'янами, шкідниками та хворобами стабільно зростало протягом багатьох років [1].

Ефективне та раціональне використання пестицидів є ключовим фактором для продовження їх застосування в сільському господарстві, для безпечності чого важливо дотримуватися точ-

ності внесення та мінімізувати помилки в дозуванні, а також запобігати небажаного переміщення пестицидів за межі цільової зони. Крім дотримання передових методів управління, одним зі способів досягнення цього є використання сучасних технологій розпилення, як-от регулятор норми внесення [4; 5], автоматичне керування секціями штанги, індивідуальний контроль форсунок [6; 7] та системи PWM (імпульсно-модульного розпилення) [8; 9].

На покриття та ефективність розпилення пестицидів справляють вплив численні фактори, пов'язані з обладнанням і застосуванням, зокрема, швидкість руху та тип форсунки, розмір крапель відіграють важливу роль, оскільки вони можуть впливати на рівномірність покриття, якість, ефективність обприскування та дрейф пестицидів [10–14].

Сучасні тенденції включають використання обприскувачів із ширшими штангами (робоча ширина захвату $\geq 27,4$ м) та застосування за швидкостей, що перевищують номінальні ($\geq 19,3$ км/год), з метою охоплення більшої площі за мінімальний час.

Однак однією з основних проблем збільшення швидкості руху є зниження норми внесення, спричинене зменшенням загальної кількості крапель, що досягають цільової поверхні [15]. Крім того, зміни швидкості руху впливають на роботу форсунок та розподіл розмірів крапель, а збільшення швидкості може призвести до утворення більшої кількості дрібних крапель, що підвищує ризик дрейфу пестицидів.

Аналіз останніх досліджень. Попередні дослідження показали, що збільшення швидкості застосування може призводити до більшого дрейфу та зниження рівня покриття [10; 11; 13].

Якість розпилення є важливим параметром для класифікації форсунок на основі розміру крапель (СДК – середній діаметр крапель за об'ємом). Вона також впливає на рівень покриття та потенційний дрейф частинок [6]. Зазвичай традиційні плоскоструменеві форсунки (наприклад, TeeJet® XR або XRC), що створюють дрібні краплі, використовуються для внесення контактних пестицидів, оскільки вони забезпечують краще покриття ґрунту чи листової поверхні. Проте підвищений ризик дрейфу в разі використання таких форсунок призвів до появи інжекторних форсунок (AI-форсунок), як-от TeeJet® AIXR або TTI, які виробляють більші краплі, що краще підходять для внесення системних пестицидів та знижують ризик дрейфу [1; 7]. Усі перелічені фактори негативно впливають на економічні показники виробництва сільськогосподарської продукції. Тому постає завдання підвищити ефективність застосування пестицидів на етапі нанесення з використанням сучасних засобів контролю витрат робочих розчинів.

Комплексне дослідження, проведене USDA Economic Research Service щодо використання пестицидів для 21 вибраної культури в період з 1960 по 2008 рік, показало, що застосування пестицидів зросло більш ніж у три рази протягом перших двох десятиліть – з 88,9 млн кг дієвої речовини у 1960 році до 286,7 млн кг у 1981 році, а потім трохи знизилося до 234,1 млн кг у 2008 році [2]. Ця тенденція триває й донині, що підтверджує вагомий внесок пестицидів у загальні виробничі витрати на вирощування просапних культур у світі [3].

Дослідження довели, що AI-форсунки забезпечують кращий контроль дрейфу [1; 8] та можуть мати порівняну або навіть вищу ефективність покриття в зіставленні з традиційними форсунками [14; 15]. Тому правильний вибір форсунок є важливим для підтримання балансу між покриттям і дрейфом під час застосування пестицидів [20].

Зміни швидкості руху в поєднанні з іншими експлуатаційними факторами ускладнюють підтримання заданої норми внесення пестицидів. Однак точне дозування пестицидів (кг/га) є критично важливим для досягнення ефективного покриття та захисту рослин. Для забезпечення точності розпилення згодом було розроблено різні системи точного обприскування, які можуть бути інтегровані в сільськогосподарські обприскувачі. Одним із найпоширеніших рішень є регулятор норми внесення, який допомагає подолати проблему неточності внесення,

контролюючи витрату рідини та підтримуючи необхідну норму незалежно від змін швидкості руху [4; 5; 15].

Проте коригування витрати рідини відбувається шляхом зміни тиску розпилення, що також впливає на якість розпилення. Для форсунок із фіксованим отвором збільшення тиску призводить до утворення більшої кількості дрібних крапель [15]. Таким чином, хоча збільшення тиску допомагає підтримувати норму внесення та може покращити покриття, воно також суттєво підвищує ризик дрейфу [15].

Щоб розв'язати цю проблему, все частіше на сільськогосподарських обприскувачах використовують системи ІМР (імпульсно-модульованого розпилення), які дозволяють контролювати витрату рідини в широкому діапазоні швидкостей, змінюючи робочий цикл форсунки (час її відкритого стану), при цьому зберігаючи постійний тиск і розмір крапель [8; 9].

Формулювання мети дослідження. Огляд літератури показав, що більшість попередніх досліджень, які вивчали вплив типу форсунки або швидкості руху, були зосереджені переважно на оцінюванні покриття розпилення або дрейфу частинок [10–15]. Однак якість розпилення залишалася поза увагою цих досліджень. Крім того, більшість науковців не досліджували, як сучасні технології, зокрема регулятор норми внесення, можуть впливати на якість розпилення під час застосування пестицидів.

Нині значна частина традиційних штангових обприскувачів, особливо в малих і спеціалізованих господарствах, працює без регулятора норми внесення, тоді як більшість сучасних (зокрема, самохідних) обприскувачів оснащені цією технологією.

Отже, метою дослідження є оцінювання розпилення та якості обприскування за різних швидкостей руху для сільськогосподарського обприскувача, обладнаного регулятором норми внесення, та без нього.

Основна частина. Для внесення гербіцидів упродовж обох років використовували штанговий обприскувач John Deer M700, в агрегаті з трактором John Deer 6125 (СФГ «Костишина», смт. Любар, Житомирська область) (Рис. 1а). Обприскувач мав довжину штанги 18,3 м із форсунками, розташованими рівномірно на відстані 0,46 м одна від одної.

У 2023 році обприскувач використовувався без регулятора норми внесення.

У 2024 році на той самий обприскувач було встановлено регулятор норми внесення Micro-Trak MT-2405F II (Micro-Trak, виробництва США) у поєднанні з регулюючим клапаном TeeJet® 346BPR-2F-03 (TeeJet Technologies, рис. 1b та 1c відповідно).



Рис. 1. Штанговий обприскувач M700, використаний для тестування продуктивності розпилення (а);
Регулятор норми внесення Micro-Trak MT-2405F II, встановлений у 2024 році (b);
Регулюючий клапан TeeJet® 346BPR-2F-03, використаний у 2024 році (c).

Джерело: розроблено автором

Протягом обох років усі інші параметри обприскування, зокрема висота штанги та тип форсунок, залишалися незмінними. Єдиною відмінністю між двома досліджуваними роками була наявність або відсутність регулятора норми внесення. Таким чином, конфігурація обприскувача без регулятора (використана у 2023 році) буде позначена як CNS, а обприскувач із регулятором (використаний у 2024 році) – як SRC.

Для створення крапель середнього, дуже великого та надвеликого розміру відповідно до стандарту ASABE S572.1 [16] використовувалися форсунки XRC, AIXR та TTI (рис. 2а, 2б, 2с відповідно).

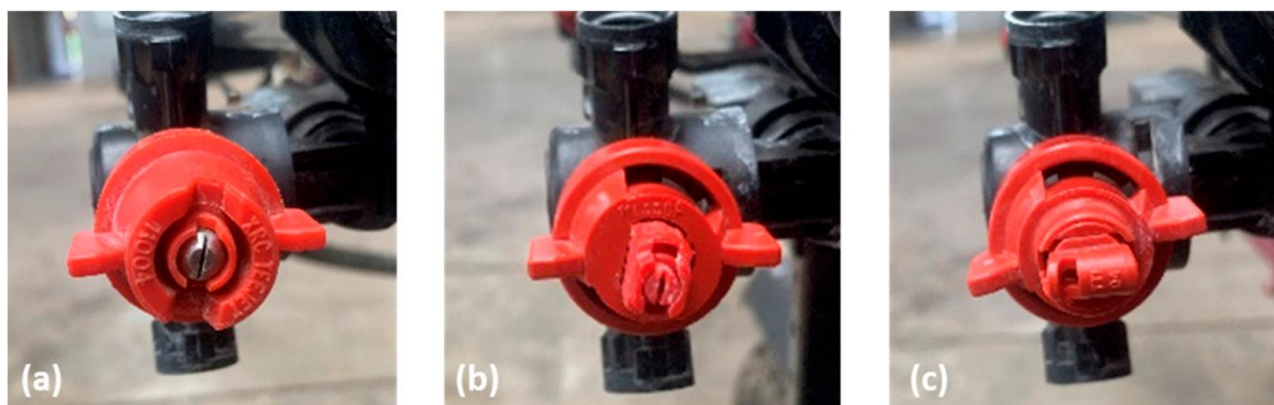


Рис. 2. Три різні типи форсунок TeeJet®(а): XRC 11004 – створює середні краплі, AIXR 11004 – створює дуже великі краплі (б), TTI 11004 – створює надвеликі краплі (с)

Джерело: розроблено автором

Основні характеристики форсунок: кут розпилення – 110°; розмір отвору – 0,4 мм. Форсунки були рівномірно розподілені по штанзі обприскувача (18,3 м) у такому порядку: зліва направо (рис. 1а): XRC → AIXR → TTI.

Під час випробувань кожна форсунка покривала шість рядків (відстань між рядками – 0,91 м), що формувало ділянку шириною 5,5 м та довжиною 182–200 м, що відповідало довжині поля.

Калібрування обприскувача перед випробуваннями становило: норма внесення – 187 л/га; тиск розпилення – 0,207 МПа; швидкість руху – 9,7 км/год; розмір форсунки – 0,4 мм.

Під час тестування змінювали лише швидкість руху, тоді як тип та розмір форсунок залишалися незмінними протягом усього періоду дослідження кожного року.

Таблиця 1

Інформація про гербіциди та норми дієвих речовин (кг/га)

Фаза внесення	Гербіцид	Дієва речовина	Норма (кг/га)
До сходів	Альфа-Прометрин	Прометрин	1,06
	Еквінокс	Flumioxazin	0,11
Після сходів	Евентус Адама	бентазон	0,07
	Dual Magnum	S-metolachlor	0,90
	Butyrac	2,4-дихлорфеноксиоцтова кислота (2,4-D)	0,90

Протягом обох років дослідження в полі, на посівах цукрових буряків, проводились два оброблення: до сходів, відразу після сівби; під час появи сходів, приблизно через 3–4 тижні після першого оброблення. Дати внесення гербіцидів: 2023 рік, до сходів – 17 травня, після сходів – 06 червня; 2024 рік, до сходів – 13 травня, після сходів – 1 червня.

Форсунки, використані в дослідженні (рис. 2):

(a) TeeJet® XRC 11004 – створює середні (medium) краплі.

(b) TeeJet® AIXR 11004 – створює дуже великі (very coarse) краплі.

(c) TeeJet® TTI 11004 – створює надвеликі (ultra-coarse) краплі.

Ці форсунки використовувалися для забезпечення різного розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.1 [16].

Для збору даних перед початком обприскування на полі розміщувалися дерев'яні блоки (по дев'ять у кожній сітці), до яких канцелярськими скріпками кріпився вологочутливий папір (WSP) (Рис. 3а). Розмір сітки становив $5,5 \times 15,2$ м. Відстань між блоками вздовж траєкторії обприскування становила 15,2 м, відстань між блоками вздовж штанги обприскувача – 1,8 м. Кожна 3×3 сітка охоплювала шість рядків культури й відповідала одному типу форсунки. Розмір аркуша паперу WSP становив 26×76 мм.

Перед обприскуванням вологочутливий папір (WSP) закріплювали на всіх блоках. Гербіциди (табл. 1) змішували з водою в зазначеній концентрації, після чого проводилося розпилення за різних швидкостей руху обприскувача. Після кожного проходу обприскувача WSP висушували протягом декількох хвилин. Потім зразки збиралися в марковані конверти, щоб уникнути подальшого забруднення через вологість.

Після завершення польових випробувань усі зразки проходили подальший аналіз.

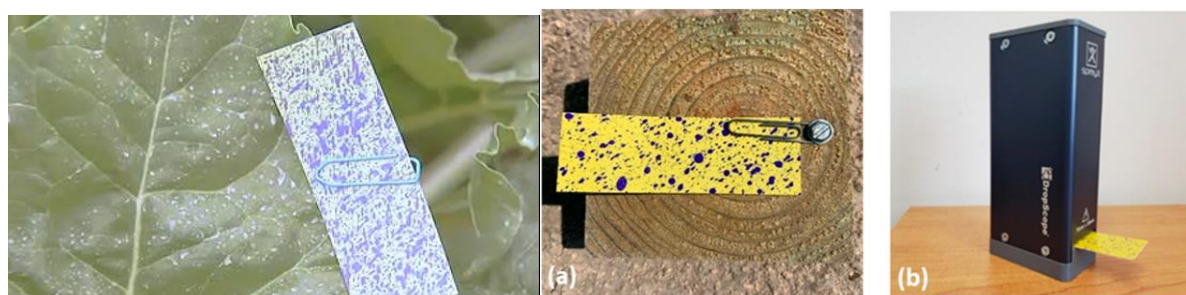


Рис. 3. Схема збору даних із закріпленням вологочутливим папером (WSP), який використовувався в полі (a); Прилад DropScore, що застосовувався для аналізу вологочутливого паперу (b)

Джерело: розроблено автором

Протягом кожного року випробування проводився контроль метеорологічних параметрів, включаючи: швидкість вітру (м/с); напрямок вітру; температуру ($^{\circ}\text{C}$); відносну вологість (%); точку роси ($^{\circ}\text{C}$). Для збору даних було встановлено метеостанцію (Model 6357 Vantage Vue™, Davis Instruments), яка фіксувала показники щохвилини протягом усього періоду внесення пестицидів. Середні погодні умови за весь період випробувань у 2023 та 2024 роках наведено в табл. 2. Умови залишалися стабільними протягом усього періоду випробування. Середня швидкість вітру була низькою (<1 м/с) в обидва роки, що не спричинило значного впливу на осідання крапель під час внесення пестицидів.

Таблиця 2

Середні метеорологічні умови під час випробувань у 2023–2024 роках

Рік	Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Відносна вологість (%)	Точка роси ($^{\circ}\text{C}$)	Швидкість вітру (м/с)
2023	$20,8 \pm 1,3$	$56,4 \pm 9,9$	$10,9 \pm 1,0$	$0,6 \pm 0,6$
2024	$18,8 \pm 1,7$	$75,0 \pm 0,9$	$13,9 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,7$

Температура у 2023 році була вищою ($20,8^{\circ}\text{C}$), ніж у 2024 році ($18,8^{\circ}\text{C}$). Відносна вологість у 2023 році ($75,0\%$) була значно вищою, ніж у 2024 році ($56,4\%$). Точка роси у 2023 році також була вищою ($13,9^{\circ}\text{C}$) порівняно з 2023 роком ($10,9^{\circ}\text{C}$).

Середня швидкість вітру залишалася низькою в обидва роки (<1 м/с), що мінімізувало вплив вітру на осідання крапель під час внесення пестицидів.

У лабораторії вологочутливий папір (WSP) було відскановано за допомогою приладу DropScore (Рис. 3b) та програмного забезпечення SprayX.

Основні параметри аналізу:

Покриття розпилення (Spray coverage) – відсоток площі, покритої краплями.

Щільність крапель (Droplet density) – кількість крапель на одиницю площі.

$D = 0,1$, $D = 0,5$ (VMD) та $D = 0,9$ – характеристики розміру крапель: $D0.1$ – розмір краплі, менше якого міститься 10% загального об'єму розпилюваної рідини. $D0.5$ (VMD – Volume Median Diameter) – медіанний діаметр краплі (мкм), за якого 50% об'єму розпилюваної рідини становлять краплі меншого розміру. $D0.9$ – розмір краплі, менше якого міститься 90% загального об'єму розпилю.

Якість розпилення (Spray quality) – класифікація розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.1.

Ці параметри використовувалися для оцінювання рівномірності розпилення та ефективності покриття під час випробувань.

Як зазначалося раніше, $D = 0,1$, $D = 0,5$ (VMD) і $D = 0,9$ характеризують розмір крапель у розпилюваній рідині: $D = 0,1$ – діаметр краплі, менше якого міститься 10% об'єму розпилюваної рідини; $D = 0,5$ (VMD) – медіанний діаметр краплі, за якого 50% загального об'єму розпилюваної рідини становлять краплі меншого розміру; $D = 0,9$ – діаметр краплі, менше якого міститься 90% об'єму розпилю.

Якість розпилення визначалася за стандартом ASABE S572.3 на основі VMD і класифікувала краплі за розмірами: VF ($61\ldots105$ мкм) – дуже дрібні; F ($106\ldots235$ мкм) – дрібні; M ($236\ldots340$ мкм) – середні; C ($341\ldots403$ мкм) – великі; VC ($404\ldots502$ мкм) – дуже великі; EC ($503\ldots665$ мкм) – екстремально великі; UC (>665 мкм) – надвеликі.

Програмне забезпечення SprayX використовувало фактор розтікання (spread factor) та інші параметри відповідно до ASABE S572.1, щоб визначити $D0.1$, $D0.5$, $D0.9$ і класифікацію розміру крапель для кожного тестового сценарію. Для аналізу даних використовувалося програмне забезпечення JMP® Pro 16.0.0.

Попереднє та післясходове внесення пестицидів не показали значущої взаємодії між собою ($p > 0,05$), тому дані були об'єднані для кожного року.

Оскільки основною метою дослідження було вивчення впливу швидкості руху на розпилення та якість обприскування для CNS та SRC, дані аналізувалися окремо для кожного типу форсунки, щоб уникнути непотрібних взаємодій між швидкістю руху та типами форсунок.

Для оцінювання впливу швидкості руху використовувався дисперсійний аналіз (ANOVA), де швидкість руху була основним фактором для кожного типу форсунки.

У разі значущих ефектів середні значення порівнювалися за допомогою t-критерію Ст'юдента з рівнем значущості $\alpha = 0,05$.

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) для CNS (без регулятора норми внесення) показали, що збільшення швидкості руху призводило до значного зниження покриття розпилення (табл. 3). Зменшення покриття спостерігалось для всіх типів форсунок (XRC, AIXR, TTI) в разі збільшення швидкості з $9,7$ км/год до $22,5$ км/год. Найвище покриття за найнижчої швидкості ($9,7$ км/год): XRC – $40,1\%$; AIXR – $35,9\%$; TTI – $26,3\%$. Найнижче покриття за найвищої швидкості ($22,5$ км/год): XRC – $11,3\%$; AIXR – $18,0\%$; TTI – $9,4\%$.

Таблиця 3

Результати ANOVA (p-значення) для покриття розпилення та кількості крапель залежно від типу форсунки для CNS та SRC

Тип форсунки	Покриття розпилення	Кількість крапель
	CNS	SRC
XRC	<0.0001 *	NS
AIXR	<0.0003 *	0.016 *
TTI	<0.0002 *	NS

Примітка:

CNS – обприскувач без регулятора норми внесення.

SRC – обприскувач із регулятором норми внесення.

XRC – форсунка розширеного діапазону (Extended Range).

AIXR – інжекторна форсунка з розширеним діапазоном (Air Induction Extended Range).

TTI – інжекторна форсунка Turbo TeeJet.

NS (Non-Significant) – незначний ефект ($p > 0,05$).

* – значний ефект ($p < 0,05$).

Причиною зменшення покриття для CNS є збільшення швидкості руху, об'єм розпилення на одиницю площі зменшується, оскільки система підтримує фіксовану витрату рідини, встановлену під час калібрування обприскувача. Зменшується кількість крапель на одиницю площі, що зафіксовано в табл. 4.

Для AIXR було зафіксовано зниження покриття з 35,9% (за 16,1 км/год) до 18,0% (за 22,5 км/год). Однак кількість крапель залишалася стабільною в разі зміни швидкості руху. Це не відповідало типовій закономірності, за якої зменшення покриття супроводжується зменшенням кількості крапель.

Можливе пояснення цьому явищу – особливості формування крапель інжекторними форсунками AIXR, які створюють більші, менш щільно розташовані краплі порівняно з іншими типами форсунок.

Таблиця 4

Вплив швидкості руху на покриття розпилення (%) та кількість крапель залежно від типу форсунки для CNS – обприскувача без регулятора норми внесення

Швидкість (км/год)	Покриття розпилення (%)	Кількість крапель
	XRC	AIXR
9.7	40.1 a	35.9 a
12.9	29.7 b	29.5 b
16.1	23.5 c	22.0 c
19.3	16.0 d	21.0 c
22.5	11.3 e	18.0 c

Примітки:

Значення в одному стовпці з різними літерами (a, b, c, d, e) означають статистично значущі відмінності ($p < 0.05$).

XRC – форсунка розширеного діапазону.

AIXR – інжекторна форсунка з розширеним діапазоном.

TTI – інжекторна форсунка Turbo TeeJet.

Результати досліджень CNS-обприскувачів підкреслюють важливість вибору та підтримання відповідної швидкості руху під час обприскування сільськогосподарськими обприскувачами без регулятора норми внесення.

Як і у випадку з CNS, зменшення покриття розпилення для форсунок XRC і TTI також очікувалося через загальне зниження норми внесення на швидкостях, вищих за калібрувальну (9,7 км/год). Нами також зафіксовано збільшення відхилення в нормі внесення в разі зміни швидкості руху

в обприскувачах без регулятора. Для SRC покриття розпилення форсунок XRC і TTI було більш стабільним за збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год (табл. 5) у порівнянні з CNS.

Таблиця 5

Результати дослідження впливу швидкості руху (км/год) на покриття розпилення (%) і кількість крапель для різних типів форсунок (XRC, AIXR, TTI)

Швидкість (км/год)	XRC (покриття, %)	AIXR (покриття, %)	TTI (покриття, %)	XRC (кількість крапель)	AIXR (кількість крапель)	TTI (кількість крапель)
9.7	41.0	43.5 ab	37.5	6845	2441 b	1325
12.9	50.8	49.4 a	34.3	7893	5736 a	1677
16.1	46.9	37.9 bc	35.7	8626	3371 b	2263
19.3	34.5	25.2 d	31.2	7355	3366 b	2092
22.5	37.2	32.1 cd	28.0	8218	5970 a	2334

Позначки a, b, c, d вказують на статистичні відмінності між значеннями всередині одного стовпця, що означає, що деякі значення значно відрізняються одне від одного за рівнем значущості ($p < 0.05$).

Хоча кількість крапель варіювалася залежно від швидкості руху, середнє значення залишалося статистично подібним ($p > 0,05$) для обох типів форсунок.

Щодо форсунки AIXR збільшення швидкості руху призводило до нестабільних результатів як у покритті розпилення, так і в кількості крапель. У разі підвищення швидкості покриття зменшувалося, а кількість крапель змінювалася залежно від швидкості руху.

Зміни швидкості руху під час внесення пестицидів у полі можуть впливати на норму внесення, однак контролер норми дозволяє підтримувати заданий рівень, регулюючи тиск розпилення і, відповідно, витрату форсунок [3; 4]. Результати для форсунок XRC і TTI підтвердили цю тенденцію, оскільки SRC забезпечував стабільне покриття розпилення за різних швидкостей руху. Подібні результати роботи системи контролю норми внесення були отримані Al-Gaadi і Ayers [4], а також Ayers та ін. [5]. Вони дійшли висновку, що застосування контролера обприскування значно знижує похибки в нормі внесення, що дозволяє підтримувати необхідну норму на різних швидкостях руху.

Зменшення похибок у нормі внесення також сприяє більш рівномірному покриттю розпилення, що підтверджують результати нашого дослідження. Хоча було зазначено, що кількість крапель збільшується зі зростанням швидкості руху з 9,7 км/год до 22,5 км/год для форсунок XRC і TTI (табл. 5). Однак ця тенденція не була статистично значущою ($p > 0,05$).

Результати для форсунки AIXR за використання як CNS, так і SRC вказують на нестабільні показники розпилення в разі зміни швидкості руху, що робить її менш передбачуваною порівняно з форсунками XRC і TTI.

У табл. 6 міститься значення p за результатами ANOVA-аналізу якості розпилення (D0.1, D0.5 і D0.9) для обприскувачів CNS і SRC з використанням трьох різних типів форсунок.

Таблиця 6

Вплив швидкості руху на якість розпилення (D0.1, D0.5, D0.9) для CNS та SRC

Ефект	D0.1	D0.5	D0.9
	CNS	SRC	CNS
XRC	0.0101*	NS	NS
AIXR	0.0115*	0.004*	0.0317*
TTI	0.0096*	NS	NS

(*) означає значний вплив ($p < 0.05$). NS означає відсутність значного впливу ($p > 0.05$).

XRC, AIXR, TTI – це типи форсунок: XRC – TeeJet® Extended Range, AIXR – Air Induction Extended Range

D0.1, D0.5 і D0.9 – це діаметри крапель (мкм), за яких, відповідно, 10%, 50% і 90% об'єму розпиленої рідини міститься в краплях меншого розміру.

Основними результатами для CNS є швидкість руху, що впливала на D0.1 для всіх типів форсунок. Для D0.5 і D0.9 вплив швидкості не спостерігався, за винятком D0.5 для форсунки AIXR (Табл. 7).

Таблиця 7

Вплив швидкості руху на D0.1, D0.5 і D0.9 для CNS

Тип форсунки	Швидкість (км/год)	D0.1 (мкм)	D0.5 (мкм)	D0.9 (мкм)
XRC	9.7	205.8 a	420.4	719.3
	12.9	180.2 b	350.6	687.5
	16.1	174.4 bc	374.4	713.0
Продовження табл. 7.				
AIXR	19.3	178.4 bc	374.5	697.0
	22.5	164.6 c	399.5	774.1
	9.7	338.0 a	822.6 a	1385.3
	12.9	330.0 a	841.8 a	1410.7
	16.1	329.4 a	818.3 a	1435.3
TTI	19.3	271.1 b	719.1 b	1561.4
	22.5	244.5 b	692.1 b	1405.0
	9.7	617.1 ab	1396.5	1975.0
	12.9	663.0 a	1319.7	2397.0
	16.1	659.5 a	1486.7	2467.0
	19.3	556.3 b	1229.3	2019.3
	22.5	412.1 c	985.7	1607.2

Значення D0.1 зменшувалося із збільшенням швидкості руху, незалежно від типу форсунки. Для форсунки AIXR також спостерігалось зменшення D0.5 за зростання швидкості руху.

На рис. 4 представлена класифікація розміру крапель на основі VMD (середнього діаметра крапель за об'ємом) для форсунок XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для CNS (XRC: найбільші зміни в разі збільшення швидкості спостерігалися в категоріях VF (дуже дрібні краплі) та F (дрібні краплі). Частка F-крапель зросла з 2,5% до 5,8%, а VF-крапель – з 12,6% до 19,0% у разі збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год. Найбільші зміни зафіксовані для UC (дуже великі краплі), за ними йдуть F, VF та M (середні краплі). Частка UC-крапель зменшилася на 12,8% для AIXR і на 14,5% – для TTI.

Оскільки під час внесення гербіцидів тиск розпилення в CNS залишався незмінним, зміни в якості розпилення пояснюються загальним зменшенням кількості крапель на одиницю площі в разі збільшення швидкості руху (що підтверджується даними (табл. 4).

Дані для SRC (обприскувач із контролером норми внесення): у SRC не спостерігалось впливу швидкості на D0.1, D0.5, D0.9 для XRC і TTI (табл. 6).

Для форсунки AIXR швидкість значно впливала на D0.1 і D0.5 – вони зменшувалися в разі збільшення швидкості руху (табл. 8).

Для XRC і TTI також відзначалася подібна тенденція, але вона не була статистично значущою ($p > 0,05$).

Графік на рис. 4 ілюструє, як змінюється якість розпилення для кожного типу форсунок у разі зміни швидкості руху обприскувача без контролера.

Залежності, зображені на рис. 5 (якість розпилення для SRC), показують, що частка F-крапель зросла з 12,0% до 19,8%, а VF-крапель – з 19,3% до 29,8% за збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год.

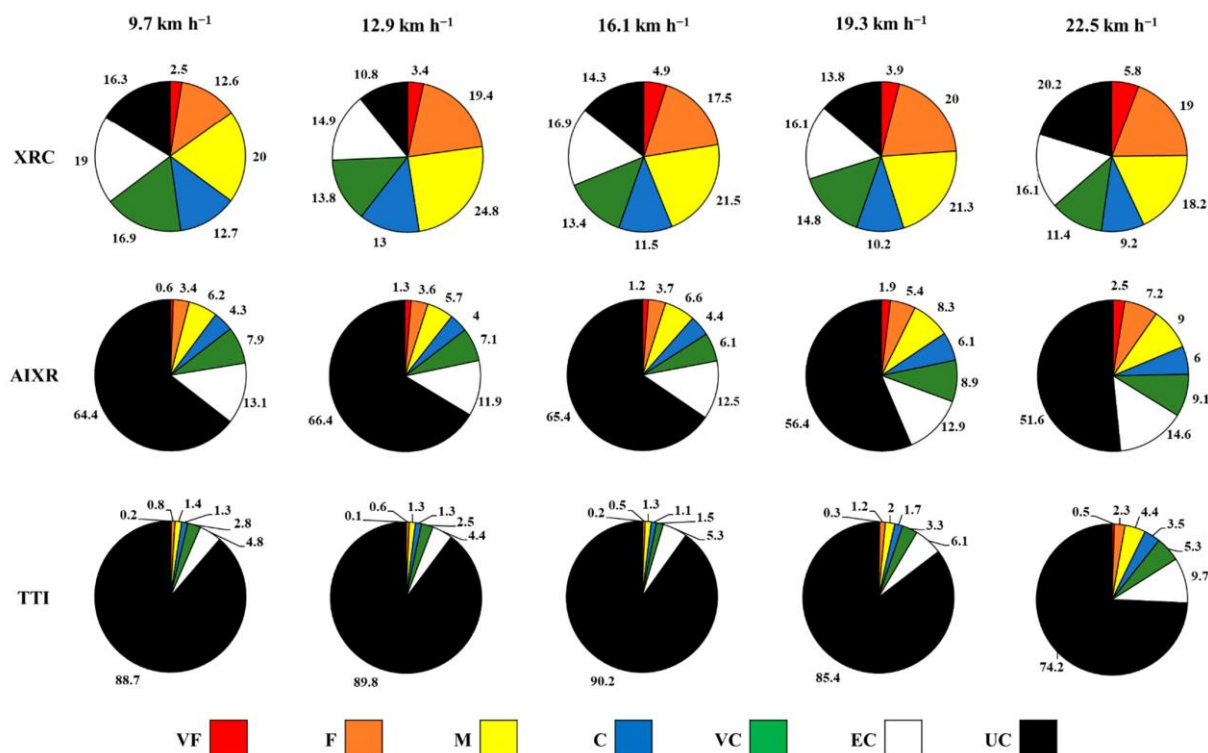


Рис. 4. Якість розпилення (класифікація розміру крапель на основі середнього діаметра за об'ємом) для XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для CNS

CNS – обприскувач без контролера норми внесення. XRC – TeeJet® Extended Range. AIXR – Air Induction Extended Range. TTI – Turbo-TeeJet Induction. Класифікація розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.3: VF – дуже дрібні краплі (Very Fine). F – дрібні краплі (Fine). M – середні краплі (Medium). C – великі краплі (Coarse). VC – дуже великі краплі (Very Coarse). EC – екстремально великі краплі (Extremely Coarse). UC – ультравеликі краплі (Ultracoarse).

Джерело: розроблено автором

Таблиця 8

Вплив швидкості руху на D0.1, D0.5 і D0.9 для SRC

Тип форсунки	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 a	818.2 a	1320.8
	12.9	282.5 b	693.9 b	1281.3
	16.1	279.3 b	608.3 c	1099.5
	19.3	251.2 bc	571.9 c	1152.6
	22.5	224.4 c	550.3 c	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

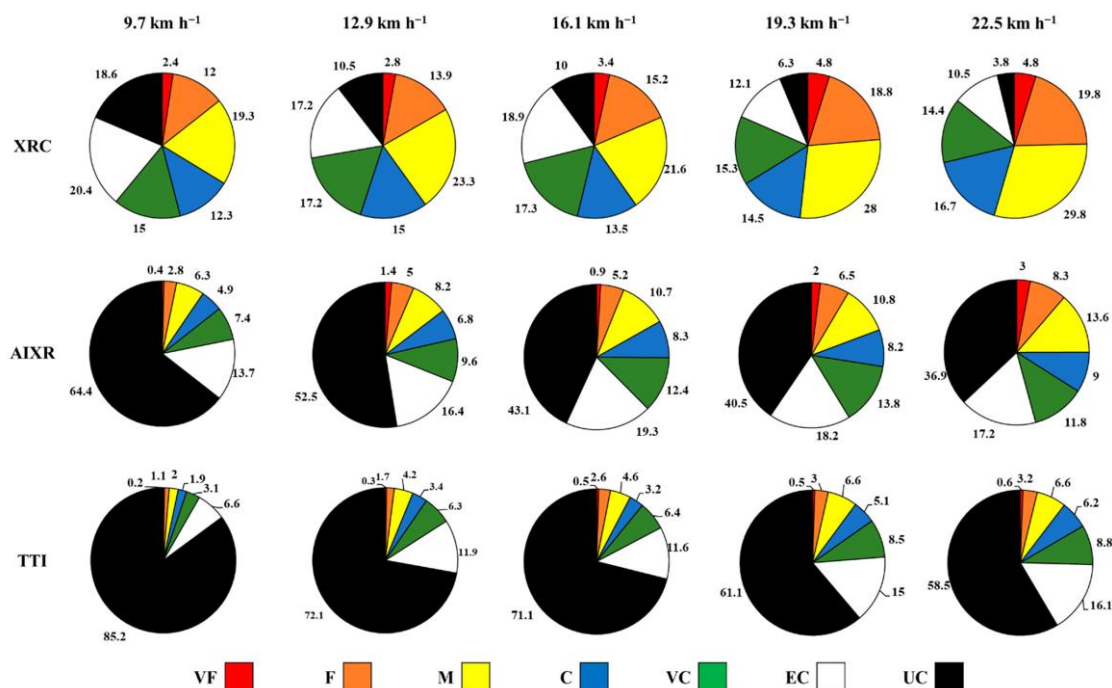


Рис. 5. Якість розпилення (класифікація розміру крапель на основі середнього діаметра за об'ємом) для XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для SRC

SRC – обприскувач з контролером норми внесення.

XRC, AIXR, TTI – це типи форсунок:

XRC – TeeJet® Extended Range

AIXR – Air Induction Extended Range

TTI – Turbo-TeeJet Induction

Джерело: розроблено автором

Цей графік демонструє, як змінюється якість розпилення для кожного типу форсунок у разі зміни швидкості руху обприскувача, оснащеного контролером норми внесення (SRC).

Висновки. У запропонованому дослідженні було оцінено ефективність розпилення для двох різних налаштувань обприскувача (CNS – без контролера норми внесення та SRC – з контролером норми внесення) за різних швидкостей руху. Аналіз проводився за трьома типами форсунок (XRC, AIXR, TTI). На основі отриманих результатів можна зробити певні висновки.

Для CNS збільшення швидкості руху зменшувало кількість крапель, що потрапляли на одиницю площі, що своєю чергою знижувало рівень осідання розпилюваної рідини.

Для SRC якість крапель і рівень осідання були стабільнішими в разі зміни швидкості руху завдяки автоматичному регулюванню витрати рідини (а отже, і тиску розпилення) контролером.

Варіації якості розпилення (зміни в розподілі розмірів крапель) за підвищення швидкості спостерігалися як для CNS, так і для SRC. Однак ці зміни були більш вираженими для SRC, оскільки контрольований тиск змінювався залежно від швидкості.

Серед форсунок тенденції в розпиленні та якості розпилення були подібними для XRC і TTI як у CNS, так і за SRC. Водночас форсунка AIXR показала нестабільний рівень осідання і якості розпилення в разі зміни швидкості руху.

Список використаних джерел

1. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022.



2. Fernandez-Cornejo J. Nehring R.F. Osteen C.; Wechsler S. Martin A. Vialou A. Pesticide Use in US Agriculture: 21 Selected Crops, 1960–2008; USDA-ERS Economic Information Bulletin 124; United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 2014.
3. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 U.S. Farm Production Expenditures. 2022.
4. Al-Gaadi K. Ayers P. Monitoring controller-based field sprayer performance. Appl. Eng. Agric. 2014, 10, 205-208.
5. Ayers P. Rogowski S. Kimble B. An investigation of factors affecting sprayer control system performance. Appl. Eng. Agric. 2020, 6, 701-706.
6. Luck J. Zandonadi R. Luck B. Shearer S. Reducing pesticide over-application with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers. Trans. ASABE 2010, 53, 685-690.]
7. Sharda A. Fulton J.P. McDonald T.P. Zech W.C. Darr M.J. Brodbeck C.J. Real-time pressure and flow dynamics due to boom section and individual nozzle control on agricultural sprayers. Trans. ASABE 2010, 53, 1363-1371.
8. Butts T.R. Samples C.A. Franca L.X. Dodds D.M. Reynolds D.B. Adams J.W.; Zollinger R.K. Howatt K.A. Fritz B.K. Clint Hoffmann, W. Spray droplet size and carrier volume effect on dicamba and glufosinate efficacy. Pest Manag. Sci. 2018, 74, 2020-2029.
9. Заєць М.Л. Обґрунтування вдосконалення розпилювачів та аналіз існуючих конструкцій. *Матеріали наук.-практ. конф. науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 132–138.
10. Заєць М. Визначення динамічних показників рідинно-повітряного потоку. *Матеріали XXIV міжнародного науково-практичного форуму*. Львів : ЛНУП., 2023. С. 420–425.
11. Заєць М.Л. Моделювання технологічного процесу роботи інжекторного розпилювача рідини. *Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 9–12.
12. Hofman V. Solseng E. Reducing Spray Drift. North Dakota State University Extension Service; Agricultural and Biosystems Engineering: Fargo, ND, USA, 2001; AgriEngineering 2023, 5, 519.
13. Nuytens D. De Schamphelleire M. Baetens K. Sonck B. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers. Trans. ASABE 2007, 50, 1129 -1140.
14. 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.
15. Ozkan H. Womac A. Best Management Practices for Boom Spraying. Ohio State University Extension Publication AEX-527-05. 2005.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2025 р.

M. Zayets
Polissia National University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A SPRAYER WITH A DOSAGE RATE CONTROLLER AT VARIABLE OPERATING SPEED

Summary

This article is dedicated to studying the spraying process and assessing its quality at different travel speeds for an agricultural sprayer equipped with a rate controller.

Speed variation is a common and unavoidable factor during pesticide application using sprayers. Field tests were conducted to evaluate the impact of speed changes on spraying and application quality using a boom sprayer without a rate controller (CNS) and with a rate controller (SRC).

During the study, the sprayer boom was evenly divided among three types of nozzles (XRC, AIXR, and TTI) to generate droplets of different sizes (medium, very large, and ultra-large, respectively). Before testing, the sprayer was calibrated to apply 180 L/ha at an operating pressure of 0,207 MPa and a speed of 9,7 km/h.



To evaluate spraying and application quality, pesticide application was performed at five different travel speeds: 9,7, 12,9, 16,1, 19,3, and 22,5 km/h. Data collection was carried out by placing water-sensitive paper at various points along the sprayer boom in the field.

Results for CNS (without a rate controller) showed that as speed increased, the number of applied droplets and spray deposition significantly decreased ($p < 0,05$) for all three nozzle types, which was due to a reduction in droplet density per unit area. For SRC (with a rate controller), spraying remained more stable despite speed changes.

Travel speed affected spray quality for both CNS and SRC. However, for SRC, greater variations in spray quality were observed due to the increase in operating pressure as speed increased. The XRC and TTI nozzles exhibited similar trends in spray deposition and quality across both sprayer configurations (CNS and SRC). Meanwhile, the AIXR nozzle demonstrated inconsistent spraying performance and quality when travel speed changed.

The findings of this study indicate that agricultural sprayers equipped with a rate controller provide more uniform and stable spraying compared to traditional sprayers (without a controller) when travel speed varies during pesticide application. Although spray quality is also affected when using a rate controller, following best practices, such as proper nozzle selection and application at nominal speeds, can help minimize these effects and ensure effective pesticide application.

Keywords: agricultural sprayers, application rate, travel speed, rate controller, spray coverage, spraying quality.