

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Михайло ШУЛЯК

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

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

Виконав:

(підпис)

Дмитро СОЛОМКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2302-2м

Науковий керівник:

(підпис)

Владислав ЗУБКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олексій АЛФЬОРОВ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Соломко Дмитро Миколайович

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

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 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 3 таблиці, 6 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Було проведено однорічний польовий експеримент для дослідження самохідного штангового обприскувача з автоматичним керуванням нормою витрати відповідно до параметра «Відхилення від норми витрати» (ВНВ). У дослідженні представлено обприскування малим об'ємом з фіксованою нормою витрати 150 л/га у трьох режимах роботи самохідного обприскувача (робочий режим 1 (PP1) – 10 км/год, робочий режим 2 (PP2) – 13 км/год та робочий режим 3 (PP3) – 15 км/год). За допомогою вологоміра ґрунту АМ-128 SOIL було виміряно миттєву вологість ґрунту в досліджуваній зоні, щоб встановити її вплив на роботу зрошувача.

Застосований однофакторний дисперсійний аналіз показує наявність значних відмінностей при $p < 0,05$ між вибраними режимами роботи обприскувача. Кореляційний аналіз виявив низхідний, слабкий до помірного зв'язку (-0,227; -0,410; -0,412) між робочою швидкістю обприскувача та вологістю ґрунту для трьох режимів роботи. Слабка до помірного, але позитивна кореляція (0,069; 0,243; 0,488) також спостерігається між робочою швидкістю та відхиленнями від норми витрати, що вказує на те, що зі збільшенням робочої швидкості зростає і норма витрати. Найсильнішу негативну кореляцію було виявлено між робочою швидкістю та відхиленням

від норми витрати (-0,783; -0,953; -0,977), тобто зі збільшенням швидкості - відхилення зменшується.

Два типи регресійних моделей (лінійна та кубічна) порівнювалися при $p < 0,05$, визначаючи зв'язок між робочою швидкістю та відхиленням від норми витрати у трьох режимах роботи. Кубічна модель у PP2 характеризується найкращою похибкою оцінки, високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,937$) та найкраще описує досліджувані параметри.

Ключові слова: норма витрати; норма внесення; обприскувач; , контроль витрати; статистичний аналіз

ABSTRACT

Solomko Dmytro Mykolayovych

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

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

The graduation qualification work is presented on 44 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 3 tables, 6 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

A one-year field experiment was conducted to study a self-propelled boom sprayer with automatic flow rate control according to the parameter "Deviation from flow rate" (VNV). The study presents small volume spraying with a fixed flow rate of 150 l/ha in three operating modes of a self-propelled sprayer (operating mode 1 (PP1) - 10 km/h, operating mode 2 (PP2) - 13 km/h and operating mode 3 (PP3) - 15 km/h). Using the AM-128 SOIL soil moisture meter, the instantaneous soil moisture in the study area was measured to determine its effect on the operation of the irrigator.

The applied one-way analysis of variance shows the presence of significant differences at $p < 0.05$ between the selected sprayer operating modes. Correlation analysis revealed a downward, weak to moderate relationship (-0.227; -0.410; -0.412) between the sprayer operating speed and soil moisture for the three operating modes. A weak to moderate, but positive correlation (0.069; 0.243; 0.488) is also observed between operating speed and deviations from the flow rate, indicating that with increasing operating speed, the flow rate also increases. The strongest negative correlation was found between operating speed and deviation from the flow rate (-0.783; -0.953; -0.977), i.e. with increasing speed, the deviation decreases.

Two types of regression models (linear and cubic) were compared at $p < 0.05$, determining the relationship between operating speed and deviation from the flow rate in the three operating modes. The cubic model in PP2 is characterized by the best estimation error, high coefficient of determination ($R^2 = 0.937$) and best describes the studied parameters.

Keywords: flow rate; application rate; sprayer; , flow control; statistical analysis

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування.....	11
1.2 Аналіз досліджень систем автоматичного керування обприскуванням....	25
Розділ 2. Методика досліджень	31
2.1 План експерименту.....	31
2.2 Програмування бортового комп'ютера для заданої норми внесення.....	32
2.3 Статистичний аналіз даних.....	33
Розділ 3. Аналіз отриманих дослідних даних	35
3.1 Одновимірний дисперсійний аналіз та кореляційний аналіз	35
3.2 Регресійні моделі.....	37
Висновки.....	41
Список використаних джерел.....	42

ВСТУП

1. Актуальність теми

Сучасні системи точного землеробства є ключовим напрямом інноваційного розвитку аграрного сектору, спрямованим на підвищення ефективності технологічних операцій, зменшення витрат ресурсів та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Однією з найважливіших технологічних операцій у рослинництві є внесення засобів захисту рослин, оскільки від рівномірності покриття та точності дотримання норми витрати залежать продуктивність культур, економічні показники виробництва та екологічна безпека технологій.

У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження факторів, що впливають на якість внесення препаратів та стабільність роботи самохідних обприскувачів. Автоматичні системи керування нормою витрати дозволяють зменшити людський фактор і забезпечити точність обприскування в широкому діапазоні робочих режимів. Проте їх ефективність може залежати від умов польової роботи, зокрема вологості ґрунту, зміни швидкості руху, параметрів робочої системи й програмних налаштувань.

Це зумовлює потребу в науковому обґрунтуванні впливу ключових факторів на якість внесення засобів захисту рослин, що є важливим як у теоретичному, так і в практичному вимірах. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів автоматичного керування обприскувачами, підвищення точності технологічних операцій та оптимізації витрат препаратів.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питанню точності обприскування та факторів, що впливають на рівномірність внесення робочої рідини, присвячено значну кількість наукових праць вітчизняних і зарубіжних дослідників. У роботах розглядаються фізико-технічні параметри штангових обприскувачів, вплив швидкості руху, тиску, типу форсунок, коефіцієнтів покриття й впливу зовнішніх умов. Окремі

дослідження зосереджені на аналізі систем автоматичного регулювання норми витрати, які дозволяють коригувати подачу рідини в режимі реального часу відповідно до зміни швидкості й навантаження.

Попри значний науковий інтерес, недостатньо вивченими залишаються аспекти поєданого впливу робочих режимів обприскувача та ґрунтово-кліматичних умов на відхилення від встановленої норми внесення, а також ефективність різних типів математичних моделей для прогнозування відхилень. Крім того, актуальним є питання визначення найбільш інформативних параметрів, які характеризують стабільність роботи систем автоматичного керування, і побудова моделей, здатних адекватно описувати взаємозв'язки між ними.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямі є необхідними для поглиблення наукових знань і вдосконалення технологій точного внесення засобів захисту рослин.

3. Мета дослідження

Метою магістерської роботи є дослідження факторів, що впливають на показники якості внесення засобів захисту рослин у системах точного землеробства, та оцінка ефективності автоматичного керування нормою витрати самохідного обприскувача в різних робочих режимах.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес внесення засобів захисту рослин самохідним штанговим обприскувачем у системах точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є відхилення від норми витрати робочої рідини та фактори, що визначають точність і стабільність роботи системи автоматичного керування нормою внесення.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі автоматичного керування нормою внесення та факторів, що визначають якість обприскування.

Провести польовий експеримент для визначення впливу швидкості руху обприскувача та вологості ґрунту на параметри внесення.

Виконати одновимірний дисперсійний аналіз для оцінки статистично значущих відмінностей між режимами роботи.

Дослідити кореляційні зв'язки між робочою швидкістю, вологістю ґрунту та відхиленням від норми витрати.

Побудувати лінійні та нелінійні регресійні моделі для опису закономірностей зміни показників внесення.

Оцінити ефективність роботи системи автоматичного керування нормою витрати та визначити найбільш оптимальні режими її функціонування.

7. Методи дослідження

У роботі використано комплекс методів, зокрема: теоретичний аналіз наукових джерел; методи експериментальних польових досліджень; вимірювання параметрів роботи обприскувача та умов середовища; кореляційний та дисперсійний аналіз; побудова регресійних моделей; статистична обробка даних із використанням сучасних програмних засобів.

8. Структура та обсяг роботи

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Роботу викладено на 44 сторінках машинописного тексту, містить 3 таблиці, 6 рисунків і 2 додатки. Список використаних джерел включає 25 найменувань.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування

Вплив швидкості вітру на якість обприскування залишається одним із ключових чинників, що визначають ефективність застосування засобів захисту рослин та рідких добрив у сучасному рослинництві. У процесі дрібнокраплинного розпилення робочого розчину будь-яка зміна руху повітря безпосередньо позначається на траєкторії польоту крапель, рівномірності покриття листової поверхні та ступені знесення препарату за межі робочої зони. Чим вища швидкість вітру, тим складніше забезпечити прогнозовану дію робочої рідини, що може спричинити значні втрати препарату, зменшення його ефективності, зростання ризиків фітотоксичності чи забруднення суміжних територій. Будь-які невраховані вітрові потоки впливають на дроблення крапель, їх знос чи передчасне випаровування, що особливо критично при використанні засобів із вузьким діапазоном рекомендованих норм внесення [1].

При обприскуванні більшість крапель, що формуються розпилювачами, мають масу недостатню для прямолінійного падіння. Краплі діаметром меншим ніж 200 мкм є легкими й легко підхоплюються повітряним потоком навіть при слабкому вітрі. За швидкості 1–2 м/с починають проявлятися перші ознаки зносу дрібних фракцій, і хоча цей діапазон вважається прийнятним для обприскування, ризики нерівномірного нанесення препарату вже зростають. При збільшенні швидкості до 3–4 м/с нерівномірність покриття між правою та лівою стороною штанги збільшується, виникають ділянки з недовнесенням і перевнесенням робочого розчину. Якщо ж вітер сягає 5–6 м/с, то більшість регламентів категорично забороняє проведення обприскування, оскільки знесення препарату стає неконтрольованим і може перевищувати десятки метрів, що створює загрозу навколишнім посівам, водоймам та іншим об'єктам [2].

Значний вплив на поведінку крапель має не лише швидкість, але й характер вітрового потоку. Поривчастий вітер вважається найбільш небезпечним, оскільки навіть при середній швидкості у межах допустимого діапазону короточасні імпульси можуть багаторазово збільшувати знос. При ривках понад 1–2 м/с відносно середнього значення відбувається розтягування факела розпилення, зсув крапельної хмари убік та нерівномірне відкладення препарату на листках. Листя та стебла рослин при поривчастому вітрі перебувають у постійному русі, що додатково ускладнює доступ робочого розчину до нижніх ярусів та зменшує кількість крапель, які осідають на цільових поверхнях. В окремих випадках спостерігається ефект «відмивання» крапель потоком повітря з передньої сторони листка та їх надмірне накопичення на зворотному боці, що знижує загальну ефективність препарату.

Особливо чутливими до вітру є ультрамалооб'ємні та дрібнодисперсні обприскування, характерні для систем із використанням розпилювачів типу hollow cone та high-drift-risk nozzle. Чим менший діаметр краплі, тим легше вона підхоплюється вітром і переноситься за межі цільової поверхні. Дрібні краплі хоча і забезпечують кращу біологічну ефективність завдяки рівномірному покриттю, однак цей ефект нівелюється навіть слабкими повітряними потоками, що призводить до суттєвих втрат робочої рідини та неконтрольованого впливу на сусідні культури. У відповідь на ці виклики сучасні технології рекомендують використовувати інжекторні розпилювачі, які формують крупніші та важчі краплі, менш схильні до знесення. Проте навіть вони не можуть повністю компенсувати дію сильного вітру, і ефективність таких систем різко падає за швидкості понад 4 м/с [3].

Окремої уваги потребує питання мікроклімату в приземному шарі повітря. Навіть у безвітряну погоду на висоті штанги обприскувача можуть існувати локальні турбулентні потоки, створені рухом машини, рельєфом поля або тепловими потоками від нагрітого ґрунту. При високій температурі й низькій вологості повітря дрібні краплі швидко випаровуються ще в польоті, а вітер лише пришвидшує цей процес. Так званий ефект «сухої хмари» особливо

небезпечний у поєднанні з повітряними потоками 3–5 м/с: краплі не лише не досягають листової поверхні, а й можуть повністю зникнути, що робить обприскування марним.

Вітер також здатний порушувати стабільність роботи штанги. Бічні повітряні потоки створюють коливання, змінюють відстань між розпилювачами та рослинами, що призводить до нерівномірності смуги обробки. Надмірне підняття одного краю штанги веде до надмірного дрібнення крапель і зростання ризику зносу, тоді як опускання іншого — до перевнесення та стікання робочої рідини з листків. Система стабілізації штанги частково компенсує такі коливання, але при значній швидкості вітру навіть високотехнологічні машини не здатні повністю нівелювати ці ефекти [4].

Важливим аспектом є також законодавчі й екологічні вимоги щодо зносу пестицидів. У багатьох країнах встановлено обмеження на використання обприскування при швидкості вітру вище певного порогу, зазвичай 3–5 м/с. Порушення цих регламентів може призвести до забруднення водних об'єктів, загибелі корисних комах, ураження чутливих культур і створення зон із залишковими концентраціями препаратів [5]. Сучасні системи точного землеробства, які включають метеостанції, сенсори вітру та автоматичну фіксацію погодних параметрів, дозволяють уникнути помилок, пов'язаних із суб'єктивною оцінкою умов обприскування, та створюють можливість більш раціонального і безпечного застосування хімічних засобів.

Враховання швидкості вітру при плануванні обприскування дозволяє значно підвищити ефективність внесення препаратів. Оптимальним вважається діапазон не більше 1–3 м/с, коли рух повітря достатній для легкого проникнення крапель у рослинний покрив, але недостатній для їх зносу. У цей період досягається найкраща рівномірність осідання робочої рідини, а витрати препарату знижуються. При цьому важливо проводити обприскування у ранкові або вечірні години, коли вітер слабшає, а випаровування мінімальне.

Таким чином, швидкість вітру є одним із визначальних факторів якості обприскування, що впливає на траєкторію польоту крапель, рівномірність їхнього розподілу, ступінь зносу та загальну ефективність застосовуваних засобів захисту рослин. Ігнорування цього параметра може призвести до суттєвих агрономічних, економічних та екологічних втрат. В умовах сучасного землеробства правильне врахування вітрових режимів, використання відповідних типів розпилювачів і застосування технологій точного моніторингу дозволяють мінімізувати негативний вплив вітру та забезпечити стабільну якість обробітку посівів.

Вплив температури та вологості повітря на якість обприскування є одним із ключових факторів, що визначають ефективність застосування засобів захисту рослин у сучасному рослинництві. Хоча на перший погляд обприскування здається простим технологічним процесом, його результативність значною мірою залежить від метеорологічних умов, особливо від температури та відносної вологості. Ці параметри безпосередньо впливають на випаровування робочого розчину, дрейф крапель, рівномірність покриття поверхні рослин і, зрештою, на біологічну дію препарату. Саме тому розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час руху крапель у повітрі, є необхідним для забезпечення високої якості обприскування і досягнення бажаного захисного ефекту [6, 7].

Температура повітря визначає інтенсивність випаровування крапель робочого розчину. При підвищенні температури швидкість випаровування зростає, а отже, дрібні краплі можуть зменшуватися в розмірі ще до того, як потраплять на листову поверхню. Це веде до збільшення ризику дрейфу — перенесення крапель повітряними потоками за межі цільової площі. Дрейф особливо небезпечний при роботі з гербіцидами, оскільки може спричинити пошкодження сусідніх культур або забруднення прилеглих ділянок. При температурах понад 25–28 °C випаровування стає настільки інтенсивним, що застосування препаратів у дрібнокрапельному режимі стає мало ефективним. Краплі діаметром 100–150 мкм можуть втрачати значну частину об'єму під час

польоту, а краплі менше 80 мкм практично повністю переходять у дрейф. Це призводить до зниження кількості робочої рідини, що досягає цільового об'єкта, та до нерівномірного покриття поверхні рослин.

Водночас висока температура впливає і на властивості робочого розчину. Зі зростанням температури знижується його в'язкість, що може спричинити збільшення витрати через форсунки та зміну спектра крапель. Тонкі розчини утворюють дрібніші краплі, які менш стійкі до випаровування. Крім того, висока температура поверхні листка (особливо у спекотний полудень) може перешкоджати утриманню крапель, оскільки вони швидко висихають до того, як встигнуть проникнути у тканини або активувати діючу речовину. Для деяких препаратів необхідна наявність вологи протягом певного часу після нанесення, і висока температура у поєднанні з низькою вологістю знижує ефективність їх роботи.

Відносна вологість повітря також є визначальним чинником для якості обприскування. Низька вологість — нижча за 50–60 % — різко прискорює випаровування води з крапель. Чим нижча вологість, тим більш агресивним стає процес зневоднення. У таких умовах крапля майже не має часу на осідання, а робочий розчин може концентруватися вже в повітрі, що інколи призводить до зміни фізико-хімічних властивостей препарату. Для системних препаратів недостатня вологість може перешкоджати проникненню у тканини, тоді як для контактних засобів вона обмежує рівномірність покриття. Особливо чутливими до низької вологості є біологічні препарати, препарати на основі живих мікроорганізмів та асортимент фунгіцидів, дія яких залежить від тривалості контакту з поверхнею рослини [8].

Надто висока вологість, хоч і знижує випаровування, також може створювати проблеми. При вологості понад 85–90 % на поверхні рослин може утворюватися тонка плівка води, яка розбавляє робочий розчин і впливає на адгезію. У таких умовах крапля може стікати по листку, особливо якщо він має глянцеvu або воскову поверхню, що призводить до втрати препарату та погіршення рівномірності покриття. Висока вологість також сприяє

поширенню хвороб, особливо грибкових, тому при виконанні фунгіцидних обробок важливо враховувати баланс між потребою в адекватній тривалості висихання розчину та ризиком додаткового зволоження посівів.

Температура і вологість повітря тісно пов'язані між собою і їхній сумарний вплив на якість обприскування часто є визначальним. У спекотну суху погоду швидкість випаровування збільшується в рази, тому обробки рекомендують проводити рано вранці або ввечері, коли температура нижча, а вологість вища. У ранкові години наявність роси може як допомагати, так і заважати роботі залежно від типу препарату. Деякі засоби краще утримуються і рівномірніше розподіляються за наявності невеликої кількості вологої плівки, тоді як інші потребують сухої поверхні для оптимальної адгезії. Надвечірні обробки часто вважаються оптимальними, оскільки листкова поверхня суха, температура знижується, а вологість зростає. Крім того, у вечірній час зменшується активність вітру, а отже, ризик дрейфу також нижчий.

Важливо пам'ятати, що дрейф крапель посилюється не лише вітром, а й термічними потоками, які виникають у денну пору. Нагріта поверхня ґрунту та рослин створює висхідні повітряні потоки, що піднімають дрібні краплі в атмосферу. У поєднанні з низькою вологістю це може призводити до того, що значна частина препарату взагалі не досягає цільової поверхні. Тому рекомендації щодо заборони обробок у спекотний час мають не лише практичне, а й фізичне обґрунтування.

Тип форсунок теж взаємодіє з умовами температури та вологості. Антидрейфові інжекторні форсунки, що утворюють крупніші краплі, є кращим вибором у жарку та суху погоду, оскільки такі краплі повільніше випаровуються і менше піддаються дрейфу. Проте занадто великі краплі можуть знижувати якість покриття, особливо при роботі з контактними препаратами або на культурах зі складною морфологією листя. Таким чином, вибір обладнання має враховувати конкретні метеорологічні умови. У прохолодні дні або при високій вологості ефективніше використовувати

форсунки, що утворюють дрібні краплі, забезпечуючи кращу проникність і рівномірність нанесення.

Температура також впливає на появу фітотоксичності. Деякі препарати або їхні суміші при високих температурах стають більш агресивними, що може викликати опіки листків. У поєднанні з низькою вологістю ця небезпека зростає, оскільки концентрація діючої речовини на поверхні листка збільшується внаслідок швидкого випаровування води. Саме тому інструкції до застосування багатьох препаратів містять обмеження щодо максимально допустимих температур під час обробки [9].

Існують також культурні та організаційні аспекти, пов'язані з впливом метеорологічних умов на обприскування. У великих господарствах із великими площами посівів важко підібрати «ідеальний» час для виконання всіх робіт. Однак оптимізація графіка обробок з урахуванням реальних погодних умов може суттєво підвищити ефективність використання засобів захисту рослин і знизити витрати. Використання польових метеостанцій, датчиків вологості листків, онлайн-сервісів прогнозування погоди або мобільних додатків дозволяє більш точно визначати оптимальні часові вікна для обприскування.

У цілому вплив температури та вологості повітря на якість обприскування є комплексним і багатогранним. Від правильного врахування цих чинників залежить не лише ефективність препаратів, а й екологічна безпека технологічних операцій. Оптимальні умови для проведення обробок — це температура в межах 12–22 °C та відносна вологість 60–80 %. У таких умовах випаровування є мінімальним, дрейф знижується, а краплі робочого розчину зберігають достатній розмір і встигають рівномірно осісти на поверхню рослин. Ігнорування цих факторів може призвести до значних фінансових втрат, погіршення фітосанітарної ситуації та навіть ризиків для довкілля. Тому сучасні технології обприскування мають ґрунтуватися не лише на технічних параметрах машин, а й на глибокому розумінні погодних умов та їхнього впливу на процес формування й перенесення крапель.

Вплив розмірів крапель на якість обприскування є одним із ключових чинників ефективності застосування засобів захисту рослин у сучасному агровиробництві. Формування оптимальних умов для утворення крапель різного діаметра визначає як технологічну, так і біологічну результативність обробітку, впливаючи на рівномірність покриття поверхні рослин, ступінь утримання робочого розчину, зменшення зносу (дрейфу) та забезпечення необхідної концентрації препарату у цільовій зоні. У процесі обприскування крапля виступає основним носієм діючої речовини, а тому її розмір визначає траєкторію руху, швидкість випаровування, можливість проникнення у крону, а також взаємодію з поверхнею листка. Значна увага приділяється дослідженню спектру розміру крапель, оскільки саме він дозволяє комплексно оцінити ефективність роботи форсунок та обрати оптимальний режим обприскування для конкретних умов.

Одним із найважливіших параметрів, що характеризує якість обприскування, є середній діаметр крапель, який визначає баланс між покриттям і ризиком знесення. Дрібні краплі (менше 150 мкм) мають значну площу поверхні відносно їх маси, завдяки чому забезпечують високу рівномірність і щільність покриття листової поверхні. Вони здатні проникати у важкодоступні зони рослини, включаючи нижні частини листя, зони між листовими пластинками та внутрішні елементи густих посівів. Проте такі краплі є найбільш уразливими до дрейфу, особливо за наявності навіть невеликого бокового вітру, що може привести до суттєвої втрати робочого розчину та забруднення прилеглих територій. Крім того, дрібнокрапельне обприскування характеризується високими темпами випаровування, що знижує ефективний об'єм діючої речовини, яка досягає поверхні рослин, особливо за умов підвищеної температури та низької відносної вологості повітря.

Краплі середнього розміру (150–300 мкм) вважаються універсальними, оскільки здатні забезпечити достатнє покриття при значно меншому ризику знесення, ніж дрібні. Такі краплі мають достатню масу для стабільного руху

до цільової поверхні, що дозволяє ефективніше працювати в умовах помірного вітру. Вони менш схильні до випаровування і краще утримуються на листовій поверхні, особливо якщо рослини вкриті восковим нальотом або мають підвищені кути нахилу листків. У багатьох випадках саме ці краплі забезпечують оптимальне співвідношення між якістю нанесення і зменшенням ризиків для довкілля, тому їх використовують як базовий варіант для більшості польових культур.

Великі краплі (понад 300–400 мкм) вибирають для обробіток, де важливо мінімізувати дрейф і забезпечити високу проникність робочого розчину у нижні яруси культури. Перевищення діаметра краплі збільшує її інерційність, що сприяє стабільнішому попаданні на рослину навіть за несприятливих погодних умов. Такі краплі особливо ефективні при внесенні ґрунтових гербіцидів, рідких добрив або біопрепаратів, які потребують точного потрапляння на поверхню ґрунту або в нижню частину рослинного покриву. Проте великі краплі мають суттєвий недолік — низьку рівномірність покриття. Вони утворюють меншу кількість точок контакту на поверхні листка, що може знижувати ефективність препаратів контактної дії. Крім того, великі краплі можуть стікати з листової поверхні, особливо з вертикально орієнтованих листків, що призводить до перевитрати препарату та нерівномірності дії.

Якість обприскування визначається не лише середнім діаметром краплі, а й спектром її розміру — співвідношенням дрібних, середніх і великих часток у факелі розпилу. Аграрії та інженери прагнуть отримати найбільш однорідний спектр, що забезпечує прогнозованість поведінки крапель у польових умовах. Сучасні форсунки, зокрема інжекторні, дозволяють формувати більші та важчі краплі, зменшуючи дрейф і забезпечуючи стабільний факел розпилу. Водночас стандартні щілинні форсунки створюють більш широкий спектр — від дуже дрібних до великих крапель, що може бути доцільним для контактних препаратів, але водночас збільшує ризики знесення.

Розмір крапель тісно пов'язаний із параметрами роботи обприскувача, зокрема тиском розпилу та швидкістю руху агрегату. Зі збільшенням тиску зростає частка дрібних крапель, що підвищує рівномірність покриття, але водночас збільшує ризик знесення. Зменшення тиску сприяє формуванню більших крапель, тому виробники препаратів і обладнання надають чіткі рекомендації щодо діапазонів тиску для кожного типу форсунок. Важливим фактором також є швидкість руху обприскувача: надмірно висока швидкість може призводити до деформації факелу розпилу, нерівномірного покриття та збільшення дрейфу, навіть якщо використовуються великі краплі.

Погодні умови мають критичне значення для стабільності розміру крапель і якості обприскування. Вітер є найочевиднішим фактором ризику: за швидкості понад 4–5 м/с дрібні краплі можуть переноситися на значні відстані. Температура повітря та вологість впливають на випаровування: при температурі понад 25–28 °С навіть краплі середнього розміру можуть не досягати поверхні рослин у достатній кількості. Краплі діаметром менше 100 мкм випаровуються практично миттєво у жарку та суху погоду. У зв'язку з цим для зменшення випаровування виробники інколи рекомендують додавання прилипачів і поверхнево-активних речовин, які дозволяють підвищити стабільність крапель та якість їх взаємодії з листовою поверхнею.

Сучасні тенденції у технології обприскування зорієнтовані на точне керування розміром крапель у режимі реального часу. Новітні системи автоматичного регулювання тиску, електронні форсунки з імпульсною модуляцією потоку (PWM), а також інтелектуальні системи управління секціями дозволяють стабілізувати розмір крапель при зміні робочої швидкості. Це значно покращує якість покриття та дає можливість поєднувати високу продуктивність з мінімальним ризиком для довкілля. Особливо актуальним є застосування великих крапель у поєднанні з точними системами контролю — це дозволяє мінімізувати дрейф, але при цьому зберегти достатню рівномірність покриття завдяки покращеній стабільності факелу.

Значну увагу також приділяють біологічному аспекту впливу розміру крапель — механізму дії препаратів. Препарати контактної дії потребують максимально дрібних крапель, що забезпечують високу площу змочування поверхні. Системні препарати, навпаки, можуть бути ефективно внесені більшими краплями, оскільки їх дія залежить не лише від покриття, але й від проникнення в тканини рослин. Для гербіцидів суцільної дії дрібні краплі збільшують ризик знесення і негативного впливу на сусідні культури, тому використовуються переважно середні та великі краплі. Інсектицидні обробки часто виконуються краплями середнього діаметра, що дозволяє досягати рівноваги між покриттям і стійкістю до перенесення вітром.

Отже, розміри крапель є одним із визначальних факторів якості обприскування, що безпосередньо впливає на ефективність застосування засобів захисту рослин, економічність технологічних процесів та рівень екологічної безпеки. Підбір оптимального розміру крапель залежить від множини чинників — типу препарату, погодних умов, конструкції форсунок, швидкості руху обприскувача та технологічних задач. У сучасних умовах, коли агровиробництво орієнтується на точність і мінімізацію негативного впливу на довкілля, формування правильного спектра крапель при обприскуванні стає ключовим елементом ефективного і відповідального використання засобів захисту рослин.

Вплив швидкості руху обприскувача на якість виконання робіт у рослинництві є одним з найбільш критичних факторів, що безпосередньо визначають ефективність застосування засобів захисту рослин та рідких добрив. Більшість агротехнологічних операцій, пов'язаних з хімічним захистом рослин, ґрунтуються на припущенні, що обприскувач рухається рівномірно, із швидкістю, яка відповідає рекомендованим параметрам конкретних форсунок та робочого тиску. Однак у реальних польових умовах ці параметри часто змінюються під впливом рельєфу, типу ґрунту, стану рослинного покриву й технічного стану самої машини. Відповідно, швидкість руху стає одним із чинників, що можуть призвести як до покращення, так і до

істотного погіршення якості розпилення, рівномірності внесення та втрат робочого розчину.

Підвищення швидкості руху обприскувача зазвичай супроводжується зростанням нестабільності факелу розпилення, що зумовлено декількома взаємопов'язаними причинами. По-перше, зі збільшенням швидкості зменшується фактичний час перебування форсунки над певною ділянкою поверхні, що може призводити до недостатнього змочування і, відповідно, до зниження ефективності препарату. Цей ефект особливо критичний для культур із густим листовим покривом або рослин, які мають добре виражену просторову структуру, де проникнення робочої рідини в нижні яруси є проблематичним за будь-яких умов. При занадто високій швидкості дрібні краплі не встигають осідати на листову поверхню, натомість частина з них відноситься повітряними потоками, що формуються позаду штанги обприскувача.

Крім того, збільшення швидкості руху посилює аеродинамічні процеси навколо штанги, які змінюють траєкторію падіння крапель та викликають їхнє дрейфування. Дрейф крапель — одна з найсуттєвіших проблем для сучасних аграрних систем, оскільки призводить не лише до перевитрати препаратів, але й до ризиків забруднення сусідніх ділянок, водних об'єктів та нецільових культур. Доволі часто ситуація ускладнюється тим, що оператор, прагнучи виконати роботу швидше або встигнути до несприятливих погодних умов, нехтує стандартними регламентами і збільшує швидкість до рівня, який перевищує рекомендовані 6–8 км/год для стандартних форсунок з плоским факелом розпилення.

Водночас, надмірно низька швидкість руху також не є оптимальною. За швидкості менше 5 км/год збільшується витрата робочого розчину на одиницю площі через надмірне перекриття факелів сусідніх форсунок та більш тривале перебування крапель у повітрі. В таких умовах виникає ризик стікання препарату з поверхні листка, що знижує ефективність дії засобів захисту та може спричинити локальні опіки рослин. Крім того, робота на низьких

швидкостях зменшує продуктивність агрегату та підвищує витрати пального, що негативно позначається на загальній економічній ефективності технологічної операції.

Оптимальна швидкість руху обприскувача залежить від багатьох факторів, зокрема від типу форсунок. Наприклад, інжекторні форсунки, призначені для зменшення дрейфу шляхом утворення збільшених крапель з повітряними камерами, забезпечують стабільнішу якість розпилення на швидкостях до 10–12 км/год. Однак для дрібнокрапельного розпилення, необхідного при застосуванні контактних фунгіцидів чи інсектицидів, бажаною є нижча робоча швидкість, яка забезпечує рівномірність покриття та формування необхідної густини крапель на одиниці площі листка. Неправильне поєднання швидкості руху, типу форсунки та робочого тиску майже неминуче призводить до зниження ефективності внесення, незалежно від якості препарату чи умов зовнішнього середовища.

Не менш важливим фактором є стабільність висоти штанги обприскувача над поверхнею поля. При збільшенні швидкості навіть незначні нерівності ґрунту можуть спричиняти вертикальні коливання штанги, що змінюють відстань від форсунки до цілі та викликають нерівномірність внесення. Більша висота збільшує дрейф і зменшує концентрацію робочої рідини в зоні обробки, тоді як надто мала висота призводить до неповного перекриття сусідніх факелів. З цього погляду оптимальна швидкість руху дозволяє штанзі працювати стабільно та утримувати рекомендовану висоту 50–70 см над поверхнею рослин.

Особливої уваги вимагають погодні умови, оскільки взаємодія швидкості руху обприскувача та вітру посилює негативні ефекти дрейфування крапель. При швидкості вітру 3–5 м/с допустима робоча швидкість обприскувача має бути нижчою, ніж у практично безвітряну погоду, оскільки сумарний вектор руху повітряних потоків і швидкість агрегату можуть суттєво змінювати напрямок розпилення. У випадку поривчастого вітру навіть

незначне збільшення швидкості руху призводить до того, що дрібні краплі, які становлять основу якісного покриття, втрачають контрольовану траєкторію.

Важливо підкреслити, що сучасні технології точного землеробства дають змогу автоматично регулювати норму внесення залежно від зміни швидкості, застосовуючи системи автоматичної стабілізації витрати (flow rate control). Проте навіть такі системи не здатні компенсувати аеродинамічні зміни, спричинені надмірними швидкостями. Тобто збільшення тиску для підтримання норми внесення, яке відбувається при прискоренні, призводить до ще більшого дроблення крапель і, як наслідок, — до підвищення дрейфу. Виникає дестабілізація робочого процесу, яку не може повністю компенсувати жодна автоматизована система.

Окремо слід розглянути вплив швидкості на якість роботи обприскувачів із системами контролю секцій або індивідуального керування форсунками. Хоча такі системи значно зменшують перекриття на краях поля та в зонах складної геометрії, їхня ефективність також залежить від стабільності фактичної робочої швидкості. Різкі прискорення або уповільнення призводять до запізнення відкривання чи закривання форсунок, оскільки електромагнітні клапани мають певний час реагування. Це особливо помітно у випадках, коли обприскувач рухається нерівномірно через підйоми або повороти, що часто супроводжується коливаннями швидкості навіть при наявності сучасних систем автопілотування.

Таким чином, швидкість руху обприскувача є базовим технологічним параметром, який визначає рівень якості обприскування, ступінь покриття рослин робочою рідиною, рівномірність внесення та екологічну безпеку операції. Занадто висока швидкість практично завжди супроводжується зменшенням ефективності дії препаратів через зниження точності розпилення, і це не може бути компенсовано збільшенням норми внесення або використанням дорогих препаратів. Натомість надмірно низька швидкість веде до втрат часу, зниження продуктивності та збільшення витрат. Оптимальний діапазон швидкості — зазвичай 6–10 км/год залежно від типу форсунок і умов

середовища — дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю та якістю обробки.

У підсумку можна зазначити, що професійний підхід до вибору швидкості руху обприскувача потребує врахування не лише технічних параметрів машини, а й стану посівів, рекомендацій щодо застосовуваних препаратів, типу форсунок, погодних умов та вимог до точності внесення. Виконання цих умов дає змогу зменшити витрати препаратів, підвищити їхню ефективність та мінімізувати екологічні ризики, забезпечуючи стабільну якість обприскування, що є важливим елементом сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

1.2 Аналіз досліджень систем автоматичного керування обприскуванням

Системи автоматичного керування обприскуванням сьогодні посідають ключове місце у підвищенні ефективності та екологічної безпечності застосування засобів захисту рослин. У сучасних умовах інтенсифікації виробництва, зростання цін на пестициди, підвищених вимог до екологічності та контролю залишкових речовин постає необхідність максимально точного та стабільного внесення робочої рідини на поле. Тому дослідження систем автоматичного регулювання виливу, контролю секцій, компенсації зміни швидкості та системи змінної норми внесення набувають особливої актуальності. Розвиток електроніки, сенсорики, супутникової навігації, гідравлічних та електропневматичних систем дозволив вийти на новий рівень точності обприскування, що декілька десятиліть тому був технічно недосяжним.

Одним із найбільш активно досліджуваних напрямів є автоматичне регулювання норми виливу залежно від зміни швидкості руху агрегату. Класичні регулятори підтримували стабільний тиск у системі, але такі підходи не враховували динаміки зміни витрати через особливості форсунок, часу реакції клапанів та в'язкості робочої рідини. Сучасні дослідження показують,

що електронні системи із швидкодіючими клапанами та лінійними дозаторами можуть реагувати на зміну швидкості у межах часток секунди, забезпечуючи точну норму внесення навіть за різкого розгону або уповільнення техніки. Це дозволяє мінімізувати як недовнесення, так і перевнесення засобів захисту, а також скорочувати витрати, що особливо важливо при роботі дорогими препаратами[11, 13].

Вагома частина сучасних наукових робіт присвячена роботі секцій та системам, здатним автоматично відключати подачу рідини у місцях перекриття. Завдяки використанню GNSS-навігації та карт покриття, система виключає подвійне обприскування на розворотах, клинах, а також у місцях, де рослини відсутні. Дослідження останніх років демонструють, що застосування автоматичного керування секціями може зменшити перекриття на 7–15 %, а в складних за формою полях – майже на третину. Підвищення точності роботи значно зменшує витрати препаратів та знижує навантаження на довілля, що робить технологію особливо привабливою для практичного використання [12, 14].

Окремим напрямом є вдосконалення форсунок із електронним керуванням. Імпульсні форсунки (PWM-системи), які працюють на модульованні ширини імпульсу, дозволяють підтримувати постійний тиск та змінювати лише тривалість відкриття клапана. Аналіз досліджень свідчить, що такі системи здатні забезпечувати рівномірність внесення робочої рідини у значно ширшому діапазоні швидкостей порівняно зі звичайними форсунками. Крім того, PWM-технологія дозволяє незалежно регулювати норму внесення для кожної секції або навіть кожної форсунки, що відкриває можливість для реалізації технологій диференційного обприскування та компенсації бокового знесення при сильному вітрі. Деякі сучасні дослідження аналізують роботу PWM-форсунок на високих частотах, оцінюючи вплив ширини імпульсу на розмір краплі та рівномірність покриття [5-7].

Чимало наукових праць спрямовано на розробку та вдосконалення систем змінної норми внесення на основі карт-завдань, створених за

результатами моніторингу поля або дистанційного зондування. Такі системи дозволяють вносити різну кількість препарату залежно від фактичної густоти бур'янів, рівня ураження хворобами чи шкідниками або інших факторів. У дослідженнях наголошується, що поєднання карт-завдань із високоточним автоматичним дозуванням дозволяє підвищити ефективність захисних заходів, покращити стан рослин та оптимізувати структуру витрат. Проте актуальною проблемою залишається точність визначення зон обробки та відповідність даних з дронів або супутників реальній польовій ситуації [3, 5, 8].

Досить швидко розвиваються системи реального часу, здатні змінювати норму внесення безпосередньо під час руху залежно від показників сенсорів. Серед найбільш досліджуваних – оптичні сенсори виявлення бур'янів, які розпізнають наявність рослинності за спектром відбитого світла та активують форсунку лише у місці розташування бур'яну. За даними досліджень, такі системи можуть скорочувати витрати гербіцидів на 60–90 %, особливо у періоди міжрядної обробки або на полях із низькою забур'яненістю. Нові дослідження аналізують точність розпізнавання в умовах високої швидкості руху, нерівностей поверхні та різної інтенсивності освітлення, оскільки більшість сенсорних систем залишається чутливою до погодних умов.

Дедалі більше уваги приділяється темі точності та стабільності роботи автоматичних систем в умовах реального поля. Чимало вчених підкреслюють проблему інерційності рідини в магістралях та затримки реакції клапанів як один із головних факторів похибок [9]. Нові моделі керування пропонують компенсувати цю інерційність за допомогою алгоритмів прогнозування, що використовують дані про поточну швидкість, прискорення, тиск та очікувану зміну витрати. Розробляються й системи самодіагностики, що визначають забруднення форсунок, нерівномірність подачі або збої в роботі окремих елементів [10].

Важливим напрямом досліджень є аналіз ефективності автоматичних систем з погляду енергоспоживання та витривалості. Експерти відзначають, що впровадження електричних та електрогідравлічних клапанів із високою

частотою спрацьовування створює додаткове навантаження на електромережу трактора. Тому дослідники розробляють енергоощадні алгоритми керування та оптимізують конструкцію клапанів, зменшуючи силу струму та час відриву якірця.

Останнім часом набувають поширення дослідження роботи обприскувачів у поєднанні з автономним керуванням машинами. Автопілот та автоматичне водіння підвищують стабільність траєкторії руху, що позитивно впливає на точність обприскування. Деякі роботи аналізують взаємодію автономних систем керування рухом та систем дозування, наголошуючи на необхідності комплексної оптимізації, адже навіть незначні зміщення траєкторії на 10–15 см можуть вплинути на якість обробки.

Загалом аналіз сучасних досліджень свідчить, що автоматичні системи керування обприскуванням стали невід'ємною частиною технологій точного землеробства. Вони забезпечують суттєве підвищення точності внесення, зниження витрат пестицидів, зменшення негативного впливу на довкілля та покращення агротехнічних показників врожаю. Водночас залишається низка викликів, пов'язаних з оптимізацією алгоритмів, стабільністю роботи у складних погодних умовах, створенням універсальних рішень для різних культур та систем захисту. Наукові дослідження продовжуються, і можна очікувати, що у найближчі роки системи автоматичного керування внесенням агрохімікатів стануть ще точнішими, швидкодійнішими та енергоощаднішими.

Вороги культурних рослин щорічно знищують значну частину світового сільськогосподарського виробництва [15]. У глобальному масштабі втрати, які завдаються аграрному сектору внаслідок діяльності бур'янів, шкідників і збудників хвороб, обчислюються мільярдами доларів та суттєво впливають на продовольчу безпеку. У деяких країнах у певні роки можна спостерігати майже повне знищення врожаю окремих культур [16]. Це свідчить про те, що рослинні вороги є природним чинником, який постійно супроводжує агровиробництво, незважаючи на розвиток сучасних технологій. Таким чином, певною мірою парадоксально, але ми збираємо лише ту частку продукції, яку

нам залишили ці біотичні фактори. На всіх культурних рослинах проявляються три основні типи ворогів — бур'яни, хвороби та шкідники, кожен з яких по своєму знижує врожайність і якість продукції.

Сучасні підходи до боротьби з цими небажаними факторами впливу передбачають використання спеціалізованої техніки та інноваційних технологій, що інтенсивно розвиваються [17, 18]. Удосконалення конструкцій машин, впровадження електронних систем керування та точніших методів дозування сприяють значному підвищенню ефективності захисту рослин. Використання інноваційних технологій не лише покращує якість виконання технологічних операцій, а й приводить до глибоких змін у структурі й організації сучасного агровиробництва [19]. Розробка нової, високоточної, автоматизованої техніки підвищує конкурентоспроможність аграрних господарств, сприяє сталому розвитку, дозволяє оптимізувати витрати на засоби захисту рослин та мінімізувати вплив на довкілля [20].

Ефективне застосування техніки для внесення хімічних препаратів відіграє ключову роль у боротьбі з хворобами, шкідниками та бур'янами. Від якості розподілу робочого розчину, точності дотримання норми витрати та рівномірності покриття безпосередньо залежить результативність застосування пестицидів [21]. Невідповідність витрати або нерівномірний розподіл призводять до появи необроблених ділянок або, навпаки, до перекрыття та надлишкового внесення, що збільшує витрати та загрожує екологічним ризиком. Фермери можуть налаштовувати техніку відповідно до особливостей технології, виду культури, рельєфу та умов роботи, формуючи індивідуальні системи захисту, що відповідають конкретним виробничим потребам [22].

Упродовж останніх років системи автоматичного керування обприскувачами стали одним із ключових елементів точного землеробства, набуваючи широкого поширення у різних країнах світу [23]. Такі системи пропонуються багатьма виробниками і можуть бути інтегровані в самохідні, причіпні та навісні обприскувачі. Їхнє основне призначення полягає у

забезпеченні максимально точного вимкнення та увімкнення секцій штанги, що дає змогу мінімізувати перекриття і відповідно зменшити загальні витрати на засоби захисту рослин. Автоматичне вимкнення секцій під час проходження по вже оброблених смугах дозволяє уникнути надмірного внесення, попереджає перевитрати та сприяє підвищенню точності дотримання технології. Робота таких систем базується на використанні карт полів, межі яких заздалегідь задаються або можуть бути промальовані оператором шляхом об'їзду контуру з увімкненою GPS-навігацією [18, 24].

Системи автоматичного керування секціями здатні підтримувати задану норму витрати завдяки точному контролю подачі робочої рідини. Контролери витрати враховують зміну швидкості руху машини та відповідно коригують продуктивність насоса, забезпечуючи постійність дози навіть за коливань операційних параметрів. Витратоміри надають дані, необхідні для перевірки та коректного функціонування системи стабілізації витрати, а датчики швидкості дозволяють адаптувати роботу обприскувача до реальних умов руху [19, 21]. Одним із ключових елементів таких систем є GPS-приймач, який надає контролеру точні координати та показники швидкості. У поєднанні з даними від систем контролю потоку форсунок це забезпечує рівномірне поверхневе внесення робочих розчинів і точне дотримання рекомендованих доз пестицидів [25].

Таким чином, сучасні системи автоматичного керування значною мірою підвищують точність, надійність та ефективність роботи штангових обприскувачів. Їх впровадження є важливою складовою оптимізації витрат, зниження екологічного навантаження та підвищення продуктивності агроєкосистем.

Метою цієї роботи є дослідження особливостей функціонування самохідного штангового обприскувача, оснащеного системою автоматичного контролю витрати відповідно до параметра «Відхилення від норми витрати», а також аналіз впливу цього параметра на якість виконання технологічних операцій у різних умовах роботи.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 План експерименту

Дослідження проводилося у 2025 році на земельній ділянці, розташованій поблизу міста Суми в північно-східній частині України (Рисунок 1). Об'єктом дослідження є самохідний штанговий обприскувач з гідравлічною довжиною штанги 30 метрів (Рисунок 2).



Рис. 1 - Експериментальне поле



Рис. 2 - Штанга самохідного обприскувача

Проведений експеримент імітує обприскування малим об'ємом зі встановленою витратою 150 л/га, на трьох робочих швидкостях (10 км/год, 13 км/год та 15 км/год). Режими роботи обприскувача вказані відповідно: – Робочий режим 1 (PB1) – агрегат було встановлено на швидкість 10 км/год та витрату 150 л/га. – Робочий режим 2 (PB2) – агрегат було встановлено на швидкість 13 км/год та витрату 150 л/га. – Робочий режим 3 (PB3) – агрегат було встановлено на швидкість 15 км/год та витрату 150 л/га. Вологість ґрунту вимірювалася з рівними інтервалами 2 м по всій довжині експериментального поля на глибині 15 см за допомогою вологоміра ґрунту AM-128 SOIL. Це було зроблено для відстеження впливу вологості ґрунту на роботу дощувальної системи.

2.2 Програмування бортового комп'ютера для заданої норми внесення

Програмування бортового комп'ютера виконується вручну шляхом введення норм витрати, з якими буде працювати залежно від потреби (кількості пестициду). На рисунку 3 показано послідовність налаштування параметрів агрегату. Для конкретного дослідження контролер запрограмовано на витрату пестициду 150 л/га.



Рис. 3 – Налаштування параметрів агрегату А – Дисплей налаштувань машини, В – Дисплей для зчитування кількості пестициду в баку, С – Регулювання висоти гідравлічної штанги

Відстань, на якій вимірюється витрачена кількість розчину, становить 33,3 м, що відповідає 0,1 га оброблюваної площі (відповідно до робочої ширини машини). Бак обприскувача заповнюється 1000 л води. Комп'ютер агрегату налаштовується на роботу, і досліджувана ділянка проходить в автоматичному режимі, прагнучи підтримувати задану швидкість агрегату. Вибираються розкидачі, що підходять для заданих умов, та налаштовується машина. Обприскувач проходить через дослідне поле, після чого з дисплея зчитується кількість розчину, що залишився в баку. Бак поповнюється розчином до досягнення рівня 1000 л. Для кожної встановленої швидкості агрегату (10 км/год, 13 км/год та 15 км/год) випробування проводилося з повторюваністю 10 разів.

Відхилення від заданої норми витрати розраховується за формулою:

$$ВНВ = НВ - (1000 - ВР), \quad (1)$$

де: ВНВ – відхилення від норми витрати, л/га; НВ – норма витрати (150 л/га); ВР – витрата розчину.

2.3 Статистичний аналіз даних

Значні відмінності між робочими швидкостями обприскувача, км/год (РШО) для різних режимів роботи агрегату, а також відмінності між відхиленнями від норми витрати, л/га (ВНВ), аналізуються за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу з Post Hoc-тестом Тьюкі. Кореляційний аналіз використовується для вивчення сили та напрямку зв'язку між робочими швидкостями обприскувача, відхиленнями норми витрати та миттєвою вологістю ґрунту (ВГ), виміряною на експериментальному полі. Вплив робочих швидкостей обприскувача на відхилення норми витрати для різних режимів роботи агрегату вивчається за допомогою регресійного аналізу при $p < 0,05$. Основною метою є розрахунок прогностичних моделей, що визначають зв'язки між досліджуваними параметрами.

Порівнюються дві регресійні моделі – лінійна (2) та кубічна (3), виражені формулами:

$$Y = \text{const.} \cdot x + b, \quad (2)$$

$$Y = \text{const.} + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3, \quad (3)$$

де: Y – спостережуваний параметр відхилення від норми витрати, л/га розчину за різних режимів роботи агрегату; x – фіксований коефіцієнт Робоча швидкість обприскувача та константа; b_1 ; b_2 ; b_3 – коефіцієнти моделі. Для обробки даних використовувалося програмне забезпечення IBM® SPSS® Statistics 26.0.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

3.1 Одновимірний дисперсійний аналіз та кореляційний аналіз

Відхилення норми витрати пестициду контролювалося, коли обприскувач рухався з трьома різними робочими швидкостями (10 км/год, 13 км/год та 15 км/год), та розроблено регресійні моделі, що виражають зв'язок між ними. Виміряна миттєва вологість ґрунту на досліджуваній ділянці коливається від 38,6% до 43,2%, тобто середня вологість для всієї досліджуваної ділянки становить 40,05%.

У таблиці 1 представлені середні значення розрахованих параметрів РШО та ВНВ для трьох режимів роботи установки та для зареєстрованої миттєвої вологості ґрунту експериментального поля. Щодо робочої швидкості обприскувача, результати застосованого однофакторного дисперсійного аналізу показують наявність значних відмінностей при $p < 0,05$ між середньою швидкістю РР1 та швидкостями двох інших режимів роботи, а також між РР2 та РР3.

Таблиця 1 - Базова статистика та однофакторний дисперсійний аналіз спостережуваних параметрів Робоча швидкість обприскувача та відхилення від норми витрати для різних режимів роботи агрегату

Робочий режим (n = 30)	Робоча швидкість, км/год			Відхилення від норми внесення, л/га		
	$\bar{x} \pm SD$	Sig- (p)	R ²	$\bar{x} \pm SD$	Sig. (p)	R ²
РР1	9.93±0.133 ^a	0.0049	0.982	-0.110±1.226 ^a	0.0116	0.148
РР2	12.94±0.346 ^{ab}			-0.195±1.138		
РР3	15.17±0.386 ^{ab}			-0.207±0.890*		

*Однакові верхні індекси в одному стовпці позначають значущі відмінності на рівні значущості $p < 0,05$ наступним чином: a-a між РР1 та всіма іншими режимами роботи; b-b між РР2 та всіма іншими режимами роботи; Post Нос-тест: Тьюкі; SD – стандартне відхилення; R² – коефіцієнт детермінації; n – кількість спостережень

З розрахованого коефіцієнта детермінації (0,982) можна зробити висновок, що 98,2% варіацій робочої швидкості агрегату зумовлені обраним режимом роботи. Що стосується параметра «Відхилення від норми витрати», то не повідомляється про значні відмінності між середніми значеннями ВНВ, отриманими для режимів роботи PP1 та PP3. Не повідомляється про значні відмінності щодо цього параметра між PP1 та PP2, а також між PP2 та PP3. Низький коефіцієнт детермінації (0,148) вказує на те, що лише 14,8% варіацій ВНВ зумовлені різними режимами роботи агрегату. Кореляції між робочою швидкістю зрошувача, миттєвою вологістю ґрунту та відхиленням від норми споживання для трьох режимів роботи агрегату на рівні значущості $p \leq 0,01$ представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Перехресна кореляція між досліджуваними параметрами: робоча швидкість обприскувача, вологість ґрунту та відхилення від норми витрати для різних режимів роботи агрегату

n = 30	PP1 (10км/год)			PP2(13км/год)			PP3(15км/год)		
	РШО	ВГ	ВНВ	РШО	SM	ВНВ	РШО	ВГ	ВНВ
РШО	1	-0.410	-0.783*	1	-0.412	-0.953*	1	- 0.227	- 0.977*
ВГ	—	1	0.243	-	1	0.488	—	1	0.069
ВНВ	—	—	1	-	—	1	—	—	1

*Correlation is significant at $p < 0.01$

Умовні позначення: РШО – Робоча швидкість обприскувача (км/год); ВГ – Вологість ґрунту (%); ВНВ – Відхилення від норми витрати (л/га); PP1, PP2 та PP3 – Режими роботи обприскувача

Результати показують, що зв'язок між робочою швидкістю обприскувача та вологістю ґрунту є низхідним і коливається від слабкого до помірного (-0,227; -0,410; -0,412) для всіх трьох режимів роботи. Зв'язок між вологістю ґрунту та відхиленнями від норми витрат також коливається від слабкого до помірного (0,069; 0,243; 0,488) для трьох режимів роботи, але є позитивним,

тобто зі збільшенням вологості ґрунту відхилення від норми витрати також збільшуються.

З іншого боку, аналіз показує, що існує сильна негативна кореляція між швидкістю машинного агрегату та відхиленнями від норми витрати (-0,783; -0,953; -0,977) для всіх трьох досліджених режимів роботи. Негативний зв'язок є показником того, що зі збільшенням робочої швидкості агрегату відхилення від норми витрати зменшується. Сильна кореляція обґрунтовує створення різних регресійних моделей та аналіз впливу робочої швидкості агрегату на відхилення від норми внесення.

3.2 Регресійні моделі

Розраховані регресійні моделі, що виражають вплив робочої швидкості на параметр Відхилення від норми витрати палива в трьох різних режимах роботи самохідного обприскувача, представлені в таблиці 3 та на рисунках 4,5,6.

Таблиця 3 - Зведення моделей та оцінка коефіцієнтів моделей, що виражають зв'язок між параметром Відхилення від норми витрати рідини та робочою швидкістю обприскувача на досліджуваних режимах роботи агрегату

Оцінки параметрів	Рівняння	Стандартна похибка оцінки	Sig.	R ²
Робочий режим 1				
Лінійний	$VNB = -4.069x + 39.212$	0.8087	0.007	0.613
Кубічний	$VNB = -55.779 + 10.236x - 0.048x^3$	0.7961	0.035	0.615
Робочий режим 2				
Лінійний	$VNB = -3.273x + 40.351$	0.3655	0.001	0.908
Кубічний	$VNB = -105.402 + 13.744x - 0.034x^3$	0.3265	0.001	0.937
Робочий режим 3				
Лінійний	$VNB = -3.493x + 50.223$	0.2021	0.000	0.954
Кубічний	$VNB = 82.522 - 6.731x + 0.005x^3$	0.2012	0.000	0.954

*Рівень значущості $p < 0.05$

З таблиці видно, що лінійні, так і нелінійні регресійні моделі для трьох режимів роботи є статистично значущими при $p < 0,05$. Значення коефіцієнтів детермінації лінійної та кубічної моделей при РРЗ є найвищими ($R^2 = 0,954$), тобто близько 95,4% варіацій відхилення від норми витрати можна пояснити впливом робочої швидкості обприскувача.

На рисунку 6 показано оцінку кривих розроблених регресійних моделей при РРЗ. Як видно з рисунка, дві моделі майже повністю перекриваються. Хоча їхні коефіцієнти детермінації є найвищими, похибки оцінки є найменшими (0,2012; 0,2021), а ВНВ є найменшим (-2,07; Таблиця 1), неможливо визначити, яка з двох моделей більше підходить для опису досліджуваних параметрів.

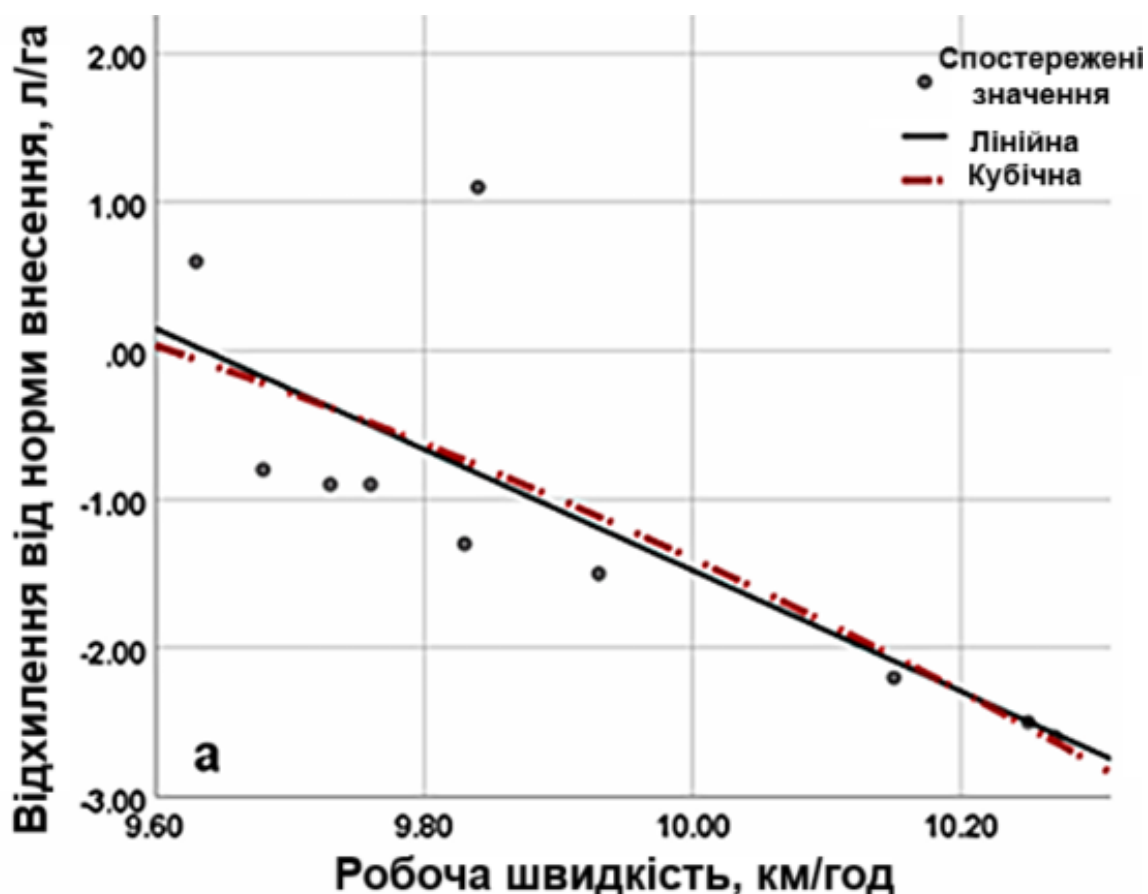


Рис. 4 – Оцінка кривих регресійних моделей, що показують зв'язок між відхиленням від норми витрати та робочою швидкістю обприскувача (10км/год)

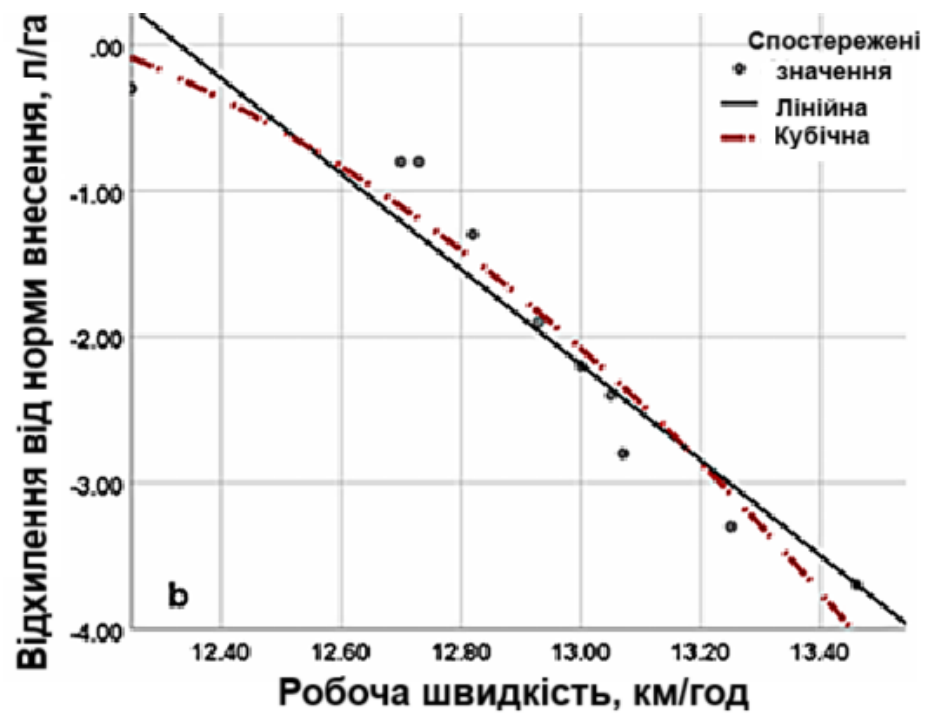


Рис. 5 – Оцінка кривих регресійних моделей, що показують зв'язок між відхиленням від норми витрати та робочою швидкістю обприскувача (13 км/год)

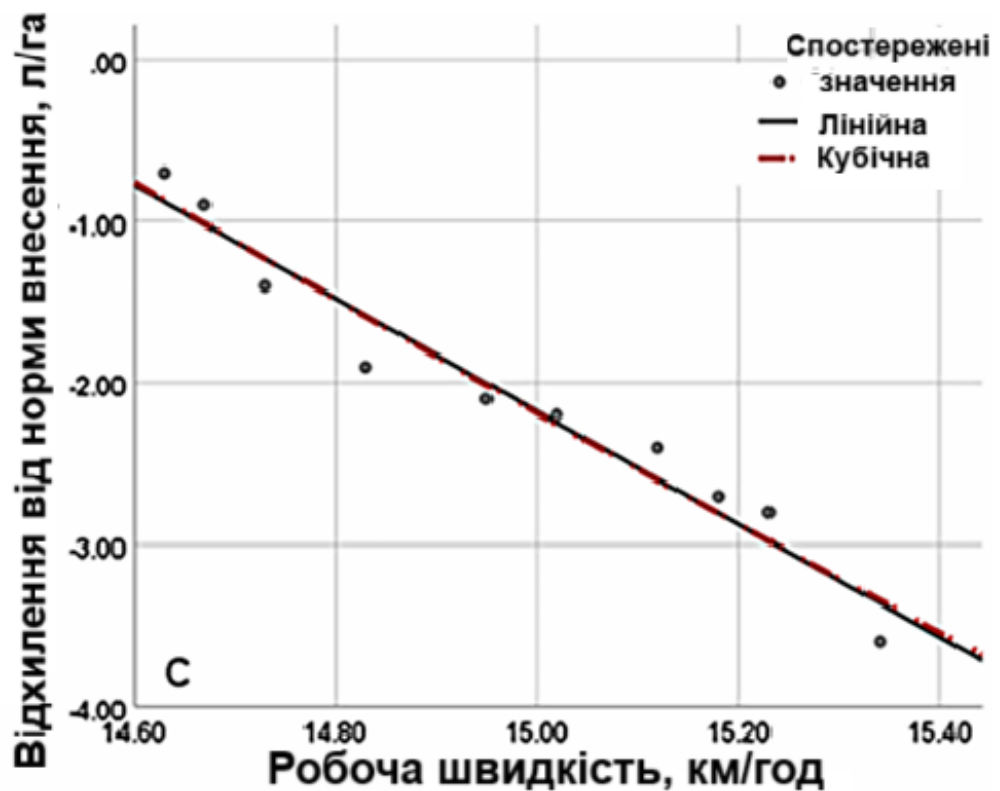


Рис. 6 – Оцінка кривих регресійних моделей, що показують зв'язок між відхиленням від норми витрати та робочою швидкістю обприскувача (15 км/год)

Що стосується рівнянь регресії, що описують два інші режими роботи, PP2 відрізняється вищими коефіцієнтами детермінації (0,908; 0,937) порівняно з PP1. Більше того, похибки оцінювання моделей менші порівняно з PP1 (Таблиця 3), як і відхилення від норми витрати (-1,95; Таблиця 1).

Як видно з рисунків 4 та 6, розраховані регресійні моделі для PP2 обприскувача краще описували досліджувані параметри, ніж розраховані моделі для PP1. Більше того, кубічна модель має вищий коефіцієнт детермінації (0,937, Таблиця 3), ніж лінійна. Похибка кубічної моделі (0,3265) нижча, ніж у лінійної моделі (0,3655), що є підставою для висновку, що кубічна модель для PP2 найкраще описує зв'язок між робочою швидкістю обприскувача та відхиленням від норми витрати.

ВИСНОВКИ

Самохідний штанговий обприскувач з автоматичним регулюванням витрати було випробувано у трьох режимах роботи: PP1 (10 км/год), PP2 (13 км/год) та PP3 (15 км/год) швидкість агрегату та витрата пестициду – 150 л/га. Було повідомлено про значні відмінності між середньою швидкістю PP1 (9,93 км/год) та швидкістю двох інших режимів роботи, а також між PP2 (12,94 км/год) та PP3 (15,17 км/год).

Для трьох режимів роботи зрошувача було отримано такі відхилення від витрати: при PP1 -1,10 л/га; при PP2 -1,95 л/га та при PP3 -2,07 л/га відповідно. Значні відмінності між середніми значеннями параметра ВНВ були зареєстровані переважно при PP1 та PP3 зрошувача. Значних відмінностей між відхиленнями від витрати в інших режимах роботи не було повідомлено. Між робочою швидкістю обприскувача та вологістю ґрунту виявлено низхідну, слабку або помірну кореляцію (-0,227; -0,410; -0,412), а також слабку або помірну, але позитивну кореляцію (0,069; 0,243; 0,488) між вологістю ґрунту та відхиленнями від норми витрати для всіх трьох режимів роботи. Найсильнішу, негативну кореляцію (-0,783; -0,953; -0,977) зафіксовано між робочою швидкістю обприскувача та відхиленнями від норми витрати. Було розраховано два типи регресійних моделей (лінійну та кубічну), що виражають вплив робочої швидкості обприскувача на параметр Відхилення від норми витрати у трьох різних режимах роботи агрегату. З усіх складених моделей кубічна модель на PP2 характеризується найкращою похибкою оцінки та високим коефіцієнтом детермінації ($R^2=0,937$) і найкраще описує досліджувані параметри. Розроблені моделі можуть бути використані фермерами для оптимізації роботи автоматичних систем управління внесенням 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 та обладнання 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