

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 диференційованого внесення мінеральних добрив»

Виконав:

(підпис)

Артем БЛИЗНЮК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2401-2м

Науковий керівник:

(підпис)

Михайло ШУЛЯК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

ТАРЕЛЬНИК

(підпис)

В'ячеслав

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Близнюк Артем Олександрович

Дослідження впливу елементів систем точного землеробства на показники якості внесення мінеральних 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 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 2 таблиці, 10 рисунків, додатків 2, 26 літературних джерел.

У цьому документі детально представлено результати польових випробувань, метою яких було всебічне оцінювання роботи відцентрового розкидача мінеральних добрив Vicon RS-EDW у контексті його застосування в технологіях точного землеробства. Дослідження спрямовувалися на визначення точності дозування, рівномірності розподілу та загальної придатності машини для роботи в умовах змінних норм внесення. Під час проведення динамічного калібрування було встановлено наявність суттєвої та систематичної різниці між фактичними дозами, що вносилися лівим і правим дисками. Відхилення становило близько 20%, що є значним показником для обладнання такого типу.

Подальші випробування свідчать, що після внесення змін розкидач продемонстрував хороші показники однорідності поперечного розподілу добрив. Це залишалось справедливим за різних робочих швидкостей руху, а також за різних позицій агрегату в технологічному пакеті, що вказує на стабільність роботи машини в реальних польових умовах. Проведений аналіз кривої поперечного розподілу для 18% суперфосфатного добрива показав, що

ефективна робоча ширина агрегату становить 28 метрів при коефіцієнті варіації 15%, що відповідає прийнятним агротехнічним вимогам.

Поздовжні випробування, проведені в наближених до експериментальних умов роботи, засвідчили, що час реакції машини — або затримка до фактичного початку внесення добрив — становить у межах 6–7 секунд. Це важливий показник для систем змінної норми внесення, де точне дотримання траєкторії та моменту подачі є критичними. Аналіз фактичної щільності внесення на різних ділянках поля продемонстрував, що реальний рівень внесення перебуває у межах 74–90% від заданої норми для кожної конкретної точки. Такі значення пояснюються як технічними особливостями машини, так і фізичними властивостями добрив.

Загалом отримані результати дозволяють зробити висновок, що після технічного доопрацювання та коригувань у роботі електроприводів відцентровий розкидач Vicon RS-EDW може бути надійно використаний для диференційованого внесення мінеральних добрив у польових умовах.

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

ABSTRACT

Blyznyuk Artem Oleksandrovych

Study of the influence of elements of precision farming systems on the quality indicators of mineral fertilizer application.

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 2 tables, 10 figures, 2 appendices, 26 literary sources.

This document presents in detail the results of field tests, the purpose of which was a comprehensive assessment of the operation of the Vicon RS-EDW centrifugal mineral fertilizer spreader in the context of its application in precision farming technologies. The research was aimed at determining the accuracy of dosing, uniformity of distribution and the general suitability of the machine for operation in conditions of variable application rates. During dynamic calibration, a significant and systematic difference was found between the actual doses applied by the left and right discs. The deviation was about 20%, which is a significant indicator for equipment of this type.

Further tests show that after the changes, the spreader demonstrated good indicators of the uniformity of the lateral distribution of fertilizers. This remained true at different operating speeds, as well as at different positions of the unit in the technological package, which indicates the stability of the machine's operation in real field conditions. The analysis of the lateral distribution curve for 18% superphosphate fertilizer showed that the effective working width of the unit is 28 meters with a coefficient of variation of 15%, which meets acceptable agrotechnical requirements.

Longitudinal tests, carried out under conditions close to experimental operating conditions, showed that the reaction time of the machine - or the delay until the actual start of fertilizer application - is within 6-7 seconds. This is an important indicator for variable rate systems, where precise adherence to the trajectory and feed moment are critical. Analysis of the actual application density in different parts of the field showed that the real application rate is within 74–90% of the set rate for each specific point. Such values are explained by both the technical features of the machine and the physical properties of the fertilizers.

In general, the results obtained allow us to conclude that after technical refinement and adjustments to the operation of the electric drives, the Vicon RS-EDW centrifugal spreader can be reliably used for differentiated application of mineral fertilizers in field conditions.

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

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1 Стан питання і задачі досліджень.....	10
1.1 Основні етапи диференційованого внесення добрив.....	10
1.2 Агротехнічні вимоги до внесення гранульованих мінеральних добрив.....	19
1.3 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм.....	23
Розділ 2 Матеріали і методи досліджень.....	30
Розділ 3 Аналіз результатів польового дослідження	36
Висновки.....	41
Список використаних джерел.....	42

ВСТУП

1. Актуальність теми

У сучасних умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва питання підвищення ефективності використання мінеральних добрив набуває особливої актуальності. Застосування технологій точного землеробства дозволяє оптимізувати норми внесення добрив, зменшити втрати поживних речовин та підвищити якість і стабільність врожаю. Водночас технічні засоби, що використовуються для диференційованого внесення добрив, потребують детальної оцінки щодо точності дозування, рівномірності розподілу та стабільності роботи в польових умовах. Вибір і вдосконалення систем точного землеробства є важливим завданням як для агроінженерії, так і для забезпечення стійкого розвитку сільського господарства.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

У наукових джерелах розглядаються різні аспекти диференційованого внесення добрив: від агрономічних підходів до технічних характеристик розкидачів. Дослідження показують, що існують певні технічні обмеження та неточності у роботі відцентрових розкидачів, зокрема щодо рівномірності поперечного розподілу добрив та реакції обладнання на зміни робочої швидкості. Проте комплексних польових випробувань, що б оцінювали одночасно точність дозування, однорідність розподілу та придатність для систем змінної норми внесення, проведено недостатньо. Таким чином, виникає наукова прогалина, яка потребує подальшого дослідження.

3. Мета дослідження

Метою роботи є всебічне оцінювання ефективності відцентрового розкидача мінеральних добрив Vicon RS-EDW при застосуванні у технологіях точного землеробства, зокрема щодо точності дозування, рівномірності розподілу та придатності до роботи в умовах змінних норм внесення.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес внесення мінеральних добрив у польових умовах із застосуванням систем точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є робочі характеристики відцентрового розкидача Vicon RS-EDW: точність дозування, однорідність поперечного розподілу та час реакції машини при змінних нормах внесення.

6. Завдання дослідження

Для досягнення мети роботи було поставлено наступні завдання:

1. Проаналізувати основні етапи диференційованого внесення добрив та агрономічні аспекти мінерального живлення рослин.
2. Провести огляд існуючих методів внесення добрив за технологіями змінних норм.
3. Розробити та реалізувати методику польових випробувань розкидача Vicon RS-EDW.
4. Проаналізувати результати поперечного та поздовжнього розподілу добрив, оцінити однорідність та точність внесення. Визначити ефективну робочу ширину агрегату та оцінити його придатність для систем змінної норми внесення.

7. Методи дослідження

У роботі використано комплекс методів: польові експерименти з динамічним калібруванням розкидача, статистичний аналіз результатів, побудова кривих поперечного розподілу та оцінка коефіцієнтів варіації внесення.

8. Структура та обсяг роботи

Магістерська робота складається зі вступу, двох основних розділів, розділу з аналізом результатів польового дослідження та висновків. Робота містить 2 таблиці, 10 рисунків, 2 додатки та 26 джерел літератури. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 44 сторінки.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Основні етапи диференційованого внесення добрив

Добрива є ключовим інструментом для підвищення врожайності сільськогосподарських культур, забезпечення раціонального використання елементів живлення та зниження негативного впливу на екосистеми. Проте традиційний спосіб однакового внесення добрив по всьому полю часто спричиняє недостатнє засвоєння поживних компонентів, погіршення стану ґрунтів і посилення екологічних проблем, серед яких — міграція нітратів у ґрунтові води та збільшення викидів парникових газів. Технологія диференційованого або точного внесення добрив допомагає мінімізувати ці ризики завдяки адаптації виду, дозування та часу внесення під конкретні особливості кожної ділянки. Використання сучасних технічних рішень дає змогу доставляти поживні речовини саме в ті частини поля, де вони найнеобхідніші, підвищуючи продуктивність агровиробництва та зменшуючи непродуктивні втрати й негативний вплив на довкілля. У даній роботі розкриваються основні етапи впровадження змінних норм внесення добрив, зокрема аналіз стану поля, збір інформації, складання карт-завдань, використання систем змінної норми внесення (VRA), а також подальший моніторинг ефективності після збирання врожаю.

Початковий етап — це комплексна оцінка особливостей території та отримання відповідних даних, спрямованих на визначення неоднорідності в межах агровиробничих площ. Фактори, що впливають на нерівномірність потреб у поживних речовинах, включають відмінності у фізико-хімічних властивостях ґрунту, вміст гумусу, реакцію середовища, вологозабезпеченість, а також продуктивність культур у попередні роки. Для цього застосовують аналіз ґрунтових зразків, технології дистанційного зондування, моніторинг урожайності та діагностику стану рослин. Особливо цінними є аерознімання

дроном та дані супутникових сенсорів, здатних виявляти проблемні ділянки шляхом аналізу спектральних характеристик рослинного покриву. Лабораторні результати відбору проб ґрунту надають точну інформацію про наявність елементів живлення, що дозволяє виділити окремі зони управління. На основі всіх зібраних даних формуються науково обґрунтовані рішення для подальших технологічних операцій.

Створення цифрових карт властивостей ґрунту (DSM) виступає важливим елементом сучасного планування в землеробстві, територіального менеджменту й охорони природних ресурсів. Такі карти розробляються шляхом використання статистичних методів і геоінформаційних технологій, що дають змогу трансформувати точкові дані аналізу у просторово неперервні прогнози властивостей ґрунту. Цей підхід забезпечує вищу точність порівняно з традиційними картами, відкриваючи можливість оцінювати стан ґрунтів у зонах, де відбір проб не проводився. У даному дослідженні наведено концептуальну схему створення DSM на основі поєднання результатів польових спостережень, лабораторних вимірів та інноваційних прогнозних алгоритмів. Процес включає чотири основні фази: збір вихідної інформації, її попередню підготовку, моделювання та перевірку правильності результатів для формування високоточних карт, необхідних для сталого використання земельних ресурсів.

Першим кроком у формуванні DSM є збирання репрезентативних проб ґрунту. Такі зразки отримують методом систематичного або стратифікованого випадкового відбору з метою відобразити просторову варіабельність ґрунтових характеристик у різних рельєфно-кліматичних умовах. Після відбору їх направляють до лабораторії для визначення ключових параметрів: кислотності, структурного складу, рівня органічного вуглецю та вмісту поживних речовин. Цей інформаційний масив стає базою для побудови ефективних моделей прогнозування. Для розширення покриття території

використовують додаткові дані, наприклад цифрові моделі рельєфу, супутникові знімки та метеорологічні показники, що дозволяє встановити зв'язки між природними умовами та властивостями ґрунтового покриву.

Попередня підготовка інформації відіграє ключову роль для досягнення високої якості, узгодженості та придатності даних для подальшого використання. На цьому етапі зазвичай здійснюють виявлення і виправлення неточностей у вибірці, усунення аномальних значень, а також масштабування або нормування параметрів. Для просторової оцінки ґрунтових характеристик у територіях, де відсутні вимірювання, нерідко застосовують різні методи інтерполяції: крігінг, інверсне зважування відстаней (IDW), кокрігінг та інші підходи статистичного прогнозування. Сучасні алгоритми машинного навчання, включно з випадковими лісами, моделями на основі опорних векторів (SVM) й штучними нейромережами, активно використовують для опису складних і нелінійних залежностей між властивостями ґрунту та екологічними змінними, що дозволяє підвищити якість прогнозів.

Після етапу побудови моделей виконують їх валідацію з використанням незалежних польових зразків або технік перехресної перевірки, що дозволяє встановити рівень достовірності отриманих результатів. Для оцінювання надійності моделювання широко застосовують такі числові показники, як середньоквадратична похибка (RMSE), коефіцієнт детермінації (R^2) і середня абсолютна похибка (MAE). Якщо моделі демонструють хорошу якість прогнозування, отримані результати перетворюють у неперервні просторові карти властивостей ґрунту. Програмні засоби геоінформаційних систем (ГІС) забезпечують можливість наочного подання, глибокого аналізу та ефективного поширення даних DSM, дозволяючи працювати з просторовою інформацією на різних масштабних рівнях.

Готові цифрові карти ґрунту відкривають значні можливості для оптимізації прийняття рішень у сільському господарстві: диференційоване

внесення добрив, точне управління водними ресурсами та підтримка технологій точного землеробства. Окрім аграрної сфери, вони виступають цінним ресурсом у плануванні землекористування, охороні довкілля й управлінні лісовими екосистемами. Отримана інформація допомагає прогнозувати процеси деградації ґрунтів, контролювати їхній стан і впроваджувати екологічно відповідні заходи. Також DSM може підтримувати урядові рішення, пропонуючи деталізовану просторову картину ризиків ерозії та інших негативних змін ґрунтового покриву, що сприяє впровадженню спрямованих стратегій його збереження.

Разом з тим, створення цифрових моделей ґрунтів пов'язане з низкою труднощів. Зокрема, вагомими перешкодами є значні витрати ресурсів та часу на польові обстеження, необхідність доступу до високоточної допоміжної інформації, а також невизначеність прогнозних результатів. Очікується, що вдосконалення засобів дистанційного зондування, включаючи гіперспектральні супутникові системи й радарні дані SAR, забезпечить підвищення точності DSM завдяки отриманню якісних просторових коваріант. Важливо також заохочувати участь фермерів і локальних громад у зборі інформації, що сприятиме підвищенню актуальності картографічної продукції для практичного використання.

Підсумовуючи, створення цифрових карт ґрунтового покриву на основі польових вимірювань є інноваційним способом дослідження просторової мінливості ґрунтів і поліпшення системи управління земельними ресурсами. Поєднання традиційних даних аналізу ґрунту з методами дистанційного зондування та обчислювального моделювання формує точну, актуальну й корисну інформаційну основу для прийняття рішень. Подальші дослідження мають приділяти увагу посиленню точності моделей, розширенню доступу до якісних даних високої роздільної здатності та подоланню практичних бар'єрів масштабування DSM. Зі швидким розвитком технологій штучного інтелекту

та геопросторових інструментів цифрові карти ґрунтів стають усе більш важливими для відповідального та ефективного використання родючих земель на планеті.

Наступна фаза — створення карт-завдань, — трансформує результати польових вимірювань у конкретні схеми внесення добрив. Завдяки використанню інструментів геоінформаційного аналізу та професійних програмних рішень агровиробники отримують можливість формувати картографічні матеріали, що відображають оптимальний вид і дозу поживних речовин для кожної окремої ділянки полів. Подібні карти будуються на широкому наборі інформації: рівнях мінерального забезпечення ґрунту, потенціалі культури щодо споживання елементів і прогнозах розвитку рослин. На цьому кроці ключовим стає правильний баланс елементів живлення, щоб кожна територія отримувала необхідну кількість основних макроелементів (азоту, фосфору, калію) та важливих мікроелементів (бору, цинку та інших). Додатково враховуються фази формування врожаю, регіональні погодні фактори, а також очікувані кількісні показники збирання врожаю. Точне коригування норм внесення дає змогу досягнути максимальної ефективності використання добрив і мінімізувати ймовірність дефіциту або надлишку поживних речовин, що, у свою чергу, сприяє охороні довкілля.

Нецільове або надмірне застосування добрив нерідко провокує зниження родючості, деградацію ґрунтових ресурсів та економічні втрати. Карти-завдання для внесення мінеральних сумішей стають важливим рішенням зазначених проблем, оскільки забезпечують індивідуальні рекомендації, побудовані з урахуванням властивостей землі та особливостей вирощуваної культури. Такий інструмент зміцнює зв'язок між технологіями точного землеробства та традиційними методами, дозволяючи одночасно підвищувати обсяг продукції й зменшувати екологічне навантаження.

Карти з рекомендаціями — це програмно-аналітичні матеріали, що містять відомості про агрохімічний склад ґрунту, характеристики культур та їхню реакцію на забезпечення поживними речовинами в різні періоди розвитку. Дані для розроблення цих карт зазвичай походять із лабораторних аналізів, метеорологічних джерел і визначених показників цільової врожайності. Така деталізація необхідна, адже інтенсивність засвоєння елементів залежить від морфологічних властивостей рослин, етапу вегетації та природних умов. Використовуючи картографічні рекомендації, аграрії уникають ситуацій перевнесення добрив, яке може спричинити вимивання нутрієнтів у річки й водойми та стимулювати розвиток евтрофікації, а також зменшують обсяги викидів парникових газів, зокрема закису азоту.

Процес підготовки рецептних карт включає низку процедур — від детального дослідження ґрунтів до аналізу показників рН, рівня органічної речовини і концентрацій основних елементів живлення. Для отримання достовірних характеристик застосовуються сучасні методи агрохімічної діагностики. Поряд із ґрунтовими параметрами враховують і бажаний рівень продуктивності. Сільськогосподарські культури, орієнтовані на високі врожаї, потребують більшого обсягу елементів, що відображається у рецептурній карті, аби уникнути нераціонального використання добрив.

Також картографічні моделі обов'язково беруть до уваги кліматичну специфіку території. Особливості опадів, температурні коливання та сезонні зміни впливають на рух поживних речовин у агроєкосистемі. Тому рекомендації на картах адаптуються відповідно до періодів посіву та погодних умов, забезпечуючи своєчасне надходження елементів живлення до рослин і сприяючи підвищенню економічної ефективності їхнього використання.

У практичному застосуванні карти-завдання забезпечують низку технологічних переваг. Вони полегшують аграріям процес ухвалення рішень, пропонуючи чіткі рекомендації щодо необхідної кількості, виду та термінів

внесення добрив, включаючи основне удобрення й підживлення. Такий підхід мінімізує використання інтуїтивних методів та посилює орієнтацію на науково обґрунтовані рішення, що є надзвичайно корисним для малих фермерських господарств, які не завжди мають фаховий агрономічний супровід. Крім того, технологію створення та використання карт можна поєднати з мобільними застосунками або онлайн-платформами, забезпечуючи ще зручніший доступ до актуальних рекомендацій.

З економічної позиції застосування карт із заданими нормами внесення дає змогу підвищити економічну ефективність аграрного виробництва шляхом раціонального управління витратами на ресурси. Забезпечуючи культуру лише тими поживними елементами, які дійсно є необхідними, агровиробники зменшують зайві фінансові витрати й підвищують загальну віддачу вкладених коштів. Додатково рослини, що отримують живлення у відповідності до потреб окремих ділянок поля, зазвичай характеризуються покращеними показниками росту, більшою стійкістю до патогенів та здатністю формувати підвищені врожаї. Це позитивно впливає не лише на продовольчу безпеку, а й на довготривалу життєздатність аграрного сектору, оскільки раціональне внесення мінеральних елементів сприяє підтриманню здорового ґрунтового середовища.

Екологічні здобутки, що супроводжують використання карт диференційованого внесення добрив, є надзвичайно суттєвими. Кероване дозування поживних речовин знижує ризик їх надмірного вимивання та значно обмежує забруднення водою різного типу. Такі підходи повністю узгоджуються із сучасною світовою стратегією переходу до екологічно безпечного землеробства і мінімізації негативного впливу аграрної діяльності на екосистеми. Крім того, точне й виважене використання добрив сприяє скороченню викидів шкідливих газів у атмосферу, що є важливим аспектом адаптації до змін клімату. Особливо це стосується азотовмісних речовин, які є

джерелом утворення закису азоту — одного з факторів глобального потепління. Таким чином, рецептурні карти допомагають агроекономіці стати більш вуглецево ощадною.

Разом із перевагами існують і певні бар'єри для повсюдного впровадження систем диференційованого внесення. Серед основних труднощів – потреба у регулярному лабораторному аналізі ґрунтів, що потребує додаткових фінансових витрат господарств. Окрім того, малі ферми у країнах, що розвиваються, інколи не мають доступу до сучасних діагностичних лабораторій або стикаються з нестачею відповідних фахових знань щодо інтерпретації результатів. У таких умовах важливою є підтримка держави та дорадчих організацій, які можуть частково компенсувати витрати на агрохімічні дослідження і забезпечувати навчання використанню цифрових інструментів для коригування норм внесення.

Отже, технологія застосування карт індивідуальних доз добрив є вагомим кроком уперед у напрямку екологічно відповідального й економічно вигідного землеробства. Використання комплексних даних про стан рослин, властивості ґрунтів та зовнішні чинники дозволяє аграріям отримувати аргументовані рішення щодо дозування кожного елемента живлення. Це веде до підвищення продуктивності полів, зменшення шкоди довкіллю і кращої економічної стабільності аграрних підприємств. Проте для максимального поширення таких інновацій потрібні додаткові зусилля у напрямку розширення доступу до аналітичних сервісів, популяризації точного землеробства та інтеграції рецептурних карт у цифрові агроплатформи. За умов належної державної підтримки та розвитку сервісного забезпечення вони можуть стати ключовим елементом сучасного виробництва, забезпечуючи баланс між природоохоронними вимогами та прибутковістю.

Третя фаза, що називається технологією змінної норми (VRA), полягає у використанні розроблених карт на сучасних технічних засобах. Застосування

VRA гарантує автоматичне регулювання обсягів внесення добрив під час руху машини полем у режимі реального часу. Для цього необхідна синхронізація систем супутникового позиціонування з технікою, здатною працювати за принципами точного землеробства — сівалками, розкидачами, обприскувачами. Обладнання автоматично змінює дозування відповідно до особливостей конкретної зони поля, забезпечуючи кожен ділянку оптимальним рівнем живлення, який сприяє повноцінному розвитку культур. Сучасні системи працюють як на основі датчиків, що зчитують показники біомаси або стан рослинного покриву, так і за попередньо створеними картами диференціації. У результаті підвищується ефективність використання мінеральних речовин і зменшуються екологічні втрати, що пов'язані з надлишковим внесенням добрив.

Четверта стадія, яка передбачає нагляд і коригувальні дії протягом усього сезону, забезпечує своєчасне надходження поживних елементів до рослин у період їх активного росту. Використання сучасних рішень для контролю стану посівів — зокрема, безпілотників, супутникових знімків і різноманітних сенсорів, розміщених безпосередньо на полі — дає можливість господарям оперативно аналізувати стан культур, виявляти нестачу корисних речовин або будь-які ознаки стресу рослин. Непередбачувані погодні явища, серед яких тривалі зливи чи посуха, можуть змінювати рівень доступності поживних компонентів, змушуючи агровиробників здійснювати адаптивні коригування норм внесення добрив у середині вегетаційного періоду. Спираючись на отриману інформацію, можливо впроваджувати виправні дії, наприклад, листкове живлення або додаткове підживлення, що допомагає зберігати високий рівень розвитку посівів. Динамічна система спостереження сприяє своєчасному реагуванню на зміни стану поля, збільшуючи потенціал врожайності та зменшуючи ризики втрат поживних речовин через їх вимивання або стік.

П'ятий, завершальний етап — аналіз результатів після збору врожаю — відіграє надзвичайно важливу роль у впровадженні покращених підходів до удобрення у подальших роках. Дані з агрохімічного обстеження ґрунту разом із фактичними показниками урожайності дозволяють з'ясувати рівень ефективності використаних добрив, а також визначити ділянки, де відмічено їх брак або надлишок. Порівнюючи отримані показники продуктивності зі спроектованими, аграрії можуть оцінити результативність сформованої тактики живлення та встановити можливі напрями вдосконалення. Здобута інформація стає основою для уточнення рекомендацій та розроблення нових рецептів удобрення наступного сезону, що забезпечує безперервне підвищення якості управлінських рішень. Додатково виробники мають можливість оцінити фінансову складову застосованих методів, оптимізуючи витрати на добрива з метою забезпечення стабільного прибутку.

Отже, технологія внесення добрив із змінною нормою є продуманим, структурованим підходом до управління живленням рослин, який враховує просторову неоднорідність полів і сезонні зміни. Система складається з п'яти фундаментальних фаз: початковий аналіз поля та збір інформації, підготовка карт-завдань, виконання диференційованого внесення, регулярний моніторинг стану посівів під час росту та підсумкова оцінка після жнив. Завдяки застосуванню цієї технології аграрії здатні підвищити продуктивність культур, зменшити невиправдані втрати добрив і скоротити негативний вплив на природне середовище. У міру розвитку інновацій у сфері точного землеробства диференційоване удобрення ставатиме ще важливішим інструментом забезпечення сталого розвитку сільського господарства, сприяючи одночасно економічним перевагам та збереженню екологічного балансу.

1.2 Агротехнічні вимоги до внесення гранульованих мінеральних добрив

Використання гранульованих мінеральних добрив є одним з ключових агротехнічних заходів, що спрямований на забезпечення рослин збалансованим живленням, підтримання родючості та відтворення родючого стану ґрунтового середовища, а також підвищення врожайної продуктивності сільськогосподарських культур. Проте для досягнення бажаного ефекту необхідно дотримуватися комплексу регламентованих вимог агротехніки, у яких враховуються специфічні властивості ґрунтів, біологічні особливості культур, кліматичні чинники, часові рамки внесення та способи розподілення добрив у ґрунтовому горизонті. У даній роботі представлено основні правила, технологічні підходи та практичні рекомендації, що забезпечують результативне й екологічно відповідальне застосування гранульованих мінеральних добрив у сучасному землеробстві.

Кожна культура характеризується індивідуальними потребами щодо кількості та форми живильних речовин на різних етапах свого розвитку. До складу гранульованих добрив зазвичай входять необхідні рослинам макроелементи: азот (N), фосфор (P), калій (K), які можуть бути доповнені корисними мікроелементами — цинком, бором, залізом та іншими. Грамотний добір мінерального складу добрив дає можливість повністю забезпечити культуру потрібним живленням. Важливою передумовою цього є проведення аналізу ґрунтів, що дозволяє визначити фактичний вміст поживних елементів, виявити їх дефіцит чи надлишок і забезпечити правильне коригування живлення. Водночас рівень кислотності ґрунту значною мірою впливає на доступність елементів живлення, оскільки, наприклад, фосфор змінює свою рухомість та засвоюваність у дуже кислих або лужних середовищах, що необхідно враховувати при виборі добрив.

Правильно визначені строки внесення добрив є вирішальним фактором для ефективного використання елементів живлення рослинами та формування високої продуктивності культур. Для досягнення найкращого результату поживні речовини мають бути доступними саме в ті фази росту, коли попит на них є максимальним. Так, азот зазвичай необхідний на початкових етапах вегетації, оскільки стимулює ріст листової поверхні та розвиток надземної маси, у той час як фосфор і калій особливо важливі під час формування генеративних органів — цвітіння, утворення плодів і насіння. Гранули добрив можуть бути внесені до сівби (основне удобрення), під час активного росту культури (підживлення) або покровоко у кілька прийомів, що знижує ризики втрат поживних речовин та збільшує коефіцієнт їх засвоєння рослинами.

Технологія внесення гранульованих добрив визначає рівень їхнього поглинання рослинами та ступінь впливу на довкілля. Серед найпоширеніших методів можна виділити поверхневе розкидання, локальне смугове внесення та прицільне розміщення у кореневій зоні. Розподіл добрив по поверхні поля до або після сівби підходить для культур зі значно розгалуженою кореневою системою, але за відсутності загортання існує загроза їх втрати через випаровування чи змивання. Розміщення у вигляді смуг поблизу насіння або коренів підвищує доступність елементів і скорочує небажані втрати. Точкове внесення або технології, подібні до фертигації, дають можливість максимально точно транспортувати поживні речовини безпосередньо до кореневої системи. Інтеграція добрив у ґрунтову масу за допомогою оранки чи боронування забезпечує їх краще утримання та збільшує ефективність.

При плануванні системи внесення мінеральних речовин необхідно приділяти увагу екологічним аспектам та мінімізувати можливий негативний вплив на природні екосистеми. Зокрема, формулювання на основі азоту можуть піддаватися вимиванню у глибші горизонти або втрачатися в атмосфері у вигляді парникових газів — таких як оксид азоту. Потрапляння

фосфору із сільськогосподарських угідь до водойм спричиняє їх евтрофікацію, надмірне розмноження водоростей та зниження кількості розчиненого кисню. Тому необхідно уникати внесення добрив у періоди інтенсивних опадів або тривалої посухи, дотримуватися правил управління водним режимом культур, застосовувати буферні захисні смуги навколо водойм і використовувати добрива зі сповільненим або керованим вивільненням, що сприяє зменшенню екологічних ризиків.

Застосування технологій точного землеробства дає можливість досягти коректних доз внесення та забезпечити рівномірне поширення гранульованих добрив на полях. Машини для розподілу добрив необхідно періодично перевіряти та налаштовувати, щоб гарантувати подачу потрібного обсягу поживних елементів. Це дозволяє уникати ситуацій, коли рослини отримують занадто багато або замало живлення, що негативно позначається на їх стані, розвитку та підсумковій урожайності. Сучасні інновації, наприклад обладнання з GPS-керуванням та системи диференційованого внесення (VRA), допомагають цілеспрямовано вносити добрива на конкретні зони поля, враховуючи природну неоднорідність ґрунтового середовища та реально наявні потреби вирощуваних культур. Такі елементи інтелектуального агровиробництва сприяють більш ефективному використанню поживних речовин, скороченню фінансових витрат та зменшенню негативного навантаження на екосистеми.

Правильні умови зберігання та поводження з гранульованими добривами є ключовим чинником для підтримання їх високої якості, а також для мінімізації ризиків виникнення аварійних ситуацій. Добрива потрібно утримувати в сухих складських приміщеннях з належною вентиляцією, що дозволяє уникнути надмірного зволоження, грудкування та зниження рівномірності розподілу під час внесення в поле. Окремі види добрив можуть містити потенційно шкідливі компоненти, тому під час роботи з ними важливо

дотримуватися заходів безпеки, аби запобігти негативному впливу на здоров'я людей. Використання індивідуальних засобів захисту, таких як спеціальні рукавички чи захисні маски, є обов'язковою умовою безпечної експлуатації обладнання, яке повинно функціонувати відповідно до встановлених правил. Також слід не допускати змішування різних форм добрив у місцях зберігання, щоб зберегти їхню хімічну стабільність і запобігти небажаним реакціям, які можуть вплинути на результативність удобрення.

Задля розвитку стійкого виробництва продовольства доцільно поєднувати гранульовані мінеральні добрива з органічними матеріалами, сидератами та іншими засобами поліпшення ґрунтових характеристик. Подібний підхід, який називають комплексним або інтегрованим управлінням поживними речовинами (INM), сприяє зміцненню родючості ґрунту, підвищує рівень доступності необхідних елементів живлення та скорочує залежність аграріїв від великої кількості хімічних продуктів. Концепція INM також включає застосування сівозмін, використання покривних культур, збереження ґрунтової структури, що поступово підвищує ґрунтове здоров'я та забезпечує стабільні врожаї у довготривалій перспективі. Крім того, систематичний аналіз стану ґрунту й результатів вирощування за допомогою лабораторних досліджень дозволяє своєчасно коригувати агротехнічні заходи щодо внесення добрив, досягаючи максимальної продуктивності.

У підсумку слід підкреслити, що раціональне застосування гранульованих мінеральних добрив передбачає глибоке розуміння фізіологічних процесів у рослин, знання властивостей ґрунтів, оцінку екологічних чинників та використання сучасного обладнання. Виконання комплексу вимог, що включають правильний вибір добрив, оптимальний момент для внесення, застосування відповідних методик, а також широке впровадження інструментів точного землеробства, забезпечує отримання високих урожаїв при одночасному зменшенні ризиків для довкілля. Інтеграція

таких підходів у систему сталого управління поживними речовинами дозволяє аграрним господарствам підтримувати стабільну продуктивність без порушення функціонування природних екосистем і виснаження ґрунтових ресурсів.

1.3 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм

Запровадження технологій точного землеробства суттєво трансформувало традиційні аграрні підходи, забезпечивши раціональніше, результативніше та екологічно спрямоване використання доступних ресурсів. Серед ключових інновацій варто виокремити застосування технології змінних норм внесення добрив (VRT), яка перетворилась на провідний інструмент для оптимізації забезпечення культур поживними елементами відповідно до просторових і часових відмінностей у межах поля. У цій анотації подано розгорнутий огляд наукових праць, що стосуються практичного використання VRT у сфері управління добривами, із фокусом на її економічні, агроекологічні та продуктивні переваги.

Аналіз ефективності змінних норм внесення поживних речовин став особливо актуальним на тлі зростаючої потреби в технологіях точного землеробства. Суть VRT полягає в здатності аграріїв диференціювати кількість внесених добрив у різних ділянках поля, що дозволяє адаптувати живлення рослин до відмінностей властивостей ґрунтів, потреб культури та впливу довкілля. У дослідженні акцент робиться на тому, як використання VRT позначається на точності дозування добрив, враховуючи такі важливі показники, як рівномірність розподілу елементів живлення, зміна врожайності, підвищення ефективності ресурсів та покращення екологічних параметрів господарювання. Отримані висновки демонструють, наскільки цей підхід

здатний зменшити втрати, підвищити результативність застосовуваних добрив і компенсувати просторову неоднорідність посівних площ.

Звичні методики внесення добрив часто передбачають однакове дозування на весь оброблюваний масив, виходячи з припущення про однорідність ґрунтового середовища. Насправді ж відмінності у складі ґрунтів, рельєфі, зволоженні й темпах розвитку рослин спричиняють різний попит на поживні речовини. Надмірне внесення у певних зонах сприяє екологічним ризикам, серед яких забруднення вод та деградація землі, тоді як дефіцит добрив на інших ділянках негативно впливає на урожай. Застосування VRT дозволяє подолати ці проблеми завдяки використанню просторової аналітики, отриманої з GPS-навігації, ґрунтових досліджень, сенсорів урожайності та інших цифрових інструментів. Ці дані використовуються для створення карт варіабельності та автоматичного керування технікою з урахуванням конкретних координат, що забезпечує підвищення точності агротехнічних операцій.

У дослідження включено матеріали практичних експериментів, наукової літератури та польових випробувань, де порівнювали господарства з використанням VRT та поля, оброблювані за принципом рівномірних норм. Отримані результати доводять суттєве покращення точності внесення поживних речовин у разі застосування VRT, що призводить до підвищення врожайної продуктивності. Рослини отримують необхідні елементи саме там і тоді, коли вони найбільш потрібні, що мінімізує як дефіцит, так і перенасичення добривами. Крім того, оптимізація термінів та дозування сприяє кращому поєднанню живлення зі стадіями росту культур і погодними умовами. Підсумовуючи, фермери отримують можливість збільшити урожайність із одночасним скороченням витрат на добрива, що позитивно впливає на економічну віддачу та екологічну стійкість агровиробництва.

Поряд з фінансовими перевагами, екологічний результат застосування VRT є одним із центральних напрямів аналізу. Технологія високоточного внесення агрохімікатів дозволяє значно скоротити втрати азоту через вимивання, зменшити потрапляння фосфатів у водойми та знизити рівень викидів газів, що спричиняють парниковий ефект. Усе це сприяє розвитку більш екологічно стабільних та відповідальних підходів до землекористування. Завдяки точному поданню поживних елементів безпосередньо в ті зони поля, де вони дійсно потрібні, зменшується небезпека негативного впливу на довкілля, зберігається родючість ґрунтів та їхнє біологічне здоров'я. Такий аспект стає особливо значущим, оскільки сучасному агросектору необхідно знаходити гармонію між максимальним виробництвом продуктів харчування та охороною природи. Проведений аналіз свідчить, що хоча VRT здатна забезпечити помітний прогрес у точності внесення добрив, результативність впровадження визначається низкою умов, зокрема якістю просторової інформації, правильним налаштуванням техніки, професійністю оператора та функціоналом програмних систем.

Одним із найважливіших викликів, описаних у дослідженні, є суттєві стартові витрати на закупівлю обладнання для VRT разом із складністю технічного обслуговування та управління. Для фермерів із невеликою площею угідь або виробників у країнах з економікою, що розвивається, такий фінансовий бар'єр може залишатися надто високим і, відповідно, стримувати масове впровадження інноваційних технологій. Крім того, ефективна робота систем змінних норм внесення залежить від достовірності агроданих: неточності під час збору або оцінки просторової інформації можуть призвести до втрати потенційних вигід і нераціонального дозування добрив. Саме тому автори підкреслюють необхідність організації якісної підготовки аграріїв, які переходять на VRT, щоб вони могли отримати максимальну віддачу від інвестицій у цифрові технології та застосовувати їх без помилок.

Узагальнюючи, можна сказати, що технологія змінних норм внесення поживних речовин відіграє значну роль у підвищенні точності агротехнічних операцій, покращенні врожайності культур, зменшенні негативних наслідків для екосистем і підсиленні економічної ефективності виробництва. Проте успішна інтеграція VRT у практику потребує вирішення фінансових, технічних і організаційних бар'єрів, які все ще залишаються актуальними. У міру розвитку інтелектуального землеробства очікується, що популярність VRT збільшуватиметься завдяки удосконаленню сенсорних систем, цифрових платформ і методів аналізу Big Data. Подальші наукові роботи повинні бути орієнтовані на створення дешевших технологічних рішень та покращення узгодженості даних із різних джерел. Це забезпечить можливість для всіх категорій виробників—from малих господарств до великих агрокомпаній—використовувати переваги цієї передової системи. Досягнуті результати підтверджують, що VRT є одним із ключових чинників еволюції агропромислового комплексу у напрямі сталості, ресурсозбереження та підвищення продуктивності в умовах XXI століття.

Наукові праці свідчать, що VRT дозволяє проводити дозування добрив на окремих ділянках з урахуванням неоднорідності властивостей ґрунту, відмінностей між зонами потенційної урожайності, а також потреб конкретних сільськогосподарських культур. На відміну від методики уніфікованої норми внесення (URA), застосування VRT базується на геопросторовій інформації, зібраній за допомогою датчиків, безпілотних літальних апаратів або супутникової зйомки, що дає можливість ідентифікувати локальні дефіцити чи надлишки елементів живлення. У цьому процесі вагоме значення мають такі інструменти, як картографія врожайності, дистанційне зондування, високоточні GPS-навігаційні системи та сучасні прилади для відбору ґрунтових зразків. Завдяки такому технічному супроводу стає можливим отримання детальних карт стану поля та уникнення необґрунтованих втрат

добрив. Низка дослідників наголошує, що правильне використання VRT не лише підвищує урожайність, а й скорочує обсяги витрат на добрива та зменшує вплив сільського господарства на довкілля, запобігаючи надмірному стіканню та вимиванню нітратів.

З економічної точки зору впровадження систем змінних норм внесення демонструє досить перспективні результати. Значна частина публікацій вказує на можливість скорочення витрат на агрохімікати, особливо на азот, фосфор і калій, що зазвичай використовуються у великих кількостях. Крім того, підвищення рівня врожайності завдяки оптимізації використання ресурсів сприяє збільшенню чистого прибутку. Водночас кінцевий рівень рентабельності залежить від різних змінних: виду вирощуваної культури, площі вирощування, вихідної неоднорідності ґрунтів, ціни технологічного обладнання та масштабу господарства. Найбільше економічних переваг зазвичай отримують великі виробники, де спрацьовує ефект масштабу, тоді як власникам малих ферм може знадобитися довший період для повернення вкладених коштів. Деякі автори також акцентують на труднощах адаптації та необхідності кваліфікованої технічної підтримки. Якість інформації та професійні навички користувачів залишаються визначальними факторами успішного переходу на високоточне внесення добрив.

З позиції охорони довкілля проведені дослідження акцентують увагу на здатності технології VRT зменшувати шкідливі наслідки традиційного, однорідного внесення добрив. Скорочення невиправдано високих доз азоту знижує ймовірність забруднення підземних вод і скорочує утворення парникових газів, що виникають при виділенні закису азоту. Точне та просторово диференційоване удобрення запобігає надмірному накопиченню фосфору в зонах з низькою реакційною здатністю, що, своєю чергою, мінімізує загрозу евтрофікації водойм. Довготривалі спостереження підтверджують, що регулярне використання VRT упродовж декількох циклів вирощування

позитивно впливає на стан ґрунтів, оскільки сприяє рівномірному розподілу поживних елементів у межах поля, формуючи підґрунтя для екологічно орієнтованого землеробства. Водночас окремі наукові роботи застерігають, що потенційні екологічні переваги можуть нівелюватися помилками у налаштуванні техніки, ненадійною інформацією або запізнілою реакцією на зміну умов у полі.

З точки зору агрономії, технологія VRT є важливим інструментом оптимізації живлення культур, дозволяючи враховувати індивідуальні потреби рослин на різних ділянках. Результати польових експериментів засвідчують підвищення урожайності у багатьох випадках застосування цієї технології, особливо на територіях із суттєвою неоднорідністю елементів живлення. Можливість точно реагувати на внутрішньопольову варіабельність забезпечує належне постачання поживних речовин зонам із високим потенціалом продуктивності, уникаючи перевитрат у менш перспективних частинах. Такий диференційований спосіб управління повністю відповідає ключовій концепції точного землеробства — «правильний ресурс, у належному місці та оптимальний момент». Проте не кожен експеримент демонструє значний приріст урожайності, особливо на господарствах із відносно рівномірними властивостями ґрунтів. У подібних ситуаціях основний позитивний ефект VRT полягає швидше у зниженні витрат і захисті довкілля, ніж у зростанні обсягів виробництва.

Багато наукових праць наголошують на перспективності поєднання змінних норм внесення з новітніми цифровими технологіями — машинним навчанням (ML), штучним інтелектом (AI), аналітикою великих даних. Такі інструменти допомагають формувати точніші прогностичні моделі забезпечення рослин елементами живлення та дозволяють вносити коригування в режимі поточного моніторингу. Використання сенсорів, здатних безперервно реєструвати інформацію про фізіологічний стан культур, рівень

вологи й забезпечення макроелементами, стає ключовим чинником максимально ефективного функціонування VRT. Крім того, цифрові інформаційні системи, що накопичують та інтерпретують польові дані, роблять технологію доступнішою та зручнішою для аграріїв. Із подальшим розвитком техніки очікується ще більша автономність систем змінного внесення та їх ширше впровадження в різних кліматичних і виробничих умовах.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що аналіз сучасних досліджень підтверджує: диференційоване внесення добрив здатне забезпечити значні вигоди — підвищення результативності вирощування, раціональне використання коштів і мінімізацію негативного впливу сільського господарства на навколишнє середовище. Водночас підсумковий ефект VRT обумовлений низкою критичних чинників, серед яких якісні дані, особливості ґрунтових ресурсів, рівень кваліфікації фермера та економічні витрати на обладнання. Очевидно, що для максимальної віддачі потрібне вдосконалення управління інформацією та точності обладнання. Подальші наукові роботи мають бути спрямовані на покращення алгоритмів VRT, збільшення можливостей оперативного збору даних та забезпечення рівних шансів на застосування технології як великими господарствами, так і малими виробниками. Завдяки інноваціям і ширшому використанню інтелектуальних систем технологія змінного внесення здатна трансформувати аграрний сектор, роблячи його суттєво стійкішим, продуктивнішим і технологічно досконалим.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У період 2024–2025 років земельна ділянка площею шість гектарів була включена до практичного впровадження елементів точного землеробства, що мало на меті перевірити результативність використання технологій змінних норм внесення мінеральних добрив (див. рис. 1). Восени кожного сезону експериментальні площі забезпечувалися живленням у вигляді суперфосфату 19%, причому застосовувався диференційований підхід, який враховував кількісний вміст фосфатів (P_2O_5) у ґрунтовому шарі під кінець вегетаційного розвитку культур (орієнтовно травень–червень). Основною ціллю таких агротехнічних робіт передбачалося поетапне підвищення концентрації P_2O_5 у землі до цільового значення близько 100 мг/кг.

Для того щоб досягнути бажаного результату, здійснювалося внесення твердих мінеральних добрив зі змінною нормою за допомогою відцентрового розкидача Vicon RS-EDW. Конструктивно цей агрегат містить два робочі диски, що здійснюють обертання у протилежних напрямках, забезпечуючи рівномірне розподілення гранул по поверхні поля. Розкидач, обладнаний відцентровою системою подачі добрив, додатково включає інтегровану систему вагового контролю, до складу якої входять п'ять тензометричних датчиків, розміщених унизу бункера з добривами. Завдяки такому технічному рішенню пристрій має можливість кожні 0,5 секунди фіксувати зміну маси вмісту бункера, тобто відслідковувати коливання потоку добрив у режимі реального часу.

Отримані дані відіграють важливу роль у підтриманні потрібної норми внесення поживних речовин, оскільки вони забезпечують автоматичне коригування подачі відповідно до розрахункової залежності (1). У випадку, коли механізатор змінює швидкість руху машини, мікропроцесор оперативно

регулює ступінь відкриття дозувальних заслінок (див. рис. 2), що дозволяє стабілізувати рівномірність внесення добрив у різних умовах роботи агрегату.

$$D = \frac{q \cdot 600}{\vartheta \cdot \omega} \quad (1)$$

де: D - норма внесення фактична, кг/га; q - витрата добрив, кг/хв; ω - робоча ширина, м; ϑ - швидкість руху, км/год.

У ході проведеного дослідження застосовувалося таке технічне оснащення: трактор Massey-Ferguson 6130 потужністю 63 кВт; стандартний контролер Ferticontrol; система навігації Lightbar, приймач Garmin GPS/DGPS 16, а також комплекс FieldStar, призначений для впровадження технологій точного землеробства.

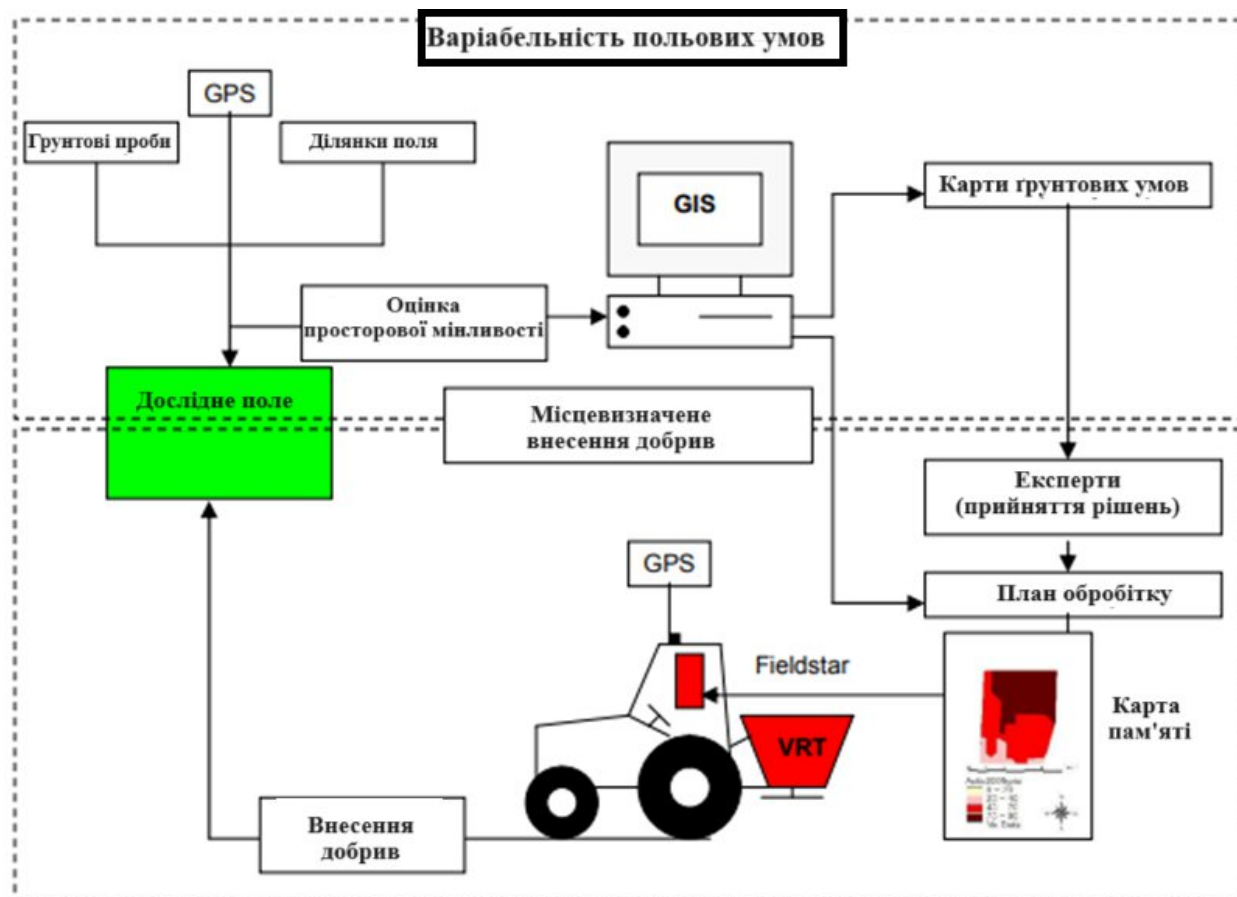


Рис. 1 - Схема експеримента

Карта-завдання зазвичай формується на основі аналізу інформації, отриманої з географічної інформаційної системи, із врахуванням різноманітних характеристик конкретного поля та встановлених взаємозв'язків між економічними обмеженнями і потенційною врожайністю культур. Після цього сформовану карту надсилають на VRT-контролер, який встановлений на консолі оператора для подальшого виконання завдань.

Внесення мінеральних добрив та вапняку із варіативними нормами часто не забезпечує очікуваного економічного чи екологічного ефекту. Серед основних перешкод сучасних підходів виділяють три ключові: висока вартість відбору та аналізу ґрунтових зразків, що призводить до створення карт із недостатньою деталізацією просторових характеристик; алгоритми рекомендацій, які відзначаються низькою точністю та спроектовані для крупномасштабного землеробства; а також обмежена ефективність сільськогосподарської техніки разом із її налаштуванням, що викликає розбіжності між фактично внесеною кількістю активних речовин та запланованою нормою.

Беручи до уваги останній недолік, перед початком польових випробувань було проведено чотириступеневе тестування центрифужного розкидача мінеральних добрив:

- на першому етапі, калібрувальному, застосовувалися спеціальні ємності для збору внесених добрив, що дозволяло оцінити продуктивність обох розподільних дисків. Це забезпечувало точне визначення кількості добрив, яку слід внести відповідно до обраної робочої швидкості (див. рис. 3).
- на другому етапі проводили оцінювання схеми розкидання та рівномірності розподілу по ширині захвату центрифужного розподільника, щоб встановити фактичну робочу ширину. Для цього уздовж траєкторії руху трактора розташовували набір приймачів

добрив у вигляді пластикових лотків, розташованих перпендикулярно напрямку руху. Розподілені добрива збирали, після чого визначали їхню масу, що дозволяло побудувати криву розподілу та розрахувати ефективну ширину захвату розкидача (рис. 4).

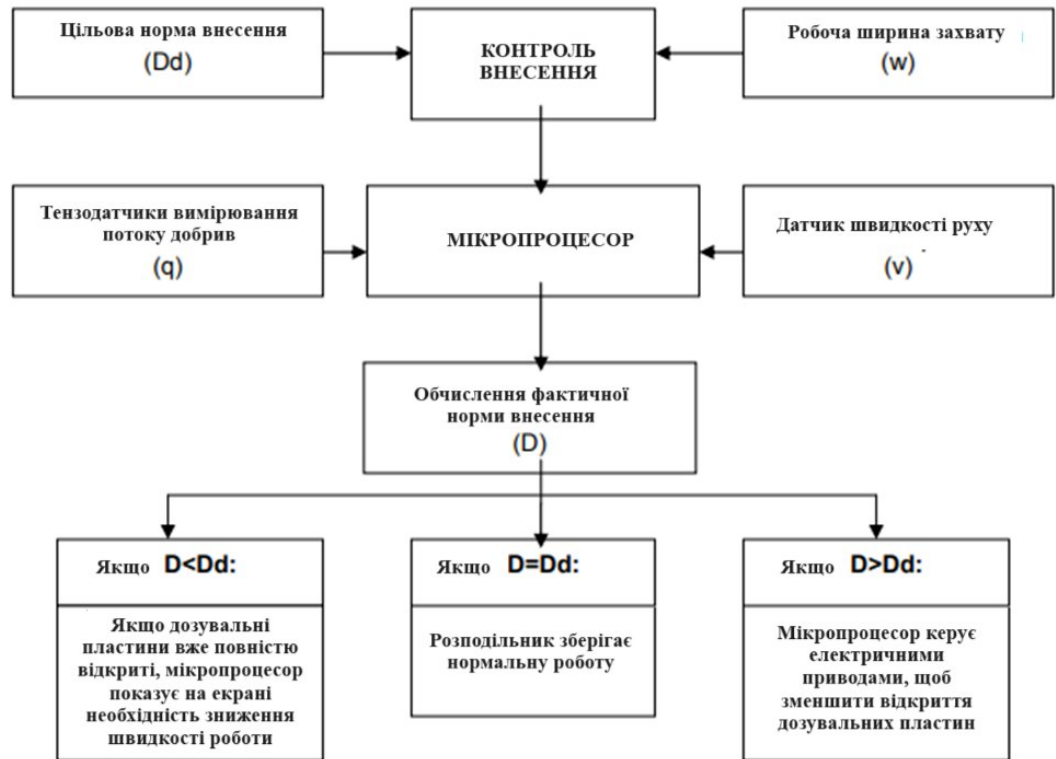


Рис. 2 - Схема керування



Рис. 3 - Польові тестування для калібрування відцентрового розкидача добрив Vicon RS-EDW

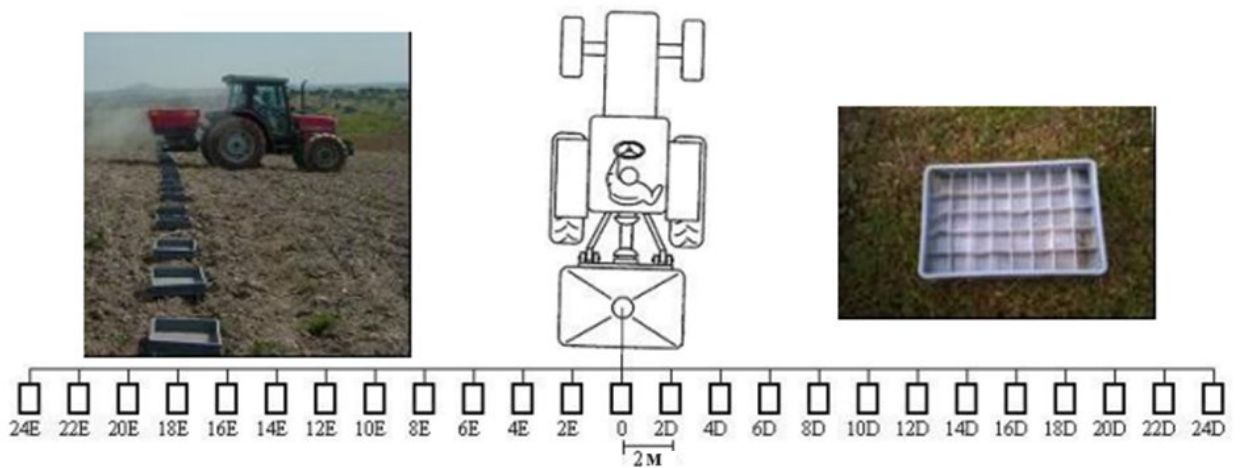


Рис. 4 - Полеві дослідження для оцінки рівномірності розподілу розкидача добрив Vicon RSEDW

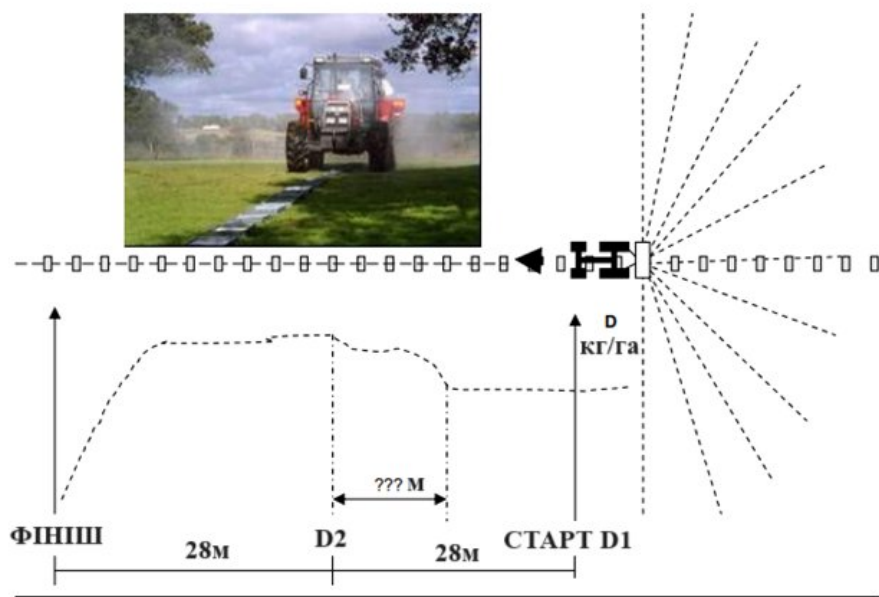


Рис. 5 - Схема досліджень для оцінки переходу при зміні норми внесення у розкидача Vicon RS-EDW

- на третьому етапі виконувалося розташування комплекту лотків вздовж лінії руху розкидача, що дозволяло визначити протяжність перехідної зони між ділянками з різними нормами внесення добрив (див. рис. 5);

- четвертий етап передбачав розміщення дванадцяти лотків для збору добрив уздовж траєкторії пересування розкидача на чотирьох окремих ділянках експериментального поля, що давало змогу контролювати виконання змінної норми внесення відповідно до карти фактичного розподілу добрив (див. рис. 6).

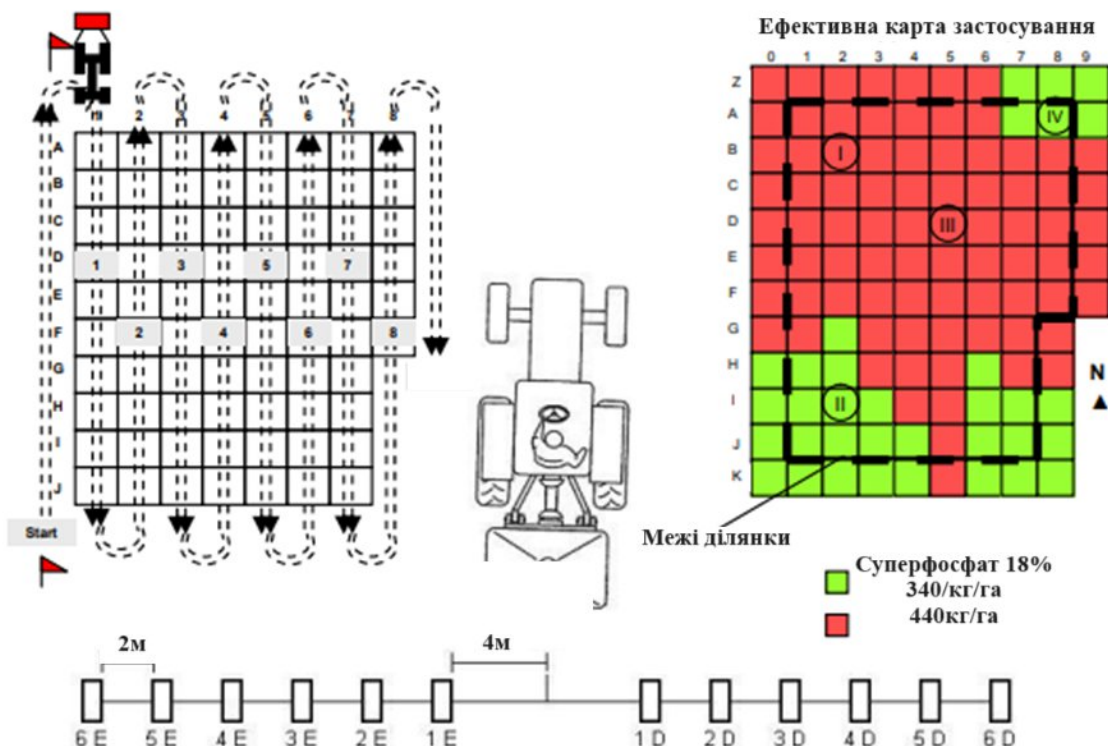


Рис. 6 – Схема дослідів для оцінки змінної норми відповідно до карти завдання

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОЛЬОВОГО ДОСЛІДУ

В табл. 1 відображено результати 5-ти калібрувальних тестів для обох розкидувальних дисків.

Таблиця 1- Результати калібрувальних випробувань (маса добрива в кг)

№ випробування	Лівий диск	Правий диск
1	22,20	17,35
2	14,85	13,10
3	18,50	13,85
4	16,55	12,10
5	24,50	21,60

Дані отримані від тестів динамічного калібрування виявили помітну та систематичну відмінність у роботі дозувальних дисків, причому для лівого диска вона виявилася більшою, ніж для правого. Різниця між встановленими нормами внесення складала від 12 до 27%, при цьому середнє значення досягало приблизно 20%. На рисунку 7 представлено порівняння роботи правої та лівої дозувальних пластин при трьох різних заданих нормах внесення. Для усунення цього розбіжності виробник здійснив корекцію електроприводів, як показано на рисунку 8. Рисунок 9 ілюструє результати польових випробувань, проведених для оцінки поперечного розподілу 18%-го суперфосфатного добрива, за яких досягнуто ефективної робочої ширини 28 м із коефіцієнтом варіації 15%. В конструкції цього розкидача обертання дисків назовні формує «пірамідальний» профіль поперечного розподілу, де максимальна концентрація добрива спостерігається безпосередньо за трактором, а бокові ділянки рівномірно зменшуються до центру колії. Подібні результати свідчать, що розкидач забезпечує досить рівномірне розподілення добрив, навіть за умов зміни швидкості руху та різних налаштувань агрегату.

Випробування поздовжнього розподілу у експериментальних умовах роботи, при швидкості руху від 7 до 8 км/год та використанні 18%-го суперфосфату, показали, що середня довжина переходу обладнання на нову норму внесення становить близько 14 м. Це відповідає часовій затримці системи приблизно 6–7 секунд, як відображено на рисунку 10.

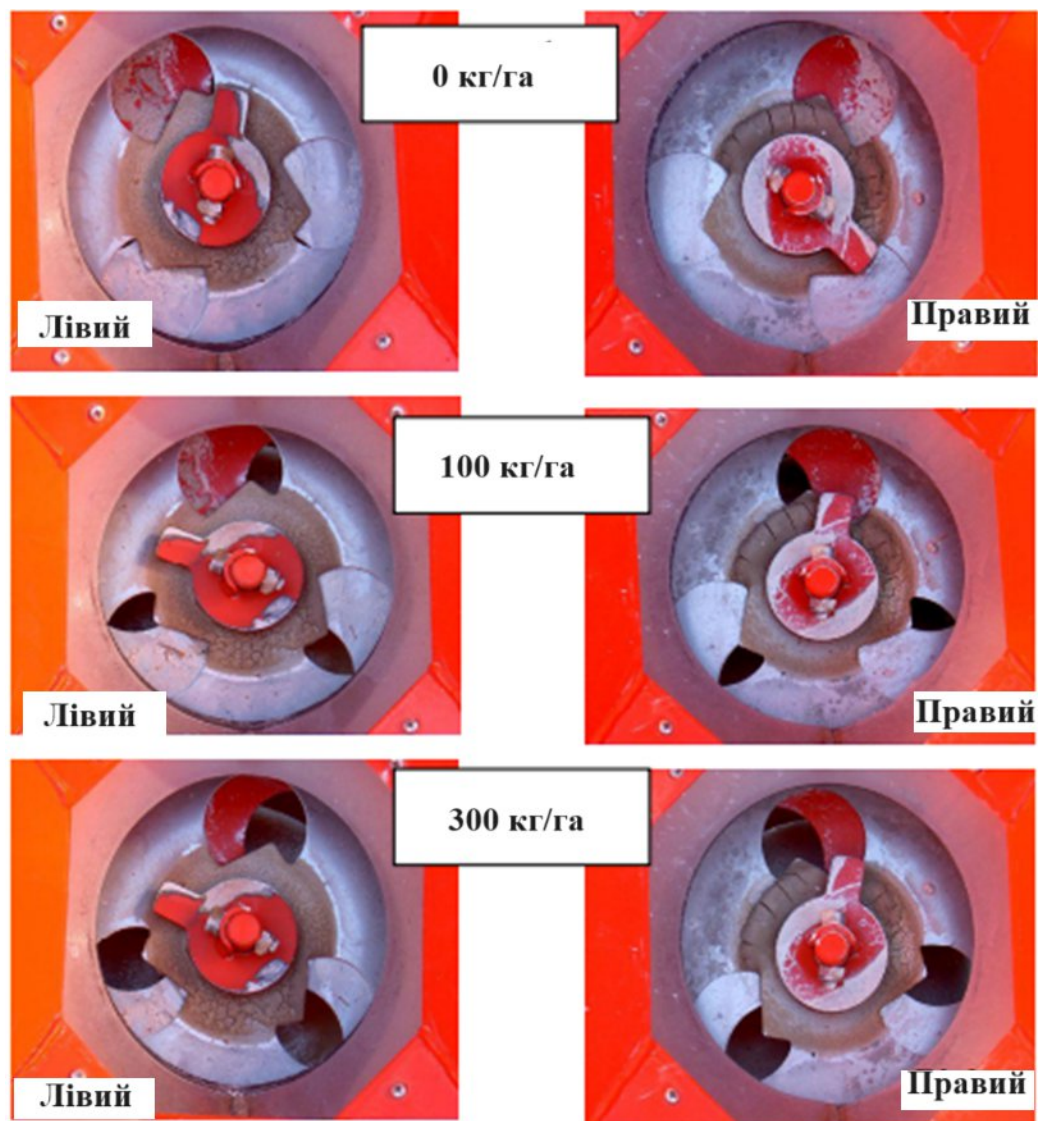


Рис. 7 - Права та ліва дозувальні пластини відповідно до трьох заданих норм внесення



Рис. 8 - Регулювання приводів

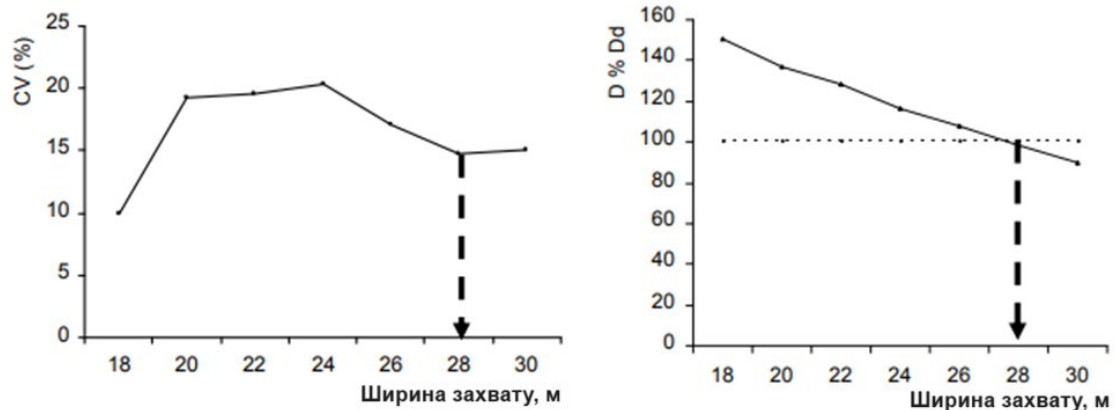


Рис. 9 - Результати польових тестувань для вибору робочої ширини на основі CV і співвідношення між фактичною (D) і бажаною нормою внесення (Dd)

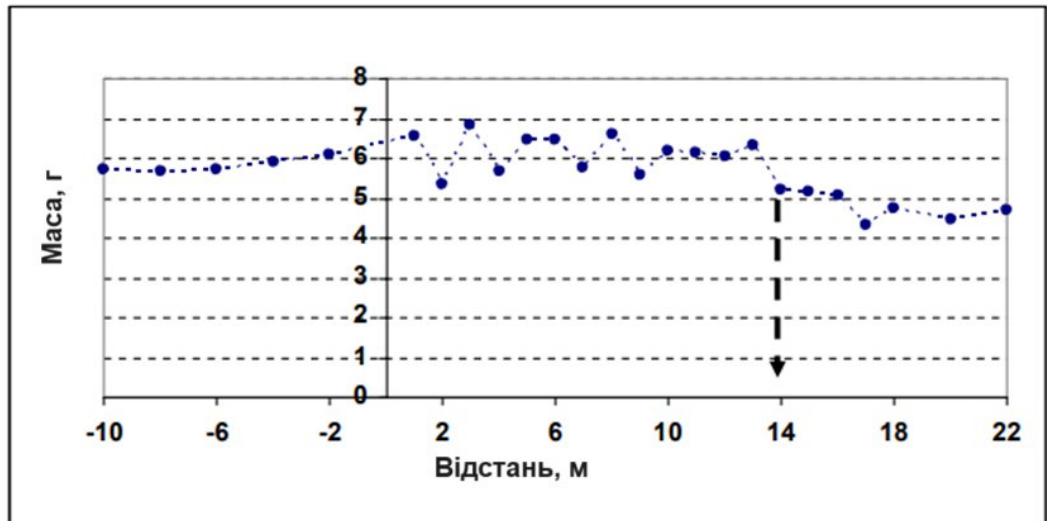


Рис. 10 - Середня відстань переходу обладнання для внесення на різні вимоги (робоча швидкість 7-8 км/год; 18% суперфосфатного добрива)

Таблиця 2 - Маса добрив, зібрана в 12 лотках з 4 квадратних ділянок на дослідному полі

Лотки	Місце відбору проб (встановлена норма Dd, кг/га)			
	1 (440)	2 (340)	3(440)	4 (340)
6E	10,12	6,79	9,00	5,48
5E	9,86	8,11	7,30	5,92
4E	10,61	5,35	8,42	8,03
3E	7,12	4,32	9,10	7,13
2E	5,70	7,61	7,96	7,13
1E	6,02	5,83	7,32	5,04
1D	5,64	5,06	6,51	5,96
2D	6,32	4,01	5,83	5,68
3D	5,54	3,56	3,73	5,59
4D	8,34	4,20	5,45	7,66
5D	7,49	3,60	4,25	6,17
6D	8,22	3,82	5,27	5,47
Середнє значення, г	7,58	5,19	6,68	6,27
Відхилення, г	1,85	1,58	1,80	0,97
CV (%)	24,36	30,51	26,95	15,46
Фактична норма D, кг/га	367,94	251,92	324,17	304,47
D (%Dd)	83,40	74,10	73,70	89,60

Для підтвердження того, що технологія змінних норм внесення реалізується відповідно до створеної фактичної карти-завдання, у польовому експерименті розмістили дванадцять спеціальних ємностей для відбору добрив

уздовж траєкторії руху розкидача. Контроль проводили на чотирьох окремих квадратно сформованих ділянках дослідного поля. Зібрані дані показали реальні показники внесення мінеральних добрив на рівні від 74% до 90% від попередньо встановлених програмою норм для кожної з ділянок (табл. 2). Отримані під час випробувань результати дають підстави стверджувати, що досліджуваний тип розкидача є придатним і може ефективно використовуватися для варіативного, диференційованого розподілу гранульованих добрив на сільськогосподарських угіддях.

ВИСНОВКИ

Дослідження, спрямоване на перевірку точності динамічного калібрування нового відцентрового розкидача мінеральних добрив Vicon RSEDW, продемонструвало наявність істотної та постійної розбіжності між фактичними показниками подачі на диски та запланованими нормами внесення (у середньому різниця становила приблизно 20%). Виробнича компанія була змушена здійснити коригування, модернізувавши електричні приводи для забезпечення стабільнішої подачі. Попри цей недолік, машина характеризувалася досить високим рівнем рівномірності розподілу поживних речовин у ґрунт, зберігаючи якість роботи за різних швидкісних режимів і налаштувань конфігурації обладнання.

Профіль поперечного розкидання 18% суперфосфатного добрива забезпечив ефективний показник захвату в 28 метрів при коефіцієнті варіації 15%, що вважається прийнятним для робіт у полі. Під час перевірки в умовах, максимально наближених до реального виробництва, було встановлено, що техніка реагує із затримкою приблизно 6–7 секунд після запуску подачі матеріалу. Експериментальні дані також свідчать, що фактична маса добрив, які потрапляють на окремі ділянки поверхні, варіюється в межах 74–90% від розрахункової норми, встановленої для цих позицій.

Таким чином, отримані висновки дозволяють стверджувати, що цей розкидач є придатним для застосування в системах змінних норм внесення практично всіх типів мінеральних добрив на полях. Разом із тим результати ще раз продемонстрували, що в Україні існує серйозна проблема — персонал, відповідальний за продаж і впровадження технологій точного землеробства, часто не має належної фахової підготовки, що позбавляє аграріїв якісної сервісної підтримки під час монтажу, налаштування та калібрування обладнання.

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.
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. Сіяти соняшник зі змінною нормою чи ні? Результати дослідів на 50 полях [Електронний ресурс] // *Агроном.* – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.agronom.com.ua/siyaty-sonyashnyk-zi-zminnoyu-normoyu-chy-ni-rezultaty-doslidu-na-50-polyah/>.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkiewicz, A.; Песуна, А.; 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. Налаштування сівалок при проблемах з посівом і глибиною заробки насіння [Електронний ресурс] // Поради від команди DEKALB. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.dekalb.ua/agronomichna-biblioteka/porady-vid-monsanto/nalashtuvannja-sivalok>.

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. Як оцінити якість посіву? Plant Counting: Pogostick та дрони [Електронний ресурс] // aggeek. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://aggeek.net/ru-blog/yak-otsiniti-yakist-posivu-plant-counting-pogostick-ta-droni>.

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-polovyh-kultur/>.

15. Морозов І. Фактори ефективності сівалок [Електронний ресурс] / І. Морозов, М. Макаренко // Агробізнес Сьогодні. – 2020. – Режим доступу до

ресурсы: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1138-factory-efektyvnosti-sivalok.html>.

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.* 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>.

26. 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.