

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 ефективності застосування елементів систем точного землеробства при внесенні органічних добрив»

Виконав:

_____ (підпис)

Олег МЕЛЬНИК

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Група:

_____ СТЗ 2401-2м

Науковий керівник:

_____ (підпис)

Анатолій ЛЕБЕДЄВ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ Михайло ШУЛЯК

_____ (підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Рецензент:

_____ (підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Мельник Олег Олегович

Дослідження ефективності застосування елементів систем точного землеробства при внесенні органічних добрив.

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 46 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 1 таблиці, 5 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Метою цього дослідження було перевірити продуктивність системи керування обприскувачем Field-IQ, яка була поєднана з аплікатором для внесення рідких добрив John Deere. Система керування обприскувачем включає дисплей Case FM-1000, інтегрований з DGPS, керування обприскуванням Field-IQ із повним джгутом, витратомір і клапан автоматичного діапазону, а також насос.

Водопровідну воду застосовували як замітник для імітації 32% розчину азотних добрив КАС у проведеному експериментальному тестуванні, що дозволило відтворити умови реального процесу внесення без використання самого добрива. У ході дослідження було відібрано та зібрано загалом 120 зразків, отриманих із 8 рядів аплікатора, причому вимірювання проводилися за п'ятьма різними нормами внесення — 34, 67, 101, 135 і 168 кг/га. Отримані дані були ретельно опрацьовані з метою визначення рівномірності внесення добрив та оцінки точності відпрацювання заданої норми системою подачі.

За результатами аналізу встановлено, що найбільше відхилення від базової норми внесення між окремими рядами аплікатора сягало 10,1%. Це

відхилення зафіксували в рядку, розташованому на кінці валка, під час роботи з найнижчою нормою внесення — 34 кг/га, що свідчить про більш чутливу реакцію системи на мінімальні подачі. Рядки, розташовані в центральній частині валка, демонстрували істотно меншу варіабельність, ніж рядки на обох його краях, що може бути пов'язано з особливостями розподілу потоку в системі.

Також було встановлено, що збільшення норми внесення сприяло підвищенню рівномірності нанесення, оскільки система стабільніше працює на вищих подачах. Абсолютна похибка норми застосування в різних режимах становила від 1,3% до 6,5%, а середнє значення цього показника дорівнювало 3,76%, що свідчить про загалом прийнятний рівень точності роботи системи за різних норм внесення.

Ключові слова: рідкі мінеральні добрива, якість внесення, норма внесення, технологія змінних норм.

ABSTRACT

Melnyk Oleh Olehovych

Study of the effectiveness of the use of elements of precision farming systems when applying organic fertilizers.

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

The final qualification work is presented on 46 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 1 table, 5 figures, 2 appendices, 25 references.

The purpose of this study was to test the performance of the Field-IQ sprayer control system, which was combined with a John Deere liquid fertilizer applicator. The sprayer control system includes a Case FM-1000 display integrated with DGPS, Field-IQ spray control with a full harness, a flow meter

and an auto-range valve, and a pump.

Tap water was used as a substitute for simulating a 32% solution of nitrogenous fertilizers KAS in the experimental testing, which allowed to recreate the conditions of the real application process without using the fertilizer itself. During the study, a total of 120 samples were selected and collected from 8 rows of the applicator, and measurements were made at five different application rates - 34, 67, 101, 135 and 168 kg/ha. The obtained data were carefully processed in order to determine the uniformity of fertilizer application and assess the accuracy of the application of the given rate by the delivery system. The analysis results showed that the largest deviation from the base application rate between individual rows of the applicator reached 10.1%. This deviation was recorded in the row located at the end of the swath, while working with the lowest application rate - 34 kg/ha, which indicates a more sensitive reaction of the system to minimum feeds. Rows located in the central part of the swath showed significantly less variability than rows on both edges, which may be due to the peculiarities of the flow distribution in the system.

It was also found that an increase in the application rate contributed to an increase in the uniformity of application, since the system operates more stably at higher feeds. The absolute error of the application rate in different modes ranged from 1.3% to 6.5%, and the average value of this indicator was 3.76%, which indicates a generally acceptable level of accuracy of the system at different application rates.

Keywords: liquid mineral fertilizers, application quality, application rate, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Агротехнічні особливості застосування рідких добрив	11
1.2 Аналіз досліджень внесення рідких добрив в точному землеробстві.....	27
Розділ 2. Методика досліджень.....	36
2.1 Аплікатор із змінною нормою внесення добрив	36
2.2 Методика збору даних	37
Розділ 3. Аналіз результатів досліджень	39
Висновки.....	43
Список використаних джерел.....	44

ВСТУП

1. Актуальність теми

Сучасні тенденції розвитку аграрного виробництва свідчать про зростаючу роль технологій точного землеробства, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення втрат та оптимізацію агротехнологічних процесів. Одним із ключових елементів цих технологій є застосування систем контролю та регулювання норм внесення добрив, які забезпечують точність, рівномірність та стабільність подачі. Особливої актуальності набуває дослідження ефективності роботи таких систем під час внесення органічних і мінеральних добрив у рідкому вигляді, оскільки нерівномірність подачі може суттєво впливати на продуктивність культур та економічну доцільність технологій.

У контексті зростання вимог до точності агрохімічних операцій та підвищення вартості добрив стає необхідним удосконалення систем внесення, що здатні адаптуватися до змінних норм та забезпечувати високу якість виконання технологічного процесу. Це визначає як практичну, так і наукову значущість теми дослідження. Опрацювання роботи систем керування аплікаторами рідких добрив є важливим етапом у формуванні наукових підходів до підвищення якості внесення та оптимізації технологій точного землеробства.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Наукові публікації останніх років висвітлюють питання вдосконалення засобів і методів внесення рідких добрив, вирівнювання подачі на секції та стабілізації тиску в системах рідинного живлення. Значна увага приділяється точності роботи витратомірів, клапанів автоматичного регулювання, впливу конструктивних особливостей аплікаторів на рівномірність подачі, а також питанням використання GPS-/DGPS-систем у поєднанні з автоматизованим контролем норм внесення.

Водночас, попри наявність широкого спектра досліджень, недостатньо вивченими залишаються питання фактичної точності роботи інтегрованих систем змінних норм внесення у різних режимах подачі та при мінімальних нормах. Особливо це стосується аналізу поведінки систем на краях робочого валка, де нерідко проявляються відхилення через гідравлічні особливості розподілу рідини. Наявні наукові матеріали потребують доповнення експериментальними дослідженнями, які б дозволили оцінити роботу таких систем на практиці та визначити фактори, що найбільше впливають на якість внесення.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка ефективності роботи елементів систем точного землеробства під час внесення рідких добрив шляхом аналізу точності та рівномірності відпрацювання норм аплікатором у поєднанні з системою керування Field-IQ.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес внесення рідких добрив у системах точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є робота системи керування аплікатором та її вплив на точність і рівномірність подачі рідких добрив при різних нормах внесення.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до внесення рідких добрив у технологіях точного землеробства.
2. Провести експериментальні дослідження роботи системи керування Field-IQ у різних режимах.
3. Оцінити точність і варіабельність внесення рідких добрив за різних норм подачі.

7. Методи дослідження

У роботі застосовувалися методи теоретичного аналізу наукових джерел, експериментальні методи вимірювання фактичних норм подачі, статистичні методи опрацювання даних, порівняльний аналіз, а також інструментальні методи контролю параметрів роботи аплікатора та системи керування.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Робота викладена на 46 сторінках машинописного тексту, містить 1 таблицю, 5 рисунків, 25 бібліографічних джерел і 2 додатки. У першому розділі наведено аналітичний огляд стану питання та визначено завдання дослідження. У другому розділі представлено методику проведення експерименту та опис дослідного обладнання. У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень та їх аналіз.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Агротехнічні особливості застосування рідких добрив

Використання рідких добрив у сучасному землеробстві супроводжується низкою специфічних агротехнічних характеристик, що сприяють активізації ростових процесів рослин і покращенню стану ґрунтового середовища. Такі добрива можуть мати форму прозорих розчинів, концентратів або суспензій і демонструють високу ефективність, коли їх застосування інтегрується у технології точного та ресурсозберігаючого господарювання. До ключових агротехнічних аспектів використання рідких добрив належать такі:

1. Точність у застосуванні

Цілеспрямоване внесення поживних речовин. Рідкі добрива забезпечують високий рівень точності під час розподілу поживних елементів, дозволяючи доставляти їх безпосередньо до зони активного розвитку кореневої системи, де рослини найбільше потребують живлення. Найчастіше це здійснюється шляхом фертигації — подачі добрив через системи поливу, або через позакореневе обприскування, коли поживні речовини потрапляють безпосередньо на листову поверхню. Індивідуальне формулювання складів. Завдяки своїй гнучкості, рідкі добрива можна адаптувати під конкретні агрохімічні потреби різних культур, фаз їх розвитку чи ґрунтових умов, забезпечуючи рослинам оптимальне співвідношення поживних елементів у потрібний момент.

2. Зручність у використанні. Поєднання із системами зрошення.

Рідкі добрива чудово сумісні з різними типами поливальних систем, зокрема крапельним і спринклерним зрошенням, що забезпечує рівномірний розподіл поживних речовин по всій площі поля. Це значно скорочує витрати

робочої сили та час, необхідний для ручного внесення добрив. Позакореневе живлення. Застосування рідких форм дає змогу здійснювати обприскування листків рослин, завдяки чому поживні речовини швидко потрапляють у метаболічну систему культури. Такий метод особливо ефективний у періоди інтенсивного росту або нестачі мікроелементів, які важко засвоюються через ґрунт.

3. Оперативна доступність поживних елементів. Прискорене засвоєння. Оскільки рідкі добрива вже перебувають у розчиненому стані, рослини здатні поглинати їх майже миттєво. Це має вирішальне значення у фазах швидкого наростання біомаси або при дії стресових факторів. Негайна реакція культур. На відміну від твердих гранульованих форм, які потребують часу для розчинення і вивільнення елементів живлення, рідкі добрива забезпечують моментальний ефект. Така властивість особливо важлива під час критичних етапів розвитку — наприклад, у період бутонізації, цвітіння чи формування плодів.

4. Підвищення ефективності використання поживних речовин.

Зменшення втрат.

Завдяки локальному способу внесення — безпосередньо у прикореневу зону або на листову поверхню — рідкі добрива істотно скорочують втрати поживних речовин, які могли б бути вимиті або випаруватись. Це підвищує коефіцієнт їх засвоєння та знижує негативний вплив на довкілля.

Поступове вивільнення. Окремі типи рідких добрив мають властивість контрольованого віддавання поживних елементів. Такий механізм забезпечує рівномірне живлення культур протягом тривалого часу, підтримуючи стабільний розвиток рослин і підвищуючи загальну продуктивність агроєкосистеми.

5. Універсальність застосування

Придатність для різних видів культур.

Рідкі форми добрив відзначаються багатофункціональністю, адже їх можна використовувати для широкого спектра сільськогосподарських рослин — від зернових культур і овочевих насаджень до садових дерев та декоративних видів. Вони ефективні на різних етапах розвитку рослин, що забезпечує гнучкість у їх застосуванні відповідно до агротехнічних потреб.

Здатність до комбінування з іншими препаратами. Рідкі добрива часто сумісні з різними агрохімічними засобами, такими як гербіциди, фунгіциди або інсектициди. Завдяки цьому можливе одночасне внесення кількох речовин, що дозволяє суттєво зменшити витрати на робочу силу, оптимізувати процеси догляду за посівами та забезпечити ефективне управління їхнім здоров'ям.

6. Екологічні та економічні переваги.

Зниження негативного впливу на довкілля.

Точне та раціональне дозування поживних елементів у рідких добривах сприяє зменшенню їх загальної кількості, необхідної для досягнення бажаного ефекту. Це, у свою чергу, мінімізує ризик забруднення навколишнього середовища через стік чи вимивання речовин у водойми, що особливо важливо для екологічної безпеки агровиробництва.

Фінансова вигода та ефективність.

У довгостроковій перспективі застосування рідких добрив дозволяє агровиробникам знизити загальні витрати, зменшити кількість відходів, оптимізувати трудові ресурси та забезпечити вищу врожайність. Таким чином, їх використання є не лише агротехнічно доцільним, а й економічно виправданим рішенням.

7. Взаємодія з передовими технологіями.

Інтеграція з системами точного землеробства. Рідкі добрива чудово поєднуються з сучасними технологічними рішеннями, зокрема з інструментами точного землеробства, такими як системи внесення змінної норми. Вони забезпечують подачу поживних речовин саме в ті зони, де це

найбільш необхідно, спираючись на дані про стан ґрунтів і посівів у реальному часі.

Завдяки цим агротехнічним особливостям рідкі добрива перетворюються на надзвичайно ефективний інструмент сучасного агровиробництва. Висока точність дозування, зручність використання та швидке засвоєння поживних елементів сприяють підвищенню продуктивності, поліпшенню використання поживних речовин і зміцненню екологічної стабільності. Застосування таких добрив із урахуванням потреб конкретних культур дозволяє оптимізувати технологічні процеси та підтримувати сталий стан ґрунтів.

Рідкі органічні добрива.

Загальна характеристика.

Рідкі органічні добрива (LOFs) — це концентровані розчини, насичені поживними елементами, які отримують із природної сировини: компосту, гною, рибної емульсії, екстрактів морських водоростей або залишків рослинного походження. Вони не лише забезпечують рослини необхідними елементами живлення, а й покращують структуру ґрунту, стимулюють його біологічну активність і зменшують екологічні ризики. Для досягнення найвищої ефективності слід застосовувати LOF відповідно до типу культури, стану ґрунту та умов довкілля.

Основні методи внесення. Найбільш поширеними способами подачі рідких органічних добрив є позакореневе підживлення, фертигація та зволоження ґрунту.

Позакореневе підживлення

Цей метод передбачає нанесення поживного розчину безпосередньо на листову поверхню рослин шляхом обприскування. Завдяки цьому поживні елементи проникають через продихи та епідерміс, мінаючи ґрунтові обмеження, наприклад, низьку родючість або дисбаланс елементів живлення. Позакореневе підживлення особливо ефективне для швидкого

усунення дефіциту певних речовин, таких як азот, залізо чи інші мікроелементи, необхідні для нормального розвитку рослин.

Перевагою цього підходу є оперативне засвоєння поживних речовин — результати можуть бути помітні вже через кілька днів. Крім того, такий спосіб забезпечує цілеспрямовану подачу поживних елементів саме до листя, квітів або плодів, що підвищує ефективність живлення. Позакореневе підживлення також корисне у випадках, коли коренева система не може ефективно поглинати поживні речовини через посушливі умови чи ущільнення ґрунту.

Водночас цей метод зазвичай розглядається як допоміжний, оскільки він не здатний забезпечити рослини усім комплексом поживних речовин у необхідних кількостях. Крім того, обприскування в період сильної спеки або під прямими сонячними променями може викликати опіки листової поверхні. Тому оптимальним часом для внесення рідких добрив є ранкові або вечірні години, коли інтенсивність сонячного випромінювання є мінімальною.

Фертигація

Фертигація — це технологія подачі рідких добрив через системи зрошення, зокрема краплинного або дощувального типу. Завдяки такому підходу і вода, і живильні елементи потрапляють безпосередньо до кореневої зони культур, що забезпечує максимально ефективне їх засвоєння саме в тому місці, де це найпотрібніше для розвитку рослин. Подібна практика широко впроваджена у сучасному промисловому землеробстві, а також активно застосовується в тепличному виробництві.

Основна перевага фертигації полягає в раціональній і рівномірній доставці поживних речовин. Завдяки цій системі добрива надходять безпосередньо до коренів, що покращує їх поглинання, сприяє швидшому росту рослин і водночас мінімізує втрати поживних компонентів.

Крім того, фертигаційні установки можуть бути частиною

автоматизованих систем управління зрошенням. Інтеграція таких технологій дає змогу зменшити витрати робочої сили, оптимізувати процеси внесення та гарантувати стабільність у подачі живильних розчинів.

Ще однією суттєвою перевагою є зменшення витрат води порівняно із традиційними методами поливу. Фертигація також запобігає втратам добрив через поверхневий стік, сприяючи ощадливому використанню ресурсів. Водночас подібні системи вимагають періодичного технічного обслуговування для уникнення засмічення трубопроводів органічними домішками. У випадку використання рідких органічних добрив часто необхідне додаткове фільтрування, щоб запобігти забиванню зрошувальних ліній та підтримати безперебійну роботу всієї системи.

Зволоження ґрунту

Метод зволоження ґрунту передбачає внесення рідких добрив безпосередньо в прикореневу зону — тобто в ґрунт біля основи рослини. Поживні речовини потрапляють до кореневої системи, де поступово засвоюються, забезпечуючи тривале та стабільне живлення. Такий спосіб живлення зазвичай застосовують у садівництві, розсадниках та фруктових насадженнях, де важливим є розвиток потужної кореневої системи та здорової листової маси.

Перевага цього підходу полягає в цілеспрямованому живленні через коріння: речовини надходять безпосередньо в активну зону поглинання, що гарантує тривалий ефект. Крім того, використання органічних рідких добрив стимулює мікробіологічну активність, сприяє формуванню стійкої структури ґрунту та підвищує його родючість у довгостроковій перспективі.

Порівняно з гранульованими формами, рідкі добрива, внесені з поливом, менше вимиваються дощем чи надлишком води під час зрошення. Завдяки цьому втрати поживних речовин істотно зменшуються, а ефективність підживлення підвищується. Водночас надмірне використання розчину може призвести до перезволоження ґрунту або навіть загнивання

кореневої системи, особливо на ділянках із поганим дренажем. Результативність методу значною мірою залежить від механічного складу ґрунту: на легких піщаних землях потрібні частіші внесення через швидке вимивання розчину.

Кожен зі способів застосування рідких органічних добрив — позакореневе підживлення, фертигація та зволоження ґрунту — має власні переваги та особливості використання. Позакореневе підживлення дозволяє оперативно забезпечити рослини необхідними елементами живлення через листову поверхню; фертигація забезпечує цілеспрямовану подачу добрив разом із поливом; а зволоження ґрунту дає змогу тривалий час підтримувати живлення коренів, одночасно покращуючи стан ґрунтового середовища.

Вибір найдоцільнішого варіанту залежить від специфіки культури, типу ґрунту, кліматичних умов, наявних технічних ресурсів і бажаного агрономічного ефекту. За умови грамотного використання всі три методи сприяють підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва, зростанню урожайності, поліпшенню структури ґрунтів і зменшенню негативного впливу аграрної діяльності на довкілля.

Зростаюча потреба у впровадженні стійких і продуктивних технологій землеробства спричинила активніше використання органічних добрив у сучасному агровиробництві. Серед усього їхнього різноманіття особливе місце займають рідкі органічні добрива, що відзначаються швидким засвоєнням поживних речовин рослинами та високою ефективністю їх транспортування до кореневої системи. Водночас застосування таких добрив потребує спеціалізованої техніки, здатної забезпечити рівномірний розподіл робочого розчину, мінімізувати втрати і підвищити коефіцієнт засвоєння поживних елементів культурами. У даній роботі розглядаються основні види машин, які використовують для внесення рідких органічних добрив, їхня будова, принципи функціонування, а також переваги, що вони надають сучасному аграрному виробництву.

Існує значна кількість технічних засобів, розроблених для внесення рідких органічних добрив, причому кожен тип адаптований під конкретні умови господарства, вид культур або технологію живлення. Одним із найпоширеніших засобів є штангові обприскувачі, що забезпечують рівномірне нанесення робочої рідини на великі площі. Такі агрегати оснащуються довгими розпилювальними штангами, на яких розташовані форсунки, котрі розбризкують добриво на поверхню ґрунту або безпосередньо на рослини. Довжина штанг може змінюватися залежно від ширини захвату, що дозволяє ефективно обробляти значні ділянки за один прохід. Найчастіше штангові обприскувачі монтуються на тракторі, завдяки чому оператор має змогу регулювати швидкість руху і норму розпилення, досягаючи максимальної точності внесення. За необхідності техніка калібрується відповідно до типу добрива, що забезпечує оптимальну дозу внесення й запобігає перевитратам чи нестачі поживних речовин.

Ще одним високоефективним методом є використання систем крапельного зрошення у поєднанні з інжекторами для подачі добрив. За такої технології живильний розчин вводиться безпосередньо у водогінну систему і подається до кореневої зони кожної окремої рослини через мережу трубопроводів і крапельниць. Такий локалізований спосіб живлення гарантує точну, контрольовану подачу поживних речовин, мінімізує втрати та значно підвищує ефективність їх засвоєння. Крапельне добриводування особливо актуальне в регіонах із дефіцитом водних ресурсів або там, де необхідна підвищена точність живлення — наприклад, у садівництві, тепличному господарстві чи виноградарстві.

Цистерни для гною виконують функцію транспортування і розподілу рідких органічних речовин, зокрема гноївки чи компостного чаю, що застосовуються як цінне добриво. Такі машини обладнані містким резервуаром, потужними насосами та спеціальним розподільним пристроєм, який рівномірно розподіляє добриво по поверхні ґрунту.

Удосконалені моделі можуть мати систему інжекційного внесення, яка вводить рідину безпосередньо в ґрунтовий шар, знижуючи втрати поживних елементів через випаровування чи змивання. Найчастіше цистерни застосовують на тваринницьких фермах, де накопичуються великі об'єми гною, забезпечуючи раціональне використання органічних відходів як екологічно безпечного добрива.

Конструкція та принцип роботи машин для внесення рідких органічних добрив залежать від їхнього типу, але мають низку спільних характеристик і функціональних вузлів.

Усі подібні механізми оснащені резервуарами, у яких тимчасово зберігається добриво до моменту подачі. Об'єм таких баків може бути різним — від невеликих пересувних ємностей для локального використання до великих промислових резервуарів, розрахованих на обробіток значних площ. Насосне обладнання забезпечує переміщення рідини від бака до системи розпилення або подачі, створюючи стабільний потік і запобігаючи утворенню повітряних пробок чи засміченню системи. Регулювання тиску та потужності насоса є ключовим фактором, що визначає рівномірність розподілу розчину і точність дозування добрива згідно з агротехнічними нормами.

У таких агрегатах, як штангові обприскувачі, форсунки виконують визначальну функцію, формуючи конфігурацію розпилення, розмір крапель і площу охоплення. Кожна форсунка проходить точне калібрування для забезпечення рівномірного розподілу рідких добрив по заданій ділянці. Конструктивні особливості форсунки визначають характер розпилу робочої рідини — від утворення дрібнодисперсних аерозолів до більших крапель — залежно від агротехнічних вимог конкретної культури та особливостей ґрунту. Моделі з можливістю регулювання дозволяють операторові змінювати ширину смуги обприскування, що забезпечує адаптацію процесу внесення добрив до різних польових умов і типів посівів.

Системи крапельного зрошення з інжекторами для подачі добрив функціонують шляхом попереднього змішування розчинів поживних речовин з водою у визначеній пропорції перед подачею їх безпосередньо до кореневої зони рослин. Для забезпечення стабільності концентрації таких сумішей застосовують обладнання з високою точністю дозування. Інжектори, що працюють за принципом насоса Вентурі або мембранного насоса, забирають добриво з ємності для зберігання, змішують його з водою та подають у систему поливу. Утворена суміш транспортується через крапельні лінії безпосередньо до культур, що забезпечує мінімальні втрати і доставку поживних елементів саме туди, де вони потрібні найбільше. Такий підхід підвищує ефективність живлення рослин і сприяє ощадливому використанню ресурсів.

Сучасні сільськогосподарські машини дедалі частіше обладнують навігаційними системами GPS та різноманітними сенсорами, які відкривають широкі можливості для впровадження технологій точного землеробства. Завдяки супутниковому позиціонуванню здійснюється картографування полів, контроль траєкторії руху техніки та дозування добрив із високою просторовою точністю, що зменшує накладання смуг обробітку й забезпечує рівномірне внесення поживних речовин. Сенсорні системи фіксують параметри стану ґрунту, інтенсивність росту культур, а також погодні умови, дозволяючи оперативну коригувати норми внесення в режимі реального часу. Використання таких технологій сприяє зниженню обсягів застосування добрив, економії ресурсів і зменшенню негативного впливу на екосистему.

Застосування спеціалізованих агрегатів для розподілу рідких органічних добрив створює численні переваги як для аграріїв, так і для доквілля. Такі машини, як штангові обприскувачі чи гноєрозподільні цистерни, забезпечують швидке й рівномірне покриття великих площ, значно скорочуючи часові витрати й зменшуючи потребу в ручній роботі.

Крапельні системи з інтегрованими інжекторами підтримують безперервне надходження поживних речовин до рослин, що підвищує коефіцієнт засвоєння добрив і сприяє стабільнішому росту культур.

Високоточне обладнання, оснащене GPS-навігацією, датчиками та форсунками з можливістю регулювання, гарантує внесення поживних сумішей виключно у визначені зони, запобігаючи надмірному розпиленню та стоку речовин у водні об'єкти. Така точність дозволяє зберігати екологічну рівновагу та зменшує ризик забруднення довкілля продуктами агрохімії, сприяючи поширенню практик сталого сільського господарства.

Автоматизація процесу внесення добрив помітно знижує залежність виробництва від ручної праці, надаючи фермерам можливість приділяти більше уваги іншим аспектам управління аграрним підприємством. У перспективі така ефективність машинного внесення дозволяє оптимізувати виробничі витрати завдяки зменшенню перевитрат матеріалів і підвищенню врожайності культур, що, своєю чергою, робить агровиробництво економічно вигіднішим та екологічно збалансованішим.

Рідкі органічні добрива, які застосовуються за допомогою спеціалізованої техніки, сприяють інтенсивному та гармонійному росту рослин, забезпечуючи їх необхідними елементами живлення у формі, що легко засвоюється. Систематичне й точне внесення таких добрив гарантує рівномірне забезпечення поживними речовинами протягом усього періоду вегетації, що, своєю чергою, позитивно впливає на врожайність і підвищує якість отриманої продукції.

Технічні засоби для розподілу рідких органічних добрив посідають провідне місце в сучасному аграрному виробництві, оскільки забезпечують ефективні, екологічно безпечні та високоточні методи удобрення. Серед найпоширеніших видів обладнання варто відзначити штангові обприскувачі, системи крапельного зрошення з дозаторами добрив та цистерни для транспортування і внесення гною. Кожен тип техніки виконує

свою функцію залежно від виду культури, агротехнічних умов і стану ґрунту. Використання таких машин не лише підвищує результативність внесення добрив, але й сприяє екологічній рівновазі, зменшуючи кількість відходів та запобігаючи надмірному насиченню ґрунту поживними речовинами. З огляду на постійне зростання інтересу до органічного землеробства й принципів сталого розвитку, застосування подібного обладнання стає дедалі більш необхідним і визначатиме майбутній напрям розвитку аграрної галузі.

Підґрунтове внесення рідких органічних добрив — це ефективний агротехнічний прийом, який передбачає подачу добрив безпосередньо під поверхню землі, у зону розташування кореневої системи рослин. Такий спосіб має низку переваг як з точки зору агрономії, так і з позиції охорони навколишнього середовища, порівняно з поверхневим внесенням. Внесення добрив у підґрунтовий шар сприяє кращому засвоєнню поживних речовин, знижує їх втрати та підтримує концепцію сталого землеробства через покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту та підвищення його родючості. Глибоке розуміння технологічних аспектів цього процесу дає можливість агровиробникам оптимізувати вирощування культур, одночасно зменшуючи вплив на довкілля, зокрема скорочуючи стік поживних елементів і обмежуючи викиди парникових газів.

Однією з головних переваг внесення добрив під поверхню є ефективна доставка поживних речовин безпосередньо до зони активного росту коренів. Такий підхід забезпечує більш повне засвоєння елементів живлення, водночас зменшуючи конкуренцію між культурними рослинами та бур'янами. Рідкі органічні добрива зазвичай містять у своєму складі азот, фосфор, калій і цінні органічні сполуки, які легко доступні для рослин під час підповерхневого внесення. Точне дозування та спрямоване внесення дають змогу скоротити обсяг використаних добрив, підвищити економічну ефективність і раціонально використовувати ресурси. Крім того, поживні

елементи, особливо азот, залишаються більш стабільними у підґрунті, що знижує втрати від випаровування, характерні для поверхневого способу внесення.

Ще однією важливою перевагою глибинного внесення є його здатність мінімізувати ризик змивання та вимивання поживних компонентів. Добрива, що розподіляються на поверхні ґрунту, часто потрапляють у водні об'єкти під дією опадів чи зрошення, спричиняючи забруднення річок, озер і підземних вод. Натомість підґрунтове внесення дозволяє утримати поживні речовини у кореневій зоні, суттєво зменшуючи ймовірність екологічних втрат. Такий метод особливо ефективний у регіонах із підвищеною кількістю опадів або там, де природні водойми чутливі до надлишку мінеральних сполук.

Поліпшення стану ґрунтового середовища є ще одним суттєвим результатом застосування рідких органічних добрив шляхом їх безпосереднього внесення у товщу ґрунту. Органічні сполуки, що містяться в таких добривах, стимулюють активність корисних мікроорганізмів, забезпечуючи безперервний кругообіг поживних елементів і сприяючи формуванню сприятливої ґрунтової структури. Із часом накопичення органічних речовин позитивно впливає на вологоємність, покращує повітрообмін і створює умови для здорового розвитку кореневої системи. Це формує більш стабільне та витривале середовище для росту культурних рослин, особливо у періоди нестачі вологи або за наявності інших стресових екологічних чинників.

Внесення добрив під поверхню ґрунту також сприяє зниженню обсягів парникових викидів, які зазвичай супроводжують використання традиційних форм добрив. Поверхнєве розкидання органічних матеріалів, зокрема тих, що мають високий вміст азоту, може спричинити вивільнення оксиду азоту — одного з найпотужніших парникових газів. За умов підґрунтового внесення подібні втрати суттєво зменшуються, адже

мікробіологічні процеси, що призводять до утворення закису азоту, є менш інтенсивними у глибших шарах. Завдяки цьому технологія сприяє екологічно безпечному землеробству, не знижуючи при цьому показників урожайності.

Крім позитивного впливу на довкілля, така практика забезпечує підвищення продуктивності та покращення якості врожаю. Рослини отримують більш рівномірне і тривале надходження поживних елементів, що зміцнює їхню фізіологічну стійкість, активізує ріст і формування плодів. У галузях садівництва та овочівництва, де якість і вирівняність плодів мають вирішальне значення, контрольована доступність поживних речовин, досягнута за допомогою підґрунтового внесення, дозволяє підтримувати оптимальний рівень продуктивності. Такий підхід узгоджується з використанням сучасної техніки та технологій точного землеробства, включаючи системи змінних норм внесення, які забезпечують адаптацію дози добрив до реальних умов кожної ділянки поля.

Водночас застосування підґрунтового методу має і певні технічні складнощі. Його реалізація потребує спеціалізованого обладнання, здатного рівномірно вводити рідкі добрива у товщу ґрунту, що збільшує початкові фінансові витрати. Крім того, процес внесення є більш трудомістким і може займати більше часу порівняно з традиційним поверхневим способом, особливо у великих господарствах. Однак переваги в довгостроковій перспективі — підвищення ефективності використання поживних речовин, зменшення негативного впливу на довкілля та оздоровлення ґрунтів — переважають ці початкові витрати.

Отже, підґрунтове внесення рідких органічних добрив можна розглядати як ефективну, ресурсозберігаючу та екологічно безпечну технологію, що сприяє покращенню живлення рослин, мінімізації втрат поживних елементів і підвищенню сталості агровиробництва. Такий підхід забезпечує надходження необхідних речовин безпосередньо в зону

активних коренів, знижує ризики забруднення водних об'єктів, підтримує родючість ґрунтів і зменшує парникові викиди. Хоча впровадження цієї практики потребує певних інвестицій у технічне оснащення, її екологічні та агрономічні результати роблять метод вагомим інструментом для господарств, орієнтованих на поєднання високої продуктивності з екологічною стійкістю.

Використання рідких органічних добрив є однією з ключових технологій у сучасному сталому землеробстві. Воно сприяє поліпшенню стану ґрунту, підвищенню врожайності культур і зменшенню негативного впливу на довкілля. Для досягнення максимальної ефективності та уникнення можливих ризиків необхідно дотримуватися певних агротехнічних правил, що визначають правильність і доцільність їх застосування. Ці вимоги охоплюють такі аспекти, як вибір виду добрива, оптимальні строки внесення, способи подачі, точність дозування та екологічні чинники, які впливають на кінцевий результат.

Насамперед потрібно усвідомлювати, який саме тип рідкого органічного добрива використовується. Джерела таких добрив можуть бути різноманітними — від компостних чаїв і рідкого гною до екстрактів рослинного походження. Кожен вид характеризується унікальним вмістом поживних елементів і певною концентрацією, що безпосередньо визначає особливості його застосування. Наприклад, гній має значну кількість азоту, фосфору й калію, однак може містити підвищені рівні солей або навіть збудники хвороб. Натомість компостний чай вирізняється збалансованим складом і наявністю корисної мікрофлори, проте потребує ретельнішого контролю пропорцій розведення для забезпечення максимальної користі.

Не менш суттєве значення мають терміни внесення добрив. Найефективніше застосовувати рідкі органічні добрива на етапах активного росту культур — перед висівом, під час формування листового апарату, цвітіння або наливу плодів. Це забезпечує своєчасне надходження

поживних речовин, коли рослини найбільше в них потребують. Водночас момент внесення має враховувати кліматичні умови, такі як температура, вологість чи ймовірність опадів. У спекотну, посушливу погоду добрива можуть втрачати ефективність через випаровування або вимивання, що значно зменшує їх засвоюваність.

Метод внесення також відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності живлення культур. Серед найпоширеніших способів — крапельне зрошення, листкове обприскування та ін'єкційне введення у ґрунт. Крапельна система дозволяє рівномірно розподіляти добриво та запобігати втратам поживних речовин. Позакореневе підживлення, коли добрива розпилюють безпосередньо на листову поверхню, забезпечує швидке поглинання елементів, однак переважно використовується для корекції дефіциту мікроелементів або швидкої реакції на нестачу поживних речовин.

Окремої уваги потребує контроль за дозуванням. Надмірне внесення може призвести до надлишку елементів живлення, що викликає дисбаланс, пригнічення росту культур і навіть забруднення підземних вод. Натомість недостатня кількість добрив не дозволить досягти бажаного рівня урожайності. Тому оптимальна доза визначається з урахуванням результатів агрохімічного аналізу ґрунту, особливостей культури та концентрації поживних речовин у добриві. Точність у дозуванні дає змогу задовольнити потреби рослин без перевантаження агроєкосистеми.

Варто також приділяти увагу екологічним аспектам. Надзвичайно важливо не допустити потрапляння надлишкових поживних речовин у водойми, адже це може спричинити евтрофікацію — процес, за якого зменшується кількість розчиненого кисню у воді, що негативно впливає на рибу та інші водні організми. Для уникнення цього рідкі органічні добрива не варто застосовувати під час сильних дощів або на ділянках із перезволоженим ґрунтом. Крім того, рекомендується залишати буферні

смуги вздовж річок і ставків, щоб зменшити ризик забруднення.

Інтеграція органічних добрив у загальну систему управління родючістю ґрунтів має вирішальне значення для сталого розвитку агровиробництва. Такий підхід передбачає впровадження сівозміни, використання сидератів, систематичний моніторинг стану ґрунту й збалансоване поєднання органічних і мінеральних засобів живлення. Завдяки цьому забезпечується не лише короткостроковий ефект підвищення врожайності, але й довготривала стабільність агроecosystem.

Отже, агротехнічні вимоги до внесення рідких органічних добрив ґрунтуються на продуманому плануванні, науковому підході та точному виконанні. Правильний вибір препарату, своєчасне внесення, відповідна технологія, дотримання дозування та екологічна відповідальність дозволяють максимально розкрити потенціал таких добрив. Застосування цих принципів сприяє не лише підвищенню врожайності та поліпшенню структури ґрунту, але й утвердженню екологічно орієнтованого напрямку розвитку сільського господарства.

1.2 Аналіз досліджень внесення рідких добрив в точному землеробстві

Точне землеробство (Precision Agriculture, PA) становить суттєвий етап еволюції у сфері агровиробництва, відкриваючи нові можливості для фермерів у прийнятті рішень, заснованих на ретельному аналізі великих масивів даних і використанні сучасних технологій. Одним із ключових напрямів цього підходу є система внесення добрив, що зазнала відчутних трансформацій із появою та активним впровадженням рідких форм добрив. У науковій літературі представлено значну кількість досліджень, які розглядають особливості застосування рідких добрив у рамках точного землеробства, акцентуючи увагу на їхніх перевагах, потенційних викликах

і загальному впливі на продуктивність культур, ефективність використання ресурсів та екологічну рівновагу.

Рідкі добрива отримали високу оцінку серед аграріїв завдяки універсальності їх застосування та швидкому засвоєнню поживних елементів рослинами. На відміну від твердих гранульованих добрив, які розчиняються повільніше та не завжди забезпечують рослини необхідними речовинами в критичні фази розвитку, рідкі суміші гарантують оперативне надходження поживних компонентів. Експериментальні результати свідчать, що застосування рідких добрив підвищує ефективність поглинання елементів живлення, оскільки вони часто доставляються безпосередньо до кореневої зони через системи фертигації. Такий цілеспрямований підхід знижує втрати поживних речовин, підвищує коефіцієнт їх використання та, зрештою, сприяє збільшенню врожайності.

Важливою складовою концепції точного землеробства є використання інформаційних технологій і аналітичних даних, які дозволяють надзвичайно точно регулювати внесення добрив і інших ресурсів. Сучасні досягнення у сфері дистанційного зондування Землі, сенсорів вологості ґрунту, а також геоінформаційних систем (ГІС) створюють можливість відслідковувати просторову неоднорідність полів та своєчасно реагувати на її зміни. Наукові дослідження підтверджують, що інтеграція рідких добрив із цими технологіями здатна значно підвищити ефективність управління поживними речовинами. Наприклад, завдяки аналізу стану ґрунту й вегетаційного розвитку культур у реальному часі фермери можуть коригувати дози рідких добрив для окремих ділянок, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів і зменшуючи втрати.

Крім того, застосування рідких добрив у системі точного землеробства гармонійно поєднується з принципами сталого розвитку аграрного сектору. Точне дозування добрив знижує ризики надмірного їх внесення, що традиційно призводить до екологічних проблем — зокрема,

до вимивання поживних речовин, ерозії та деградації ґрунтів, а також забруднення водних джерел. Емпіричні дані свідчать, що точне внесення рідких добрив дозволяє істотно скоротити ці негативні наслідки, покращуючи екологічну ситуацію в агроекосистемах. Так, у різних регіонах, де проводилися польові експерименти, зафіксовано зменшення вимивання азоту та стікання фосфатів при використанні технологій контрольованого внесення рідких добрив, що підтверджує їхню ефективність і відповідність концепції екологічно безпечного землеробства.

Незважаючи на численні переваги, впровадження рідких добрив у практику точного землеробства все ще стикається з певними складнощами. Однією з головних проблем залишається висока вартість необхідної інфраструктури, включно зі спеціалізованим обладнанням для внесення та зберігання рідких добрив. Крім того, важливим є забезпечення фермерів відповідними навчальними програмами та тренінгами, що дозволяють ефективно користуватися новітніми технологіями та дотримуватися оптимальних методів внесення добрив. Наукові дослідження показують, що без достатнього рівня підготовки потенційні переваги точного землеробства та застосування рідких добрив можуть залишатися нереалізованими, що призводить до неефективного використання цих інноваційних рішень.

Ще однією суттєвою проблемою є неоднорідна реакція різних культур на рідкі добрива залежно від типу ґрунтів та кліматичних умов. Хоча деякі дослідження фіксують позитивний вплив на урожайність та засвоєння поживних речовин, інші демонструють неоднозначні результати, що підкреслює потребу у додаткових дослідженнях для вивчення взаємодії рідких добрив з конкретними екологічними умовами. Проведення польових експериментів і довгострокових наукових спостережень є необхідним для розробки чітких рекомендацій щодо ефективного використання рідких добрив у різних сільськогосподарських регіонах, що дозволить фермерам отримувати максимальні переваги при мінімізації ризиків.

Аналіз практики застосування рідких добрив у точному землеробстві демонструє їх значний потенціал у підвищенні врожайності та сприянні сталому веденню сільського господарства. Використання сучасних технологій та аналітики даних забезпечує точне дозування добрив, підвищуючи ефективність використання поживних речовин та зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище. Водночас, для повного розкриття цих переваг необхідно вирішити проблеми, пов'язані з фінансовими витратами, освітньою підготовкою та варіативністю реакцій культур. Продовження досліджень і впровадження інновацій будуть ключовими для подолання зазначених викликів і зміцнення ролі точного землеробства у сучасному агросекторі. Оптимізація внесення добрив дозволяє фермерам підвищувати врожайність, водночас підтримуючи екологічну стійкість та сприяючи глобальній продовольчій безпеці.

У практичному застосуванні технологій точного землеробства поля зазвичай поділяють на менші підзони, які називають зонами управління. Кожна така зона характеризується певною однорідною комбінацією факторів, що впливають на продуктивність, для яких можна встановити конкретну норму внесення добрив для окремих культур. Методи змінних норм внесення (VRT) стають все більш поширеними в агровиробництві, оскільки дозволяють враховувати просторову неоднорідність полів. Водночас точність роботи VRT значною мірою залежить від правильного калібрування обладнання та грамотної експлуатації, щоб уникнути помилок у застосуванні.

Використання систем VRT ускладнює зміну швидкості під час внесення добрив, що потребує від фермерів нових знань і практичних навичок для ефективного застосування технології. Багато користувачів точного землеробства стикаються з обмеженим доступом до повної технічної документації та навчальних матеріалів, необхідних для збору даних і коректного використання систем [6]. На сьогодні відсутні єдині

стандартизовані протоколи тестування для оцінки обладнання VRT. Одне з ключових питань полягає в тому, що потрібно оцінювати окремі компоненти системи як єдине ціле, щоб кількісно визначити точність внесення. Додатково, небагато виробників забезпечують достатній контроль норм внесення для VRT [14], що підкреслює необхідність подальших досліджень для визначення впливу різних джерел помилок на точність роботи систем. Таким чином, стандартизовані методики тестування та звітності залишаються критично важливими для об'єктивної оцінки ефективності обладнання VRT.

Основна увага при роботі з VRT була приділена розвитку як апаратних, так і програмних компонентів, а також впровадженню цих систем у практику. Наукові дослідження поки що відстають у визначенні точності застосування подібних технологій та виявленні потенційних джерел похибок у процесі їх експлуатації. Існують певні сумніви щодо точності внесення пестицидів і мінеральних добрив за допомогою VRT при використанні карт-завдань, що регламентують норми внесення на різних ділянках. Дослідження показують, що динамічне зважування аплікатора добрив і його автоматичне калібрування під час внесення є необхідним для підтримання правильного висіву гранульованих матеріалів системою VR. Однак точність фактичного розподілу добрив аплікатором не завжди прямо залежить від точності дозування: критично важливо, щоб маса матеріалу була рівномірно розподілена на конкретній площі поля.

Оптичні сенсори та системи візуального контролю можуть застосовуватися для прогнозування траєкторії попадання гранул добрив і забезпечення безперервного моніторингу просторового розподілу матеріалу під час внесення. При моделюванні розподілу можуть виникати асиметричні нерівномірності, що впливають на якість технологічного процесу. Таким чином, оцінка структури розподілу у реальному часі та контроль осадження добрив забезпечують ефективний зворотний зв'язок,

який допомагає підтримувати рівномірне внесення за технологіями VR. Для досягнення максимальної точності просторового внесення необхідно контролювати миттєвий потік і розподіл матеріалу. Станом на сьогоднішній день жоден із комерційно доступних аплікаторів не поєднує обидві ці функції одночасно.

Визначення часу затримки або реакції системи VRT дозволяє правильно налаштувати функцію «попередження», яка реалізована у багатьох програмних пакетах, за умови, що система демонструє однакову реакцію на збільшення та зменшення швидкостей. Автори роботи [17] описують методику змішування рідких добрив та контроль їх потоку для мінімізації затримки при транспортуванні матеріалу. Вони дійшли висновку, що покращення стабільності швидкостей і сумішей можна досягти шляхом: контролю потоку до кожного елемента системи, скорочення часу реакції насосів та клапанів, мінімізації об'єму сполучних шлангів, а також адекватного та максимально наближеного до форсунок змішування.

Дослідження також показали, що зміни швидкості роботи насосів або регулювання потоків рециркуляції є ефективними засобами контролю подачі добрив. Особлива увага приділяється присутності затримки або часу реакції всієї системи, який суттєво впливає на точність внесення. При внесенні рідких добрив транспортна затримка інжектора VR коливалася від 17 до 56 секунд, що вказує на нерівномірний час реакції по довжині штанги для кожної форсунки. Такі затримки часто спричиняють похибки програмного забезпечення, адже зміни швидкості відбуваються раніше або пізніше запланованого моменту. Значне підвищення продуктивності VRT можливе за рахунок координаційного керування потоком.

Помилки також виникають у моделях розподілу через тривалі затримки в окремих соплах або точках внесення по всій ширині захвату аплікатора. Молін та співавт. [12] відзначили, що час реакції розкидача VRT

становив 3,2 секунди при збільшенні крокової зміни і 5,6 секунди при її зменшенні. Крім того, VR аплікатор у цих випробуваннях вносив меншу кількість добрив, ніж передбачалося, у деяких випадках до -27%. Детальна процедура калібрування при цьому не була наведена. Ці дані свідчать про те, що для точного регулювання норми внесення в необхідний момент часу потрібно враховувати різні попередні проміжки часу, що визначаються характеристиками системи.

Існує спеціалізоване програмне забезпечення, призначене для управління змінними нормами внесення добрив, яке дозволяє встановлювати лише один параметр «випередження» за раз. Однією з проблем, що виникли під час проведення тестувань систем VRT, було недостатнє внесення технологічного матеріалу, що вказує на необхідність застосування різних методик калібрування аплікаторів з VRT для забезпечення точної норми добрив.

Більшість сучасних систем VRT регулюють не швидкість руху оператора, а саме масу потоку добрив. Регулювання змінної маси потоку вважається ефективнішим методом контролю норми внесення, оскільки залежність від швидкості пересування залишає за оператором додаткові завдання і може призводити до швидшого настання втоми. Водночас автоматизоване керування може застосовуватись і для контролю швидкості агрегату, як засобу мінімізації помилок при внесенні, що виникають через коливання маси потоку.

Подальші наукові дослідження мають встановити, чи ефективніше регулювати швидкість руху агрегату, масу потоку або поєднувати обидва параметри одночасно, щоб зменшити похибки при використанні VRT. Такі роботи можуть визначити, що робочі швидкості слід інтегрувати разом із нормами внесення на основі карт-завдань під час застосування технології VRT.

Технологія змінних норм внесення (VRT) є ключовим елементом

систем точного землеробства. Вона базується на використанні даних про конкретні ділянки поля для оптимізації кількості сільськогосподарських ресурсів, наприклад добрив, на окремих частинах поля. Для цього необхідне високоточне та надійне обладнання VRT із достатньою роздільною здатністю для точного внесення матеріалів.

Особливе значення у рослинництві має внесення азотних добрив (N), яке є операцією з найбільшими технологічними витратами. Реакція культур на азотні добавки змінюється в часі та просторі навіть в межах одного поля. Використання змінної норми внесення (VRA) для азоту, що ґрунтується на потребах рослин на конкретних ділянках, може забезпечувати економічну вигоду виробникам і зменшувати негативний вплив на довкілля.

Сучасні машини для внесення добрив оснащують контролерами VRA та відповідним програмним забезпеченням. Крім того, необхідна навігаційна система з GPS-приймачем для визначення точного місцезнаходження аплікатора. Використовуючи геопросторову інформацію та карти-завдання, контролер VRA генерує електричні сигнали для механічного приводу дозатора, що дозволяє вносити добрива із заданою нормою в конкретне місце на полі. Наприклад, аплікатори рідких добрив із VRA обладнані сервоклапанами, витратомірами та датчиками швидкості, що забезпечує контроль потоку рідини для досягнення необхідної норми внесення. Під час роботи на полі контролер VRA отримує дані про поточне положення агрегату від GPS-приймача та цільову норму внесення на ділянці, після чого регулює швидкість потоку рідкого добрива через сервоклапан на основі інформації від витратоміра, датчика швидкості та ширини захвату аплікатора.

Незважаючи на комерційну доступність VRT-систем, залишаються питання щодо їх продуктивності. До них належать нерівномірний розподіл добрив форсунками та недостатнє досягнення заданої норми внесення. Деякі аспекти просторово-змінного керування добривами описані у

дослідженні [16], де автори зазначають, що динаміка машини впливає на продуктивність аплікатора, а застосування командного керування з передбаченням дозволяє покращити точність. В роботі [17] оцінювалася точність внесення добрив із змінною нормою: автори використали матрицю лотків для збору матеріалу від розкидача і розрахували варіабельність розподілу. Виявлено, що з обертовими розкидачами існувала змінність норми, а коефіцієнт варіації перевищував 23% для поперечного середнього розподілу при нормах 60,0 та 170,0 кг/га. Досліджували продуктивність наземного аплікатора при сталих і змінних нормах внесення, встановивши, що система забезпечує точність із відхиленням $\pm 2,24\%$ від запланованої норми. В іншому дослідженні [20] оцінювалася точність рідких добрив VRA на полі: середні похибки внесення 32% розчину КАС і рідкого амонійного фосфату 10-32-0 становили 2,3% та 5,2% у першому тесті та 2,76% і 5,6% у другому.

Мета поточного дослідження полягає у визначенні рівномірності внесення рідких добрив між рядками та точності норми внесення при використанні технології VRT.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Аплікатор із змінною нормою внесення добрив

Для проведення нашого дослідження було обрано систему управління обприскувачем Field-IQ. Ця система включає дисплей FM-1000, інтегрований з DGPS, модуль управління процесом обприскування Field-IQ, автоматичний клапан регулювання діапазону, витратомір та насос. Обладнання підключено до розподільчих трубок, встановлених на рамі аплікатора для внесення рідких добрив.

Обраний аплікатор забезпечує внесення рідких добрив безпосередньо в ґрунт за допомогою дискових ножів, що формують борозни (Рис. 1). Ширина захвату агрегату складає 7,72 м, що відповідає 8 рядкам із міжряддям 96,5 см. Монітор FM-1000, оснащений програмним та апаратним забезпеченням, являє собою сучасну повнофункціональну систему управління технікою з вбудованим GPS-приймачем для точного землеробства. Вся інформація відображається на 30-сантиметровому кольоровому сенсорному РК-дисплеї. Крім того, FM-1000 підтримує сумісність із різноманітними пристроями для автоматизованого керування сільськогосподарською технікою.



Рис. 1 - Система керування виливом Field-IQ, встановлена на засобі для внесення рідких добрив, та дисплей FM-1000 в кабіні

2.2 Методика збору даних

Після встановлення системи контролю внесення було проведено вимірювання витрат рідини по кожному рядку. Метою було оцінити точність подачі рідких добрив системою при заданій швидкості потоку, яка відображалась на дисплеї FM-1000. Для цього оператор встановлював тестову швидкість, змодельовану як рух агрегату зі швидкістю 11,3 км/год.

Під час експерименту застосовували такі норми внесення: 34, 67, 101, 135 та 168 кг/га (що відповідає 40, 50, 80, 110 та 140 фунтам/га). Кожну норму внесення випадковим чином повторювали тричі. Для спрощення збору зразків стоків у кожному рядку від'єднували виливні трубки, розташовані за дисковими сошниками. Рідина зі знімних трубок збирали у пластикові контейнери (Рис. 2).

Під час кожного повторного відбору зразків аплікатор налаштовували на випадкову швидкість внесення, активували і підтримували у стабільному робочому режимі протягом 180 секунд. Після цього рідину з кожного рядка збирали протягом 60 секунд як один зразок стоків. Таким чином, під час одного повторного відбору отримували по одному зразку від кожного з восьми рядків, тобто загалом вісім зразків за один цикл. Усього в дослідженні було відібрано 120 зразків, що охоплювали п'ять різних норм внесення та тричі повторювалися.

Після збору зразки стоків зважували за допомогою ваг HD-150, а об'єми визначали на основі маси та щільності рідини, використовуючи відповідне рівняння:

$$\text{Об'єм} = \text{Маса} / \text{Щільність} \quad (1)$$

У цьому дослідженні як робочий розчин застосовували воду з водопроводу для імітації 32% рідкого добрива КАС. Розчин КАС

представляє собою форму азотного добрива, до складу якого входять сечовина та аміачна селітра. Цей вид добрива широко використовується багатьма сільськогосподарськими виробниками. У літрі 32%-го розчину КАС міститься 425 грамів азоту.



Рис. 2 – Збір витoku з виливної трубки для визначення швидкості потоку

Під час визначення обробленої площі враховували робочу швидкість, ширину захвату та тривалість відбору зразків. Об'єм розливої рідини разом із концентрацією азоту у розчині КАС 32% застосовували для обчислення загальної кількості елемента, внесеного протягом часу відбору. Далі фактичну дозу внесення, визначену шляхом ділення повного обсягу азоту на площу обробки, порівнювали з нормативним значенням, показаним на дисплеї FM1000. Це дозволяло оцінити точність виконання встановленої норми системою керування. Для аналізу рівномірності розподілу рідини по всій ширині захвату здійснювали розрахунок витрати на кожному окремому рядку.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунку 3 представлені результати оцінювання однорідності для всіх встановлених норм внесення. Кожну норму досліджували тричі, щоб отримати три повторні вимірювання. Обсяг стоків у цих повтореннях усереднювали для кожного ряду окремо, після чого середнє значення по 8 рядах використовували як орієнтир для розрахунку відхилень, показаних на рисунку 3. Відхилення наведені у відсотках як похибки відносно середніх значень усіх рядів при заданій нормі внесення.

Максимальне відхилення від базової норми об'єму стоків серед рядів досягало 10,1% і було зафіксоване у першому ряду при нормі 34 кг/га. Загалом, ряди, розташовані в центральній частині ширини захвату (ряди 3, 4 і 5), продемонстрували меншу мінливість, ніж крайні ряди по обох боках.

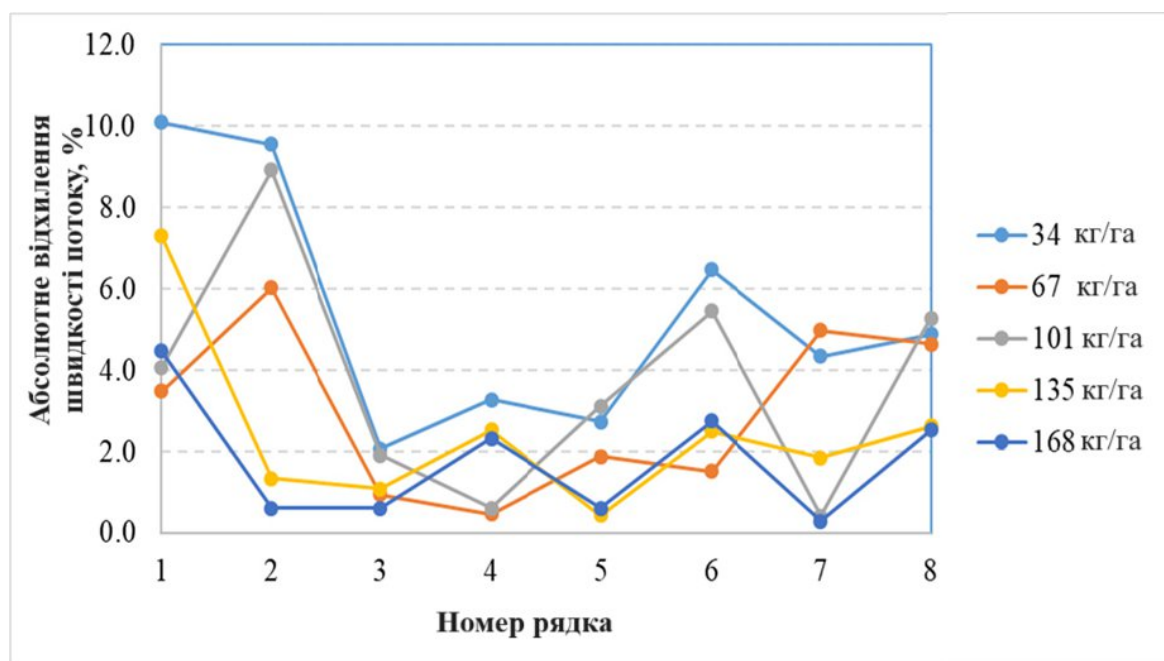


Рис. 3 - Абсолютне значення відхилення швидкості потоку для кожного рядка при всіх нормах внесення

На Рисунку 4 показано, як змінюється абсолютна варіація залежно від

рівня внесення. Спостерігається закономірність: зі зростанням норми внесення коливання швидкості потоку зменшуються. Це свідчить про те, що підвищення величини норми дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл внесеного матеріалу.

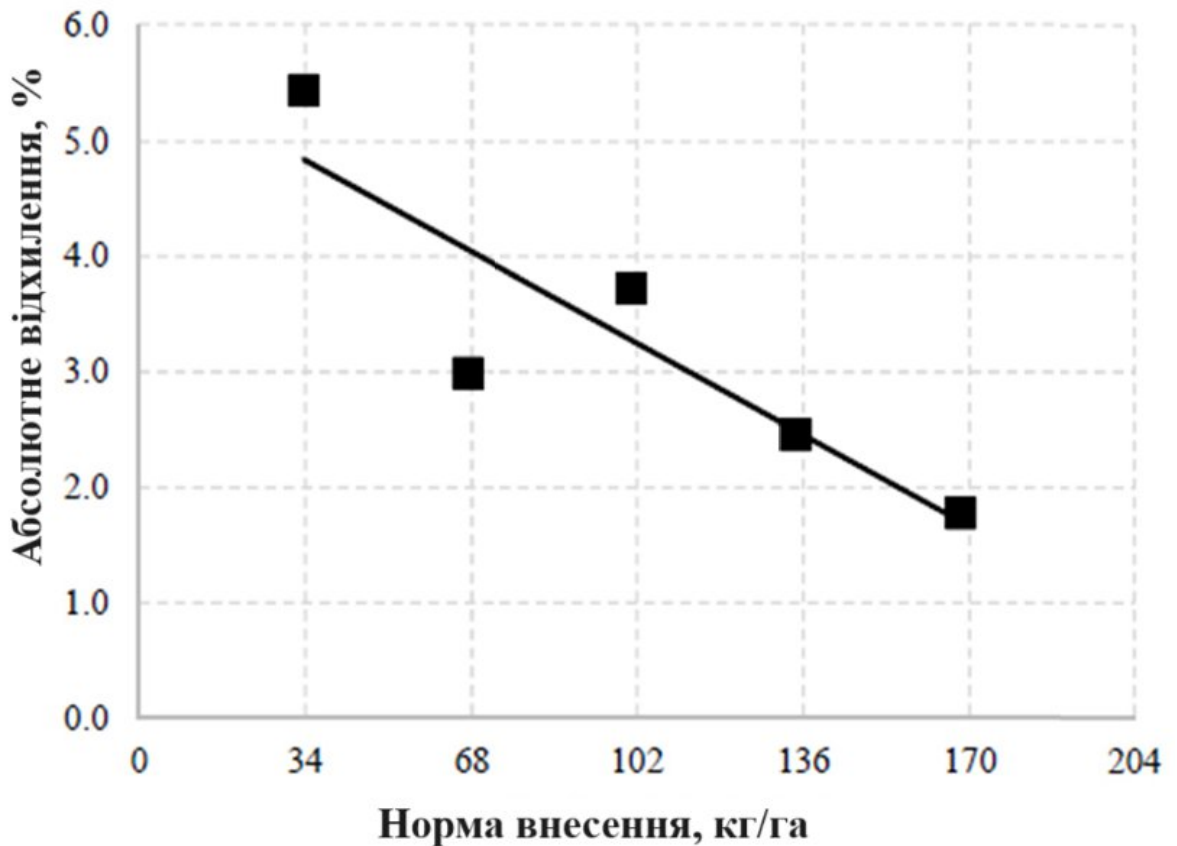


Рис. 4 – Демонстрація того, що при збільшенні норми внесення зменшується зміна швидкості потоку

Сумарні об'єми, вилиті в шести рядах, були підраховані на основі заданої норми внесення, тоді як для визначення фактичного рівня внесення використовувалася загальна кількість стоків. На рисунку 5 представлені виміряні показники норми внесення поряд із значеннями, встановленими через дисплей FM-1000. Мінімальна абсолютна похибка досягала 1,3 % при внесенні 34 кг/га, а максимальна – 6,5 % спостерігалася для норм 67 кг/га та 168 кг/га. Середнє значення абсолютної похибки становило 3,76 %. За винятком випадку з 135 кг/га,

фактичні показники внесення виявилися нижчими за встановлені значення (табл. 1). Ймовірною причиною цього є часткові втрати стікаючого розчину під час процесу внесення.

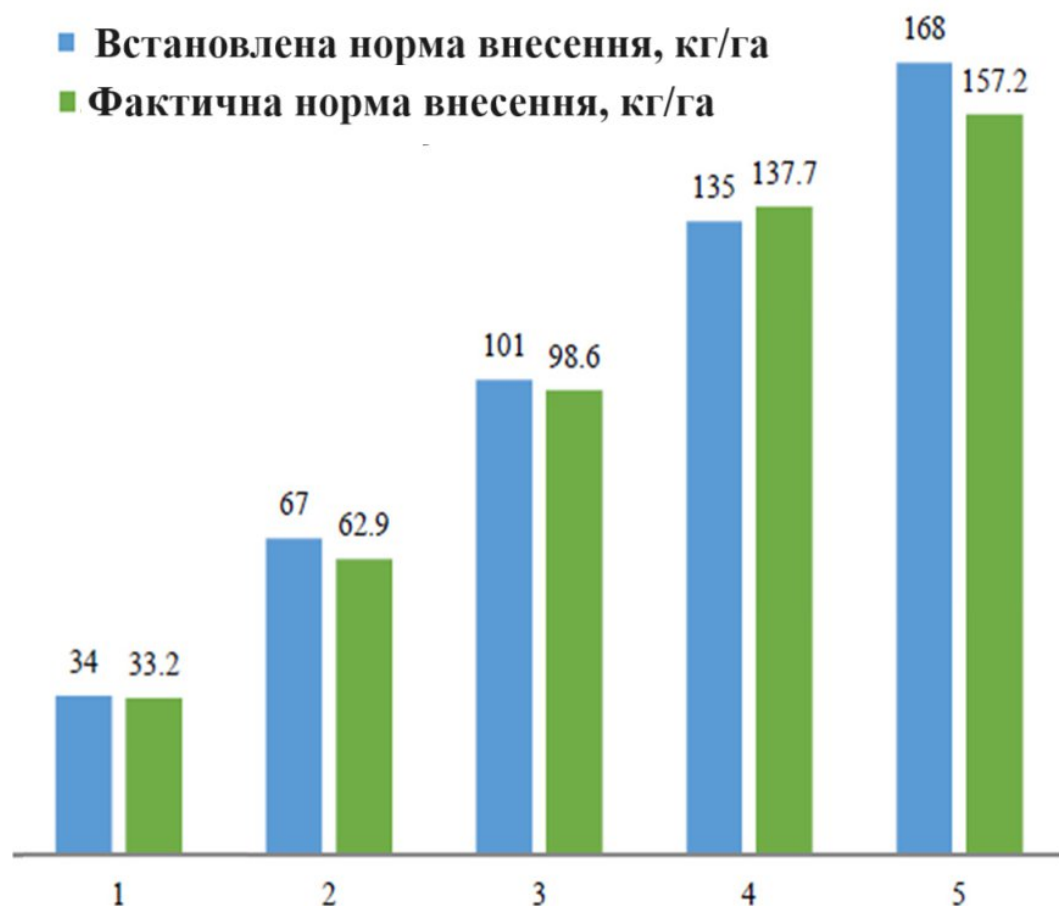


Рис. 5 - Порівняння заданої на дисплеї FM1000 норми внесення з фактично отриманою під час тесту нормою внесення

Таблиця 1 – Показники точності внесення системою керування
ВИЛИВОМ

Встановлена норма внесення, кг/га	Ідеальна швидкість потоку, л/хв	Фактична швидкість потоку, л/хв	Фактична норма внесення, кг/га	Похибка норми внесення, %
34	1,44	1,42	33,2	-1,3
67	2,87	2,69	62,9	-6,5
101	4,31	4,21	98,6	-2,2
135	5,75	5,88	137,7	2,3
168	7,18	6,71	157,2	-6,5

Оптимальна швидкість подачі розчину та середнє значення реальної

швидкості потоку при встановленій нормі внесення наведені у таблиці 1. Аналіз варіацій (ANOVA) для швидкості потоку проводили із застосуванням програмного пакета SAS. Отримані результати показують, що статистично значущих відмінностей між фактичними та оптимальними параметрами не виявлено ($p > 0,8686$).

ВИСНОВКИ

Аплікатор рідких добрив, оснащений системою управління обприскувачем Field-IQ, проходив випробування на рівномірність розподілу та точність встановленої норми внесення. Машина мала вісім робочих рядів із загальною шириною захвату 7,7 м. Для внесення рідких добрив у кожен ряд застосовувався ніж, закріплений на сошнику. Регулювання норми здійснювалося шляхом зміни швидкості потоку рідини в кожному ряду.

Під час тестування використовували водопровідну воду як замітник стічних вод для імітації 32% розчину азотних добрив КАС. Проби стоків з кожного ряду відбирали при нормах внесення 34, 67, 101, 135 та 168 кг/га. Зразки зважували та проводили аналіз маси, що дозволяло оцінити рівномірність нанесення та точність встановленої норми.

Результати свідчать, що ряди в центральній частині агрегату демонстрували менші коливання швидкості потоку порівняно з крайніми рядами. Рівномірність розподілу добрив збільшувалася зі зростанням норми внесення. Абсолютна похибка застосування складала від 1,3% до 6,5%, середнє значення становило 3,76%. Значущої різниці між обраними та фактичними нормах внесення не виявлено.

При плануванні карт внесення або розробці зон управління у точному землеробстві слід враховувати уніфікованість та точність роботи обладнання VRT. Високороздільні карти для керування точністю не матимуть сенсу, якщо техніка не здатна досягати подібного рівня точності. Аплікатор зі змінною нормою, який досліджувався в цьому експерименті, успішно застосовувався в дослідженнях змінної норми внесення азоту протягом кількох років. У цілому, ця система контролю забезпечує необхідну точність внесення, достатню для поставлених наукових завдань.

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. Hou, Z.; Yang, H. Effects of soil fertilization periods and methods on the growth and fruiting of fruit trees. *Pract. Rural Technol.* 2019, 11, 48.
4. Liu, J.; Li, H.; Hao, B.; Qu, Z.; Han, L. Effects of different fertilization treatments on apple fruit quality and fruit tree growth. *Shaanxi Agric. Sci.* 2021, 67, 48–51
5. Du, J. Effect of Organic Fertilizer Substitution for Chemical Fertilizer and the Level of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Regulation on Apple Production. Master's Thesis, Shandong Agricultural University, Shanghai, China, 2022.
6. Toraman, M.C. Effects of Leaf Surface Energy on Pesticidal Performance. *Tarim Bilim. Derg.* 2019, 25, 174–180.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkiewicz, A.; Pecyna, A.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. Фактори, які впливають на прибуткове вирощування гібридів кукурудзи [Електронний ресурс] // Seed Ukraine. – 2020. – Режим доступу

до ресурсу: <https://seed-ua.com/ua/factory-yaki-vplyvayut-na-prybutkove-vyroshhuvannya-gibrydiv-kukurudzy/>.

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. Легкодух І. Автоматизовані системи контролю якості сівби для просапних сівалок [Електронний ресурс] / І. Легкодух, Н. Легкодух // *Агросеа*. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://agrosea.com.ua/UKRNIPVT_POGORILOGO/.

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. 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.

14. Правильний посів: основні фактори, що впливають на врожайність під час сівби польових культур. [Електронний ресурс] // *AgroDay*. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroday.com.ua/2019/05/14/pravylnyj-posiv-osnovni-factory-shho-vplyvayut-na-vrozhajnist-pid-chas-sivby-polovyyh-kultur/>.

15. 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.

16. Wang, X. Analysis of the results of a trial of organic fertilizer replacing some chemical fertilizers in potatoes. *Mod. Agric.* 2021, 01, 56–57.

17. Wang, S.; Li, L.; Wu., D.; Liu, F.; Zhang, P. Experimental study on the effect of replacing chemical fertilizers with equal-nutrient commercial organic fertilizers. *Mod. Agric. Sci. Technol.* 2020, 12, 199–200.

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. Alameen, A.A.; Al-Gaadi, K.A.; Tola, E.K. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 160, 31–39.

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. Heiß, A., Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2020. Modelling and Simulation of a Fuzzy System for Site-Specific Nitrogen Fertilization. In: *Proceedings of the 21st IFAC World Congress (virtual)*, July 12–17, Berlin, Germany (in press).

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.* P. 163.

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>.