

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Шуляк М.Л.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження впливу систем точного землеробства на якість внесення мінеральних добрив»

Виконав:

(підпис)

Кузьмів Я.В.

(Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2301-1м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Зубко В.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 40 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 2 таблиці, 10 рисунків, додатків 2, 30 літературних джерел.

Ключові слова: МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ЯКІСТЬ ВНЕСЕННЯ, НОРМА ВНЕСЕННЯ, КАЛІБРУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІННИХ НОРМ.

У цьому документі описано польові випробування, які оцінюють відцентровий розкидач добрив Vicon RS-EDW для використання в точному землеробстві. Результати випробувань динамічного калібрування показують значну та систематичну різницю між дозами застосування двох дисків (близько 20%). Цю різницю довелося виправити виробнику, який вніс необхідні зміни в електроприводи. Розкидач добрив мав хорошу однорідність розподілу, враховуючи різні робочі швидкості та різні позиції в пакеті. Крива розподілу за схемою для 18% суперфосфатного добрива призвела до ефективної робочої ширини 28 метрів із коефіцієнтом варіації 15%. Поздовжнє випробування в експериментальних умовах роботи призвело до часу затримки машини 6-7 секунд. Отримані результати показують, що фактична щільність внесення добрив становить 74-90% від визначеної для кожного місця. Ці результати дають змогу підтвердити, що розкидач можна використовувати для диференційованого розкидання будь-яких добрив у полі.

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 6 |
| 1 Стан питання і задачі досліджень..... | 7 |
| 1.1 Основні етапи диференційованого внесення добрив..... | 7 |
| 1.2 Агротехнічні вимоги до внесення гранульованих мінеральних добрив..... | 17 |
| 1.3 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм..... | 20 |
| 2 Матеріали і методи досліджень..... | 26 |
| 3 Аналіз результатів польового дослідження | 31 |
| Висновки..... | 35 |
| Список використаних джерел..... | 36 |

ВСТУП

Досвід застосування технології змінних норм висіву насіння в Україні свідчить, що приріст врожаю з поля сягає у середньому до 10% і вище в порівнянні з використанням однієї норми висіву. Застосування технології автоматичного відключення секцій під час посіву кукурудзи дає можливість уникнути перекриттів і перевищення густоти рослин та дозволяє заощаджувати від 3 до 8% насіння.

Застосування диференційованих способів внесення добрив дозволяє раціонально використовувати дорогі мінеральні добрива, що в порівнянні з традиційним фоновим методом економить значні кошти.

Інвестиції у деякі елементи точного землеробства повертаються вже протягом першого маркетингового року. Наприклад, технологія змінних норм висіву і автоматичного відключення секцій дозволяє здійснювати посів з автоматично-керованими змінними нормами висіву насіння в межах неоднорідних ділянок поля. Це дає можливість досягти оптимальної густоти стояння рослин на різних за властивостями частинах поля, а також ефективно використовувати ресурси та потенціал кожної ділянки поля, зокрема, різні запаси елементів живлення, продуктивної вологи, розподіл світла тощо.

Технологія диференційованого внесення добрив дозволяє оптимізувати використання ресурсів до 40%, а в деяких випадках і більше. Навіть перший, найпростіший крок до точного землеробства, який не потребує значних витрат — аналіз ґрунту і картографування його властивостей, дає можливість оптимізувати використання ресурсів і підвищити ефективність технології до 20% і вище.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Основні етапи диференційованого внесення добрив

Добрива відіграють важливу роль в оптимізації врожайності, забезпеченні ефективного використання поживних речовин і мінімізації впливу на навколишнє середовище. Однак традиційний метод рівномірного внесення добрив часто призводить до неефективного поглинання поживних речовин, деградації ґрунту та збільшення екологічних ризиків, таких як вимивання нітратів і викиди парникових газів. Диференційоване внесення добрив, також відоме як точне внесення добрив, вирішує ці проблеми шляхом пристосування типу, кількості та часу внесення добрив до конкретних умов ділянки. Цей метод використовує передові інструменти та технології для внесення поживних речовин саме там, де вони потрібні, підвищуючи врожайність, одночасно зменшуючи відходи та вплив на навколишнє середовище. У цій анотації розглядаються ключові етапи диференційованого внесення добрив, включаючи оцінку поля та збір даних, картографування приписів, змінну норму внесення (VRA), моніторинг та оцінку після збору врожаю.

Перший етап, оцінка поля та збір даних, зосереджується на виявленні неоднорідності в межах сільськогосподарських полів. Зміни в родючості ґрунту, структурі, вмісті органічної речовини, рівнях рН, утриманні вологи та продуктивності минулих культур створюють зони з різними потребами в поживних речовинах. Випробування ґрунту, дистанційне зондування, картографування врожайності та аналіз тканин рослин є важливими інструментами на цьому етапі. Зокрема, такі технології, як дрони та супутники, оснащені мультиспектральними або гіперспектральними датчиками, дозволяють фермерам визначати проблемні зони та генерувати просторові

дані. Відбір зразків ґрунту надає детальнішу інформацію про стан поживних речовин і рівні родючості, допомагаючи визначити зони управління на полі. Дані, зібрані на цьому етапі, створюють основу для прийняття точних рішень на наступних етапах.

Створення цифрових ґрунтових карт (DSM) є важливим процесом для сучасного сільськогосподарського планування, землеустрою та збереження навколишнього середовища. DSM генеруються з використанням геопросторових технологій і статистичних моделей, які перетворюють дані зразків ґрунту в просторово безперервні прогнози. Цей підхід підвищує точність інформації про ґрунт порівняно зі звичайними картами ґрунту, дозволяючи прогнозувати властивості ґрунту в місцях без вибірки. У цьому документі представлено основу для розробки DSM на основі даних зразків ґрунту, зосереджуючись на інтеграції польових спостережень, лабораторних аналізів і передових методів прогнозного моделювання. Процес включає ключові етапи, включаючи збір даних, попередню обробку, моделювання та перевірку для забезпечення високоякісних ґрунтових карт, які підтримують практику сталого землекористування.

Початковий етап у створенні DSM передбачає збір репрезентативних зразків ґрунту. Ці зразки часто отримують шляхом систематичного або стратифікованого випадкового відбору, щоб зафіксувати просторову мінливість властивостей ґрунту в різних формах рельєфу та екологічних зонах. Кожен зразок проходить лабораторне тестування для визначення відповідних фізичних і хімічних властивостей, таких як рН, вміст органічного вуглецю, структура ґрунту та наявність поживних речовин. Отриманий набір даних є основою для створення надійних моделей прогнозування. Щоб покращити просторове охоплення, допоміжні дані, такі як зображення дистанційного зондування, цифрові моделі рельєфу (DEM) і кліматичні дані, інтегруються з

даними зразків ґрунту, щоб визначити кореляції між змінними середовища та властивостями ґрунту.

Попередня обробка даних має важливе значення для забезпечення узгодженості, точності та зручності використання. Цей етап може включати виправлення помилок у наборі даних вибірки, видалення викидів і нормалізацію значень. Методи просторової інтерполяції, такі як крігінг, інверсне зважування відстані (IDW) або кокрігінг, можуть застосовуватися для оцінки властивостей ґрунту в місцях без вибірки. Методи машинного навчання, такі як випадкові ліси, опорні векторні машини (SVM) або штучні нейронні мережі, все частіше використовуються для моделювання складних взаємозв'язків між властивостями ґрунту та коваріантами навколишнього середовища. Ці моделі використовують нелінійну взаємодію між декількома змінними, тим самим підвищуючи точність прогнозів ґрунту.

Після того, як моделі розроблені, перевірка виконується з використанням незалежних зразків ґрунту або методів перехресної перевірки для оцінки прогнозної ефективності моделі. Для оцінки надійності моделі використовуються такі показники, як середньоквадратична помилка (RMSE), коефіцієнт детермінації (R^2) і середня абсолютна помилка (MAE). Якщо продуктивність вважається задовільною, прогнозовані значення перетворюються на просторово безперервні карти. Програмне забезпечення Географічних інформаційних систем (ГІС) відіграє вирішальну роль у візуалізації, аналізі та розповсюдженні DSM, дозволяючи користувачам взаємодіяти з даними про ґрунт у різних масштабах.

Кінцеві продукти DSM пропонують численні переваги, включаючи покращене прийняття сільськогосподарських рішень, внесення добрив на конкретну ділянку та стратегії точного зрошення. Окрім сільського господарства, ці карти також є важливими вхідними даними для планування землекористування, управління лісами та зусиль щодо збереження

навколишнього середовища. Вони допомагають зацікавленим сторонам прогнозувати ризики ерозії ґрунту, контролювати стан ґрунту та впроваджувати стійкі практики. Крім того, DSM можуть підтримувати політиків, надаючи детальне просторове уявлення про тенденції деградації ґрунтів, уможливаючи більш цілеспрямовані заходи для пом'якшення втрати ґрунтів.

Незважаючи на переваги, створення DSM не позбавлене проблем. Слід звернути увагу на такі обмеження, як вартість і час, необхідні для великого відбору проб ґрунту, наявність допоміжних наборів даних високої роздільної здатності та невизначеності моделі. Очікується, що прогрес у технологіях дистанційного зондування, включаючи використання супутникових гіперспектральних і радіолокаційних даних із синтетичною апертурою (SAR), підвищить точність DSM шляхом надання більш детальних коваріантів навколишнього середовища. Більше того, підходи за участю фермерів і місцевих зацікавлених сторін можуть покращити процеси збору даних і забезпечити актуальність DSM для кінцевих користувачів.

Підсумовуючи, розробка цифрових ґрунтових карт на основі зразків ґрунту являє собою трансформаційний підхід до розуміння мінливості ґрунту та підтримки сталого управління земельними ресурсами. Завдяки об'єднанню даних зразків ґрунту з дистанційним зондуванням і прогнозними моделями, DSM надають детальну, актуальну та дієву інформацію про властивості ґрунту. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на покращенні точності моделі, розширенні доступності високоякісних допоміжних даних і вирішенні практичних проблем, пов'язаних із масштабуванням зусиль DSM. Завдяки постійному розвитку геопросторових технологій і машинного навчання DSM готові стати незамінними інструментами для ефективного управління ґрунтовими ресурсами Землі.

Наступний етап, картографування рецептів, перетворює польові дані в дієві плани внесення добрив. Використовуючи географічні інформаційні системи (ГІС) і спеціалізоване програмне забезпечення, фермери можуть розробляти карти, які вказують відповідний тип і кількість добрив для кожної зони господарювання. Карти базуються на кількох рівнях даних, включаючи вміст поживних речовин у ґрунті, потреби врожаю та моделі росту. Баланс поживних речовин стає центральним напрямком на цьому етапі, щоб гарантувати, що кожна зона отримує необхідні макроелементи (азот, фосфор і калій) і мікроелементи (такі як цинк і бор) у відповідних кількостях. Крім того, карта рецептів враховує стадії росту конкретної культури, місцеві кліматичні умови та цільову врожайність. Налаштовуючи ці приписи, фермери можуть досягти оптимальної ефективності поживних речовин і зменшити ризик надмірного або недостатнього внесення добрив, таким чином уникаючи шкоди навколишньому середовищу.

Невибіркове або надмірне внесення добрив може призвести до погіршення навколишнього середовища, виснаження ґрунту та економічної неефективності. Карти рецептів для внесення добрив пропонують багатообіцяюче рішення цих проблем, надаючи рекомендації для конкретної ділянки, адаптовані до потреб культури та умов ґрунту. Цей підхід усуває розрив між точним землеробством і звичайними методами, забезпечуючи баланс між максимізацією врожайності та мінімізацією впливу на навколишнє середовище.

Карти з рецептами — це інструменти, які збирають важливі дані про властивості ґрунту, типи культур і потреби в поживних речовинах на різних стадіях росту. Інформацію, інтегровану в ці картки, зазвичай отримують із випробувань ґрунту, кліматичних даних і цільової врожайності, що дозволяє фермерам застосовувати точну кількість добрив, необхідних для оптимального росту. Ця специфіка має вирішальне значення, оскільки здатність до

поглинання поживних речовин залежить від виду культур, фаз росту та умов навколишнього середовища. Дотримуючись карток приписів, фермери можуть уникнути надмірного внесення добрив, яке часто призводить до вимивання поживних речовин у водойми, викликаючи евтрофікацію, і зменшує викиди парникових газів, пов'язані з виділенням закису азоту.

Розробка рецептурних карт включає кілька етапів, починаючи з детального аналізу ґрунту, включаючи такі параметри, як рН, вміст органічної речовини та рівні основних макроелементів (азот, фосфор і калій) і мікроелементів. Для створення точних профілів родючості ґрунту використовуються передові лабораторні методи або польові набори. На додаток до аналізу ґрунту, цільова врожайність враховується в рекомендаціях. Наприклад, культури, які вирощуються для отримання більшої врожайності, вимагатимуть більше поживних речовин, і ця мінливість відображається в картці рецептів, щоб забезпечити продуктивність без марнотратного використання ресурсів.

Крім того, рецептурні карти враховують екологічні умови окремих регіонів. Сезонні коливання, режим опадів і температурні коливання впливають на динаміку поживних речовин у ґрунті. Отже, рекомендації на картах часто коригуються відповідно до графіків посіву та місцевих погодних умов. Ця гнучкість забезпечує синхронізацію внесення поживних речовин із потребами рослин, покращуючи ефективність поглинання поживних речовин і підвищуючи економічну ефективність використання добрив.

На практиці використання рецептурних карт дає декілька операційних переваг. По-перше, вони спрощують процеси прийняття рішень для фермерів, пропонуючи чіткі та лаконічні вказівки щодо застосування. Картки вказують тип, дозування та час внесення добрив, часто сегментованих на базову та підгодівлю. По-друге, ці інструменти зменшують залежність від здогадок, надаючи фермерам можливість отримувати інформацію на основі даних і

сприяючи відповідальному управлінню поживними речовинами. Це особливо корисно для дрібних фермерів, які можуть не мати доступу до агрономічної експертизи. Крім того, систему рецептурних карт можна інтегрувати в цифрові платформи, надаючи фермерам доступ до рекомендацій через мобільні додатки або онлайн-сервіси, що ще більше покращує доступність.

З економічної точки зору впровадження рецептурних карт може підвищити рентабельність сільськогосподарських операцій за рахунок оптимізації вхідних витрат. Вносячи лише необхідну кількість добрив, фермери можуть зменшити непотрібні витрати та підвищити окупність інвестицій. Крім того, культури, які отримують збалансоване живлення шляхом цілеспрямованого внесення добрив, як правило, демонструють покращений ріст, кращу стійкість до хвороб і вищу врожайність. Це сприяє не тільки продовольчій безпеці, але й стійкості сільськогосподарської практики, оскільки збалансоване використання добрив допомагає зберегти здоров'я ґрунту в довгостроковій перспективі.

Екологічні переваги, пов'язані з використанням рецептурних карт, значні. Контрольоване внесення добрив зменшує стік поживних речовин і зводить до мінімуму забруднення ґрунтових і поверхневих водних систем. Це узгоджується з глобальними зусиллями щодо сприяння сталим методам ведення сільського господарства та пом'якшенню впливу сільського господарства на навколишнє середовище. Крім того, точне застосування добрив скорочує викиди парникових газів, сприяючи стратегіям пом'якшення кліматичних змін. Пропагуючи розумне використання азотних добрив, які, як відомо, сприяють викидам закису азоту, рецептурні картки відіграють важливу роль у зменшенні вуглецевого сліду в сільському господарстві.

Проте існують проблеми, пов'язані з широким впровадженням рецептурних карт. Одним з обмежень є необхідність частого тестування ґрунту для підтримки точності рекомендацій, що може збільшити експлуатаційні

витрати для фермерів. Крім того, дрібні фермери в регіонах, що розвиваються, можуть зіткнутися з труднощами доступу до об'єктів для тестування ґрунту або отримання необхідних знань для тлумачення. У розв'язанні цих проблем уряди та служби сільськогосподарської консультації можуть відігравати вирішальну роль, субсидуючи витрати на тестування ґрунту та забезпечуючи навчальні програми щодо ефективного використання рецептурних карт.

Підсумовуючи, карти рецептів на внесення мінеральних добрив являють собою важливий прогрес у пошуках сталого сільського господарства. Завдяки об'єднанню даних про ґрунт, урожай і навколишнє середовище ці інструменти дають фермерам практичну інформацію про цілеспрямоване та ефективне внесення добрив. Отримані переваги включають підвищення врожайності, зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення економічної прибутковості. Однак для повної реалізації цих переваг необхідно докласти зусиль, щоб покращити доступ до об'єктів для тестування ґрунту, підвищити обізнаність про важливість збалансованого внесення добрив і сприяти інтеграції рецептурних карток у цифрові сільськогосподарські платформи. За наявності правильної політики та механізмів підтримки широке використання рецептурних карток може стати наріжним каменем сучасної сільськогосподарської практики, сприяючи як екологічній стійкості, так і економічній стійкості.

Третій етап, змінна норма (VRA), передбачає впровадження рецептурних карт на сучасному обладнанні. Технологія VRA дозволяє точно регулювати норми внесення добрив у режимі реального часу під час руху техніки по полю. Цей процес вимагає інтеграції систем GPS і обладнання з підтримкою VRA, наприклад розкидачів, обприскувачів і сівалок. Розподіл добрив можна регулювати автоматично відповідно до потреб певних зон, гарантуючи, що кожна частина поля отримує точну кількість поживних речовин, необхідних для здорового росту культур. Системи VRA засновані на датчиках, які

реагують на умови в реальному часі (наприклад, зеленість культур чи біомаса), або на основі карти, дотримуючись попередньо визначених карт рецептів. Цей етап не тільки підвищує ефективність використання поживних речовин, але й зменшує втрати добрив, мінімізуючи забруднення навколишнього середовища.

Четвертий етап, моніторинг і коригування в сезон, гарантує, що культури отримають відповідні поживні речовини протягом вегетаційного періоду. Моніторинг у режимі реального часу за допомогою дронів, супутникових зображень і датчиків, вбудованих у поле, дозволяє фермерам відстежувати здоров'я врожаю та виявляти дефіцит поживних речовин або фактори стресу. Такі погодні умови, як несподівані дощі або посуха, можуть вплинути на доступність поживних речовин, вимагаючи коригування внесення добрив у середині сезону. На основі цієї інформації фермери можуть виконувати коригувальні заходи, такі як позакореневе підживлення або підживлення, щоб підтримувати здоров'я врожаю. Ця система динамічного моніторингу допомагає фермерам завчасно реагувати на польові умови, підвищуючи врожайність і зменшуючи ймовірність стоку або вимивання поживних речовин.

Останній етап, оцінка після збирання врожаю, забезпечує зворотний зв'язок для вдосконалення майбутніх стратегій удобрення. Дослідження ґрунту та дані про врожайність, зібрані після збору врожаю, показують, наскільки ефективно були використані поживні речовини та де виникли недоліки чи надлишки. Порівнюючи фактичну врожайність з очікуваною, фермери можуть оцінити ефективність плану внесення добрив і визначити області для покращення. Цей етап пропонує цінну інформацію, яка інформує про рецепти добрив наступного сезону, сприяючи безперервному циклу навчання та оптимізації. Крім того, фермери можуть оцінити економічний вплив своїх методів удобрення, збалансувавши витрати на вхідні ресурси для забезпечення прибутковості.

Таким чином, диференційоване внесення добрив є систематичним підходом, розробленим для оптимізації управління поживними речовинами шляхом обліку просторової та часової мінливості на полях. Він складається з п'яти ключових етапів: оцінка поля та збір даних, картографування приписів, змінна норма внесення, моніторинг у сезон та оцінка після збору врожаю. Використовуючи цей метод, фермери можуть підвищити врожайність, зменшити відходи добрив і мінімізувати шкоду навколишньому середовищу. Оскільки технології точного землеробства продовжують розвиватися, диференційоване внесення добрив відіграватиме все більш вирішальну роль у сталих методах сільського господарства, сприяючи як економічній життєздатності, так і екологічному захисту.

1.2 Агротехнічні вимоги до внесення гранульованих мінеральних добрив

Внесення гранульованих мінеральних добрив — важливий сільськогосподарський прийом, спрямований на оптимізацію живлення рослин, підвищення родючості ґрунту та підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Однак досягнення цих переваг вимагає дотримання певних агротехнічних вимог, які враховують властивості ґрунту, потреби культур, кліматичні умови, а також строки та спосіб внесення. У цьому рефераті викладено основні принципи та практики, необхідні для ефективного та сталого використання гранульованих мінеральних добрив.

Різні культури вимагають різної кількості та типу поживних речовин на певних стадіях росту. Гранульовані добрива зазвичай містять такі макроелементи, як азот (N), фосфор (P) і калій (K), часто доповнені мікроелементами, такими як цинк, залізо або бор. Вибір правильного складу добрива має важливе значення для задоволення потреб конкретних культур у поживних речовинах. Аналіз ґрунту відіграє ключову роль у визначенні

наявних рівнів поживних речовин і їх дефіциту, гарантуючи, що внесені добрива доповнюють склад ґрунту. Крім того, рН ґрунту впливає на доступність поживних речовин, і його слід враховувати при виборі добрив, оскільки деякі поживні речовини, такі як фосфор, менш доступні в сильнокислих або лужних ґрунтах.

Терміни внесення добрив суттєво впливають на засвоєння поживних речовин і продуктивність культури. Для отримання оптимальних результатів добрива слід вносити синхронно зі стадіями росту культури, щоб забезпечити доступність поживних речовин, коли рослини їх найбільше потребують. Наприклад, азот часто потрібен на початку вегетаційного періоду для сприяння вегетативному росту, тоді як фосфор і калій мають вирішальне значення на етапах цвітіння та плодоношення. Гранульовані добрива часто вносять перед посадкою (як базова підгодівля), під час росту культури (як підгодівля) або через певні проміжки часу залежно від потреб культури. Роздільні внесення, коли добриво вноситься кілька разів, зменшують ризик вимивання поживних речовин, підвищують ефективність поглинання та мінімізують вплив на навколишнє середовище.

Спосіб внесення гранульованих добрив впливає на їх ефективність і екологічність. Використовується кілька методів, включаючи трансляцію, смугу та локалізоване розміщення. Розкидання передбачає рівномірне розкидання добрив по поверхні ґрунту до або після посіву. Цей метод добре підходить для культур із щільною кореневою системою, але може призвести до втрати поживних речовин через випаровування або стікання, якщо їх не внести в ґрунт. Смугами розміщуються добрива концентрованими смугами поблизу насіння або кореневої зони, сприяючи ефективному поглинанню поживних речовин і мінімізуючи втрати. Місцеве розміщення, наприклад точкове внесення або фертигація, забезпечує доставку поживних речовин безпосередньо до кореневої системи культури, покращуючи поглинання.

Внесення добрив у ґрунт за допомогою оранки або боронування може додатково зменшити втрати та підвищити доступність.

Управління внесенням добрив також має враховувати фактори навколишнього середовища, щоб запобігти забрудненню водойм і зменшити викиди парникових газів. Добрива на основі азоту, якщо їх не застосовувати належним чином, можуть вимиватися в ґрунтові води або втрачатися в атмосферу у вигляді оксиду азоту, потужного парникового газу. Стік фосфору сприяє евтрофікації водойм, викликаючи цвітіння водоростей і виснаження кисню. Щоб мінімізувати ці ризики, добрива слід вносити за сприятливих погодних умов, уникаючи сильних опадів або періодів посухи, і відповідно до потреб культури у воді. Застосування методів збереження, таких як буферні зони навколо водойм і використання добрив із контрольованим вивільненням, також зменшує екологічні ризики.

Використання точної агротехніки забезпечує точні норми внесення та рівномірний розподіл гранульованих добрив. Розкидачі добрив необхідно регулярно калібрувати для доставки бажаної кількості поживних речовин, уникаючи надмірного або недостатнього внесення, що може вплинути на здоров'я та врожайність культури. Технологічні досягнення, такі як системи з GPS-навігацією та інструменти зі змінною нормою внесення (VRA), дозволяють вносити добрива на конкретну ділянку, регулюючи кількість залежно від мінливості ґрунту та потреб культури. Такі технології точного землеробства оптимізують ефективність використання поживних речовин, зменшують витрати на виробництво та зменшують вплив на навколишнє середовище.

Правильне поводження з гранульованими добривами та їх зберігання мають важливе значення для збереження їх ефективності та запобігання нещасним випадкам. Добрива слід зберігати в сухих, добре провітрюваних приміщеннях, щоб запобігти поглинанню вологи, яке може спричинити

злежування та знизити ефективність розкидання. Крім того, деякі добрива містять небезпечні речовини, які вимагають обережного поводження, щоб уникнути ризику для здоров'я. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), такі як рукавички та маски що слід використовувати під час обробки, а обладнання слід експлуатувати відповідно до інструкцій з безпеки. Запобігання забрудненню між різними типами добрив під час зберігання також допомагає підтримувати їхню хімічну цілісність і забезпечує оптимальну продуктивність під час внесення в поле.

Для сприяння сталому сільському господарству використання гранульованих мінеральних добрив має поєднуватися з органічними добривами, поживними рештками та іншими доповненнями ґрунту. Ця практика, відома як інтегроване управління поживними речовинами (INM), покращує структуру ґрунту, підвищує доступність поживних речовин і зменшує залежність від хімічних речовин. INM також заохочує використання методів збереження ґрунту, сівозміни та покривних культур, які разом покращують родючість ґрунту з часом. Крім того, моніторинг здоров'я ґрунту та продуктивності врожаю за допомогою регулярних тестів дозволяє постійно коригувати практику внесення добрив, забезпечуючи довгострокову стійкість.

Підсумовуючи, ефективне використання гранульованих мінеральних добрив вимагає всебічного розуміння фізіології рослин, хімії ґрунту, умов навколишнього середовища та технологічних засобів. Дотримуючись агротехнічних вимог, таких як вибір відповідних типів добрив, оптимізація часу внесення, застосування відповідних методів і впровадження методів точного землеробства, фермери можуть досягати вищих урожаїв, мінімізуючи екологічні ризики. Включення цих методів у більш широку структуру сталого управління поживними речовинами гарантує, що продуктивність сільського господарства може підтримуватися без шкоди для здоров'я ґрунту чи екологічної цілісності.

1.3 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм

Поява точного землеробства змінила традиційне землеробство, забезпечивши більш ефективне та стійке управління ресурсами. Серед цих досягнень технологія змінної норми (VRT) для внесення добрив стала критично важливим інструментом для оптимізації доставки поживних речовин на основі просторової та часової мінливості в полі. Ця анотація містить комплексний аналіз досліджень використання VRT в управлінні добривами, зосереджуючись на його економічному, екологічному та агрономічному впливі.

Дослідження впливу технологій із змінною нормою (VRT) на точність внесення добрив набуло популярності зі збільшенням потреби в точному землеробстві. VRT надає фермерам можливість вносити в різні норми внесення таких факторів, як добрива, на поле, таким чином узгоджуючи внесення з мінливістю ґрунту, потребами врожаю та факторами навколишнього середовища. У цьому дослідженні досліджується, як використання VRT впливає на точність внесення добрив, зосереджуючись на ключових показниках продуктивності, таких як розподіл поживних речовин, реакція врожайності, ефективність використання ресурсів і екологічна стійкість. Отримані результати проливають світло на те, якою мірою VRT покращує результати сільського господарства шляхом мінімізації втрат, оптимізації використання добрив і вирішення проблеми просторової мінливості на полях.

Традиційна практика сільського господарства часто вносить добрива рівномірно, припускаючи однорідність у межах сільськогосподарських полів. Однак відмінності в родючості ґрунту, рельєфі та моделях росту культур створюють нерівномірний попит на поживні речовини. Неправильне внесення може призвести до надмірного внесення добрив на деяких ділянках, викликаючи екологічні проблеми, такі як стікання та деградація ґрунту, тоді як

недостатнє внесення добрив може призвести до втрати врожаю. VRT вирішує ці проблеми, використовуючи просторові дані, зібрані за допомогою таких технологій, як GPS, відбір проб ґрунту та датчики врожаю, щоб скласти карту мінливості полів і контролювати обладнання для введення вхідних даних зі швидкістю, що залежить від місця. Це дослідження оцінює, як ці технології впливають на точність подачі добрив і їхню здатність зменшувати дисбаланс поживних речовин.

Дослідження включає дані з тематичних досліджень, експериментів і літератури щодо полів, обладнаних системами VRT, у порівнянні з тими, що використовують однорідні дози. Результати показують, що VRT значно підвищує точність внесення поживних речовин, що призводить до покращення врожайності. Культури на полях, якими керує VRT, зазвичай отримують оптимальні рівні поживних речовин на просторово різноманітних ділянках, що зменшує ймовірність дефіциту або надлишку поживних речовин. Крім того, VRT дозволяє краще узгодити час і норму внесення добрив, синхронізуючи доставку поживних речовин зі стадіями росту культур і умовами навколишнього середовища. Як наслідок, фермери отримують вигоду від вищої продуктивності сільськогосподарських культур із зменшенням кількості добрив, що підвищує прибутковість і стійкість.

Окрім економічної вигоди, вплив VRT на навколишнє середовище є ключовим аспектом дослідження. Точне внесення добрив мінімізує вимивання азоту, стікання фосфатів і викиди парникових газів, сприяючи більш стійким системам землеробства. Забезпечуючи розміщення поживних речовин лише там, де це необхідно, VRT зменшує ризик забруднення навколишнього середовища, сприяючи здоров'ю ґрунту. Це особливо важливо в контексті потреби сучасного сільського господарства збалансувати продуктивність із збереженням навколишнього середовища. Дослідження підкреслює, що хоча VRT пропонує суттєві покращення в точності внесення добрив, ефективність

технології залежить від кількох факторів, включаючи якість просторових даних, калібрування обладнання, навички оператора та можливості програмного забезпечення.

Ключовою проблемою, визначеною в дослідженні, є високі початкові інвестиції, необхідні для обладнання VRT, і пов'язані з цим складнощі експлуатації. Для дрібних фермерів і фермерів у регіонах, що розвиваються, вартість впровадження VRT може бути непомірно високою, що обмежує її широке впровадження. Крім того, продуктивність систем VRT залежить від точності даних про ґрунт і врожай. Помилки в зборі або аналізі даних можуть поставити під загрозу переваги VRT, що призведе до неоптимального розподілу добрив. Таким чином, дослідження підкреслює потребу в навчанні та підтримці фермерів, які застосовують VRT, щоб забезпечити оптимальні результати.

Підсумовуючи, дослідження демонструє, що VRT значно підвищує точність внесення добрив, що призводить до підвищення врожайності, зменшення шкоди навколишньому середовищу та збільшення економічної вигоди. Однак успішне впровадження VRT вимагає вирішення технічних, фінансових та операційних проблем. Оскільки точне сільське господарство продовжує розвиватися, очікується, що впровадження VRT буде розширюватися завдяки прогресу в цифровому сільському господарстві, сенсорних технологіях і аналітиці даних. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на розробці більш доступних рішень VRT та вдосконаленні процесів інтеграції даних, щоб фермери будь-якого масштабу могли отримати вигоду від цієї трансформаційної технології. Отримані результати підкреслюють ключову роль VRT у формуванні сталого сільського господарства та сприянні ресурсозберігаючим методам ведення сільського господарства у 21 столітті.

Дослідження показали, що VRT дозволяє вносити добрива на конкретну ділянку, адаптовані до різних характеристик ґрунту, вимог до культур і зон продуктивності в межах поля. На відміну від застосування з рівномірною нормою (URA), VRT використовує геопросторові дані з датчиків, дронів або супутникових зображень, щоб визначити дефіцит або надлишок поживних речовин у певних місцях. Ключову роль у цьому процесі відіграють такі технології, як монітори врожайності, дистанційне зондування, системи з GPS-навігацією та пристрої для відбору проб ґрунту. Ці інструменти полегшують детальне картування поживних речовин, забезпечуючи точне внесення добрив і зменшуючи втрати. Численні дослідження підкреслюють, як ця точність може підвищити врожайність, знизити витрати на вхідні ресурси та мінімізувати шкоду навколишньому середовищу шляхом зменшення надмірного стоку добрив і вимивання нітратів.

Економічно VRT показав багатообіцяючі результати. Багато досліджень повідомляють про економію коштів для фермерів завдяки зменшенню використання добрив, особливо азотних, фосфорних і калійних. Крім того, завдяки оптимізації використання вхідних ресурсів VRT може призвести до вищих чистих прибутків за рахунок покращення врожайності. Однак рентабельність VRT залежить від таких факторів, як тип культури, розмір поля, початкова мінливість ґрунту та вартість технології. Великі ферми з більшою мінливістю часто отримують більше вигоди завдяки економії на масштабі, тоді як менші ферми можуть мати більший період окупності. Деякі дослідження показують, що фермери, які переходять на VRT, стикаються зі значними початковими інвестиціями та проблемами, пов'язаними з навчанням. Доступ до високоякісних даних і технічного досвіду залишається ключовим чинником успіху впровадження VRT.

З екологічної точки зору проаналізовані дослідження підкреслюють потенціал VRT для пом'якшення негативного впливу звичайного внесення

добрив. Зменшене надмірне застосування азоту знижує ризики забруднення ґрунтових вод і викидів парникових газів, пов'язаних із закисом азоту. Точне застосування також мінімізує накопичення фосфору в нереагуючих зонах, таким чином зменшуючи ризики евтрофікації водойм. Продовжні дослідження демонструють, що впровадження VRT протягом кількох сезонів врожаю допомагає підтримувати здоров'я ґрунту шляхом балансування рівнів поживних речовин у полі, таким чином сприяючи сталим сільськогосподарським практикам. Однак деякі дослідження попереджають, що переваги VRT для навколишнього середовища можуть бути підірвані неправильним калібруванням обладнання, неточними даними або затримкою реакції на зміну польових умов.

З агрономічної точки зору, VRT підтримує стратегії поживних речовин для певних культур, які є важливими для оптимізації росту рослин. Польові випробування показують, що врожайність сільськогосподарських культур зазвичай вища, коли використовується VRT, особливо на полях із високою мінливістю поживних речовин. Здатність вирішувати мінливість усередині поля гарантує, що ділянки з високим потенціалом отримують достатню кількість поживних речовин, тоді як ділянки з низьким потенціалом не будуть надмірно удобрені. Цей індивідуальний підхід до управління узгоджується з метою точного землеробства «робити правильні речі, у потрібному місці та в потрібний час». Однак не всі дослідження повідомляють про значне підвищення врожайності, особливо на полях з низькою початковою мінливістю. У таких випадках основна перевага VRT може полягати більше в збереженні ресурсів і екологічній стійкості, а не в підвищенні врожайності.

Кілька досліджень підкреслюють важливість інтеграції передових технологій, таких як штучний інтелект (AI) і машинне навчання (ML), із системами VRT. Ці технології створюють точніші прогностичні моделі потреб у поживних речовинах, що дозволяє динамічно коригувати протягом

вегетаційного періоду. Використання датчиків у режимі реального часу, які постійно збирають дані про стан рослин, вологість ґрунту та рівні поживних речовин, також було визначено як вирішальний елемент оптимізації VRT. Крім того, цифрові платформи, які зберігають і аналізують польові дані, надають цінну інформацію, роблячи VRT більш доступним і ефективним для фермерів. Оскільки технологічний прогрес продовжується, система VRT, ймовірно, стане більш автономною та зручнішою для користувачів, розширюючи її впровадження в різних сільськогосподарських регіонах.

У підсумку, проаналізовані дослідження підтверджують, що технологія змінної норми внесення добрив пропонує численні переваги, включаючи покращену врожайність, економію коштів і зменшення впливу на навколишнє середовище. Однак успіх VRT залежить від кількох факторів, таких як характеристики поля, точність даних, вартість технології та досвід фермера. Хоча VRT демонструє великий потенціал у сучасному сільському господарстві. Щоб максимізувати переваги, потрібно розглянути бар'єри управління даними та точність обладнання. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні алгоритмів VRT, розширенні можливостей збору даних у реальному часі та забезпеченні фермерам будь-якого масштабу доступу до цих технологій. Завдяки безперервним інноваціям і кращій інтеграції рішень, керованих штучним інтелектом, VRT обіцяє перетворити сільське господарство на більш стійку та продуктивну справу.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На період з 2023 по 2024 роки поле площею 6 гектарів було залучено до проекту точного землеробства для оцінки ефективності технологій змінних норм внесення мінеральних добрив (рис. 1). Восени кожного року біорізноманітні поля удобрювались (суперфосфатом 19%) диференційованим способом в залежності від вмісту фосфатів (P₂O₅) у ґрунті наприкінці циклу вегетації (травень-червень). Метою цих заходів було поступове збільшення концентрації P₂O₅ у ґрунті до рівня приблизно 100 мг/кг. Щоб досягти такого вмісту вносили тверді добрива зі змінною нормою відцентровим розкидачем моделі Vicon RS-EDW. Його обладнано двома дисками, які обертаються в протилежних напрямках. Ця модель розкидача оснащена відцентровим розподільником добрив має систему зважування з 5-ма тензодатчиками в нижній частині ємності з добривами. Ця система дозволяє вимірювати кожні півсекунди масу добрив в бункері, щоразу, як тільки починає змінюватися маса потоку розподільника.

Така інформація є важливою для процесу регулювання бажаної щільності добрив, які будуть внесені, відповідно до залежності (1). Коли оператор змінює робочу швидкість агрегату, мікропроцесор змінює положення (ступінь відкриття) дозувальних пластин (рис. 2).

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

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

При дослідженням використовувалося наступне обладнання: трактор Massey-Ferguson 6130 (63 кВт); стандартний контролер Ferticontrol; система Lightbar, приймач Garmin GPS/DGPS 16 та система FieldStar для точного землеробства. Карта-завдання як правило складається на основі аналізу даних

від географічної інформаційної системи, використовуючи значення різних відповідних характеристик поля та встановлених взаємозв'язків між економічними обмеженнями та обмеженнями урожайності. Потім карта-завдання надсилається на контролер VRT, розміщений на консолі оператора.

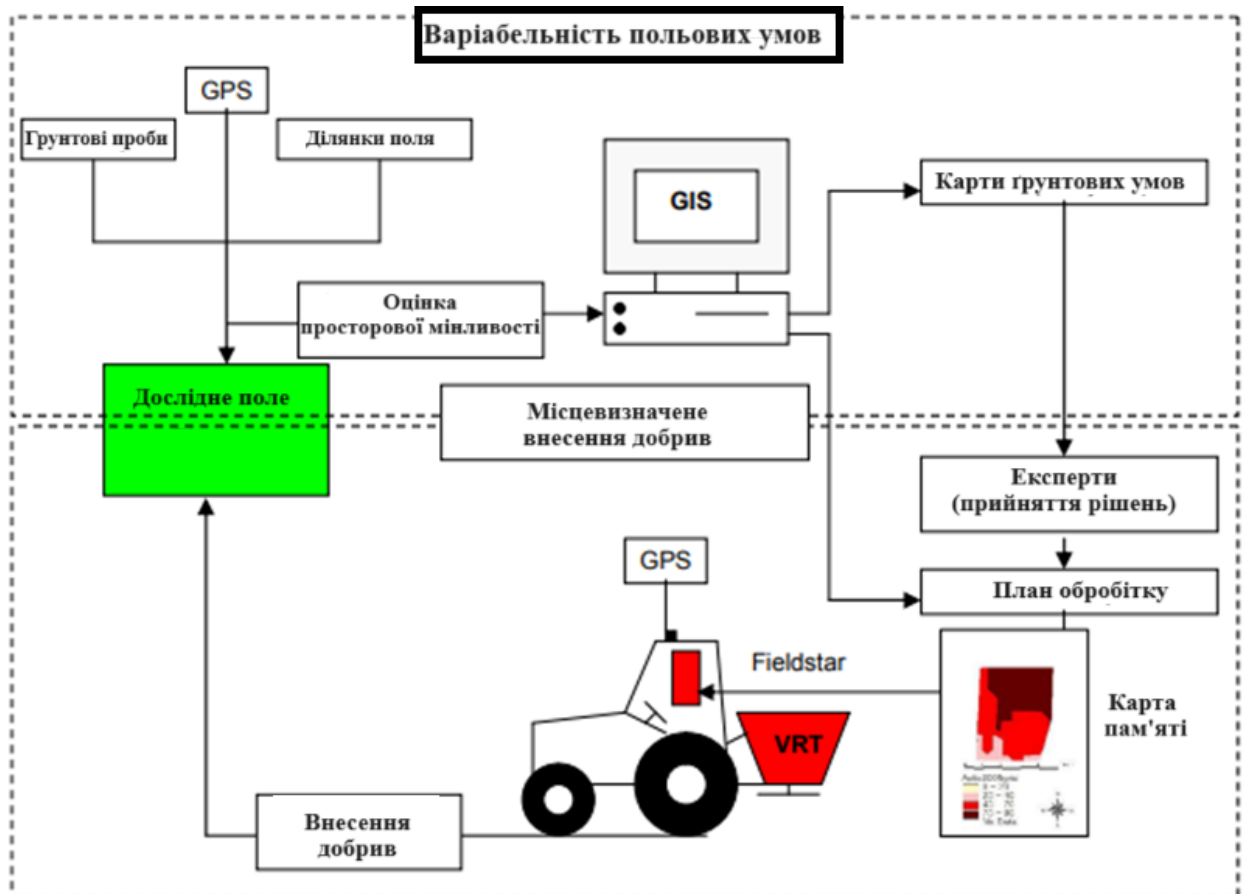


Рис. 1 - Схема організації експеримента в проекті точного землеробства

Внесення добрив і вапна зі змінними нормами часто не спричиняє позитивних економічних та екологічних впливів. Трьома основними перепонами поточних методів є: велика вартість відбору та аналізу проб ґрунту, що призводить до побудови карт із недостатньою просторовою роздільною здатністю; неточні рекомендаційні алгоритми, що було розроблено для великомасштабних сільськогосподарських практик; недостатня ефективність техніки та її налаштування призводять до помилок у фактичній кількості внесених діючих речовин порівняно з цільовою.

З огляду на третє обмеження, перед проведенням польових тестувань відцентровий розкидач мінеральних добрив було протестовано у чотири етапи:

- 1-й етап (калібрування) передбачав застосування емностей для збору добрив, що дасть змогу оцінити продуктивність обох розподільних дисків для розкидання потоку добрив, що забезпечить внесення запрограмованої норми в залежності від робочої швидкості (рис. 3);

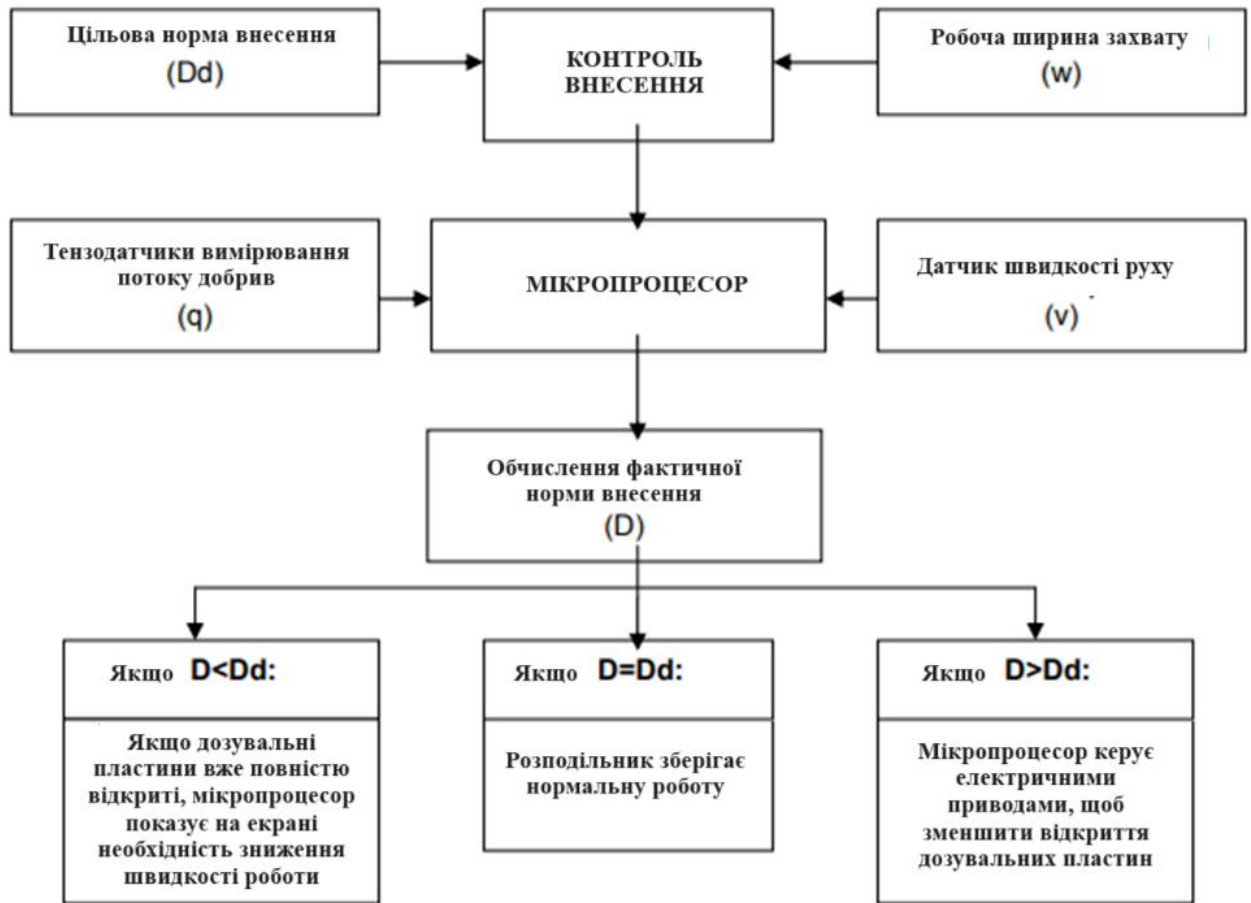


Рис. 2 - Схема керування системою Vicon RS-EDW

- другим етапом передбачено оцінку досліджуваної схеми розкидання та рівномірності розподілу по ширині захвату відцентрового розподільника з метою визначення ефективної робочої ширини. Для цього розміщували набір приймачів добрив (пластикових лотків) перпендикулярно до лінії напрямку руху трактора. Розподілені добрива збирали, а їх масу потім визначали і

використовували для побудови кривої розподілу та визначення ефективної робочої ширини захвату розкидача (рис. 4);



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

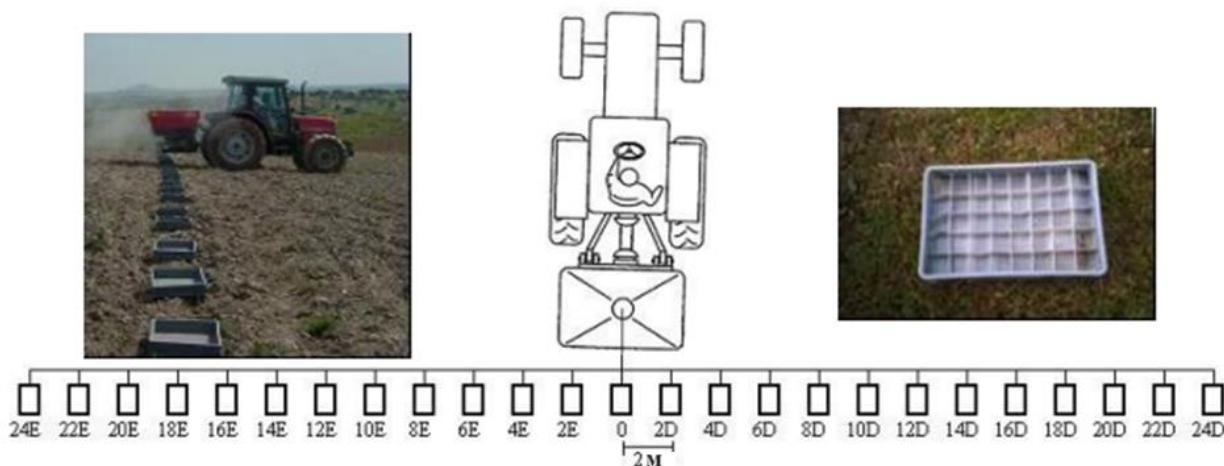


Рис. 4 - Польові дослідження для оцінки рівномірності розподілу розкидача добрив Vicon RSEDW.

- третім етапом включалось розміщення набору лотків вздовж лінії, за напрямком руху розкидача, щоб визначити довжину перехідної зони між ділянками з різними нормами внесення (рис. 5);

- четвертим етапом передбачалось розміщення дванадцяти лотків для збирання добрив вздовж траєкторії розкидача на чотирьох ділянках дослідного

поля, для контролю того, що змінна норма внесення здійснюється відповідно до карти фактичного внесення (рис. 6).

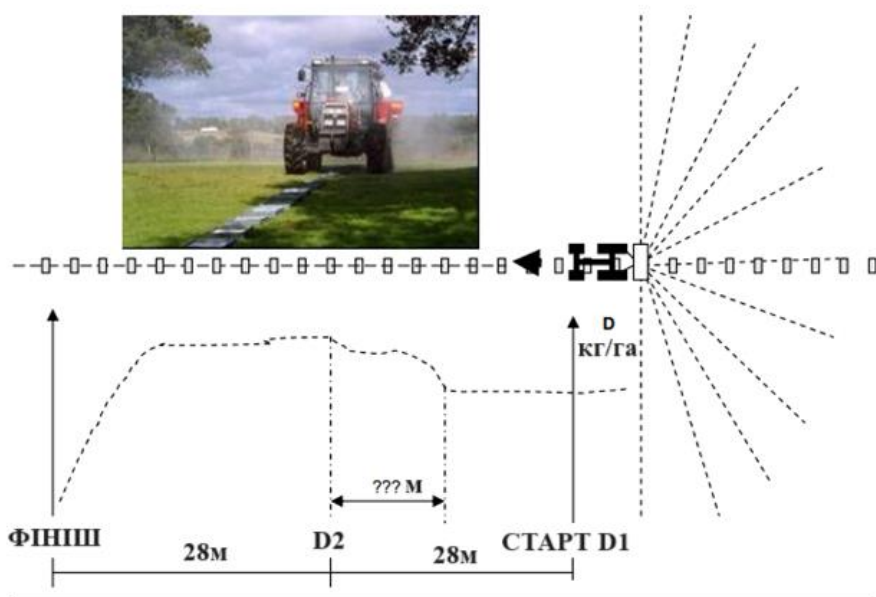


Рис. 5 Схема досліджень для оцінки переходу при зміні норми внесення у розкидача Vicon RS-EDW

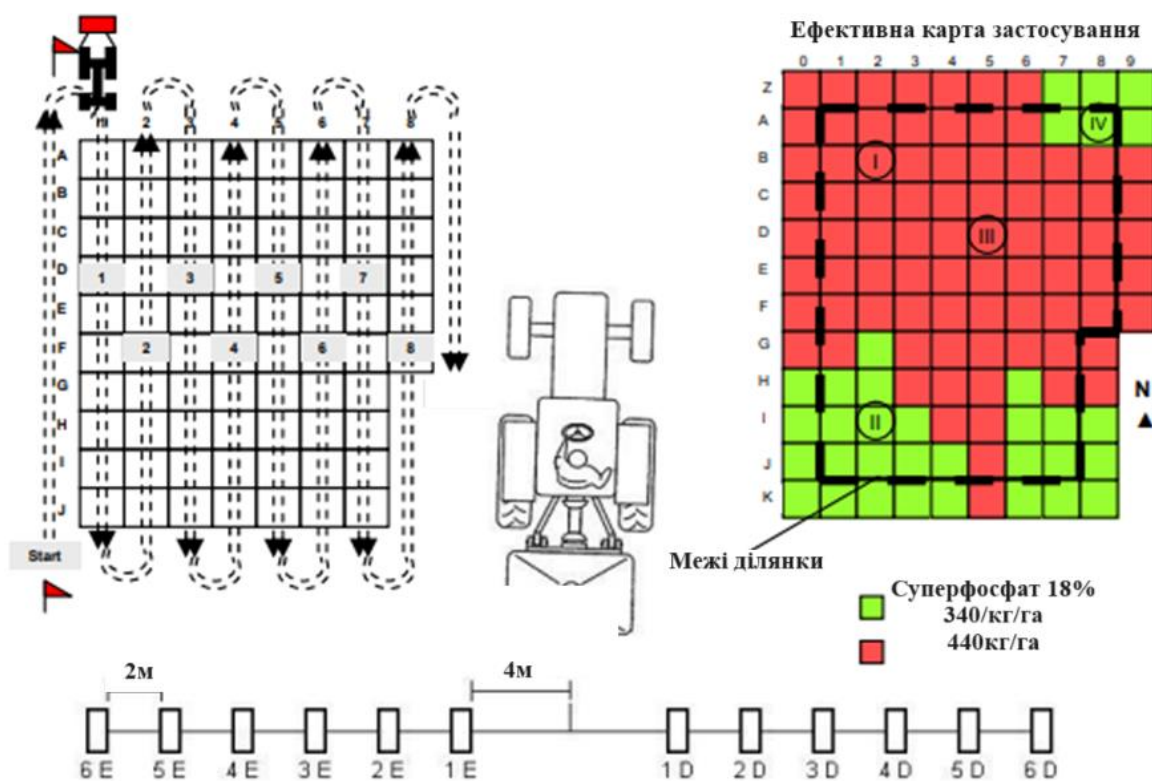


Рис. 6 – Схема дослідження для оцінки змінної норми відповідно до карти завдання

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОЛЬОВОГО ДОСЛІДУ

У таблиці 1 представлено результати 5-ти калібрувальних тестувань 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 |

Результати проведених тестів динамічного калібрування демонструють значну та систематичну різницю (більшу для лівого диска) між нормами внесення дисків (від 12 до 27% різниці; середнє значення прибіл. 20%). На рисунку 7 показується різниця між правою та лівою дозувальними пластинами при трьох налаштованих нормах внесення. Цю різницю довелось виправляти виробнику, який зробив необхідні зміни в електроприводах (рис. 8). Рис. 9 відображає результати польових випробувань з оцінки поперечного розподілу для 18%-го суперфосфатного добрива, при яких отримали ефективну робочу ширину 28 м з коефіцієнтом варіації 15%. Обертання назовні розкидних дисків у цій моделі розкидача формує «пірамідальний» візерунок для поперечного розподілу, з вершиною одразу за трактором, а краї звужуються рівномірно до центру колій з боків. Такі результати Показали, що розкидач добрив забезпечив хорошу однорідність розподілу, беручи до уваги різні швидкості руху та різні налаштування.

Випробування поздовжнього розподілу в експериментальних умовах роботи (швидкість руху між 7-8 км/год; застосоване добриво: 18%

суперфосфат) призвело до середньої довжини переходу обладнання для внесення на змінену норму в 14 м, що відповідає часу затримки системи від 6 до 7 с. (рис. 10).

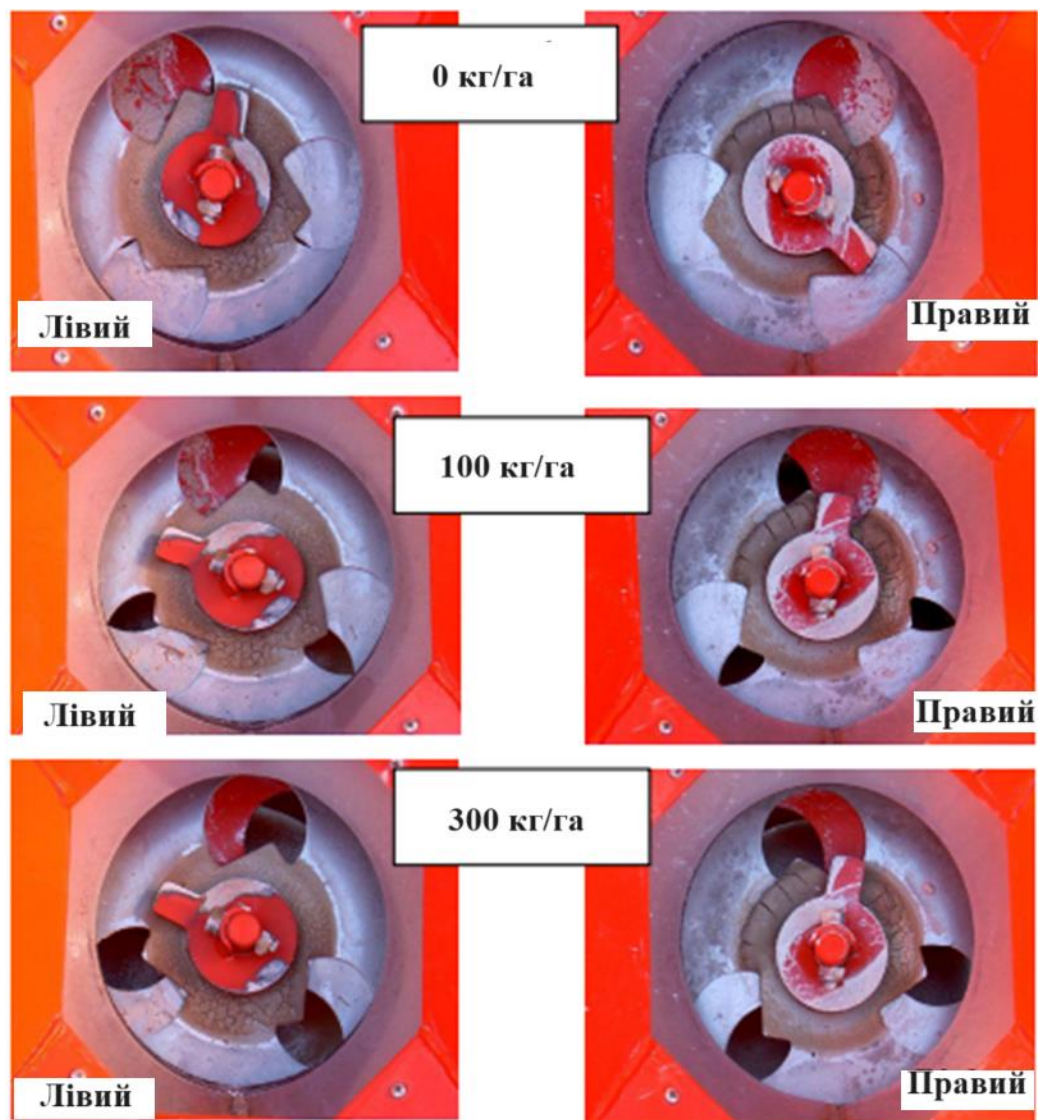


Рис. 7 - Права та ліва дозувальні пластини відповідно до трьох заданих норм внесення



Рис. 8 - Доналаштування електричних приводів

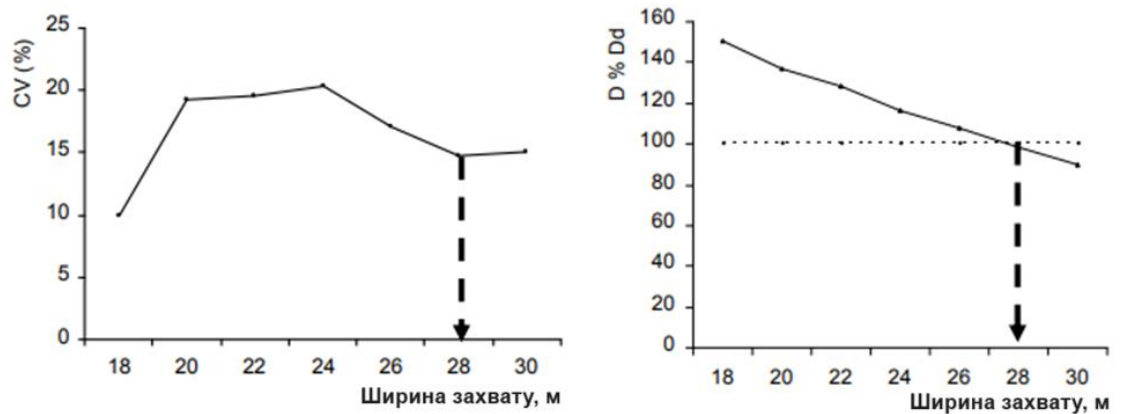


Рис. 9 - Результати польових тестувань для вибору робочої ширини захвату на основі CV і співвідношення фактичної (D) і бажаної нормам (Dd)

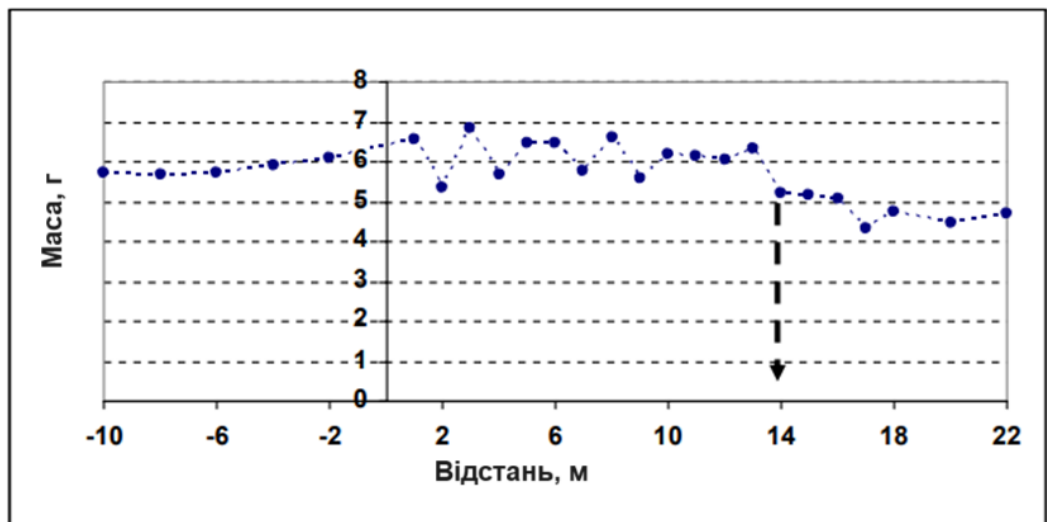


Рис. 10 – Сер. відстань переходу системи для внесення на різні норми

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 |

Щоб продемонструвати, що змінні норми внесення виконуються відповідно до фактичної карти-завдання, дванадцять ємностей для збору добрив розставили вздовж шляху розкидача на чотирьох ділянках квадратної форми в дослідному полі. Отримані результати демонструють фактичну норму внесення мінеральних добрив від 74% до 90% від запрограмованої для кожної ділянки (табл. 2). Отримані результати дають можливість підтвердити, що

даний розкидач можна застосовувати для диференційованого розкидання гранульованих добрив в полі.

ВИСНОВКИ

Результати випробувань динамічного калібрування нового відцентрового розкидача добрив Vicon RSEDW показують значну та систематичну різницю між дозами внесення дисків (середня різниця близько 20%). Цю різницю довелося виправити виробнику, який вніс необхідні зміни в електроприводи. Розкидач добрив мав хорошу однорідність розподілу, враховуючи різні робочі швидкості та різні налаштування.

Крива розподілу за схемою для 18% суперфосфатного добрива призвела до ефективної робочої ширини 28 метрів із коефіцієнтом варіації 15%. Поздовжнє випробування в експериментальних робочих умовах призвело до часу затримки машини від 6 до 7 секунд. Отримані результати показують, що фактична щільність внесення добрив становить від 74% до 90% від визначеної для кожного місця.

Ці результати дають змогу підтвердити, що розкидач можна використовувати для диференційованого розкидання будь-яких добрив у полі. Це дослідження також підтверджує, що в Україні ті, хто продає технологію на місцях, не мають необхідного навчання і тому не можуть забезпечити надійну підтримку фермерам на різних етапах встановлення системи та калібрування обладнання. Це є серйозною перешкодою для впровадження таких систем і впровадження точного землеробства.

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. Сіяти соняшник зі змінною нормою чи ні? Результати досліду 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.; 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. 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. Garg, A.; Sapkota, A.; Haghverdi, A. SAMZ-Desert: A Satellite-based agricultural management zoning tool for the desert agriculture region of southern California. Comput. Electron. Agric. 2022, 194, 106803
12. Qi, J.T.; Tian, X.L.; Li, Y.; Fan, X.H.; Yuan, H.F.; Zhao, J.L.; Jia, H.L. Design and experiment of a subsoiling variable rate fertilization machine. Int. J. Agric. Biol. Eng. 2020, 13, 118–124.
13. Kazlauskas, M.; Šarauskis, E.; Lekavičiene, K.; Naujokienė, V.; Romanekas, K.; Bručienė, I.; Buragienė, S.; Steponavičius, D. The comparison analysis of uniform-and variable-rate fertilizations on winter wheat yield parameters using site-specific seeding. Processes 2022, 10, 2717.
14. 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/.
15. 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.

16. 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>.
17. 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/>.
18. Морозов І. Фактори ефективності сівалок [Електронний ресурс] / І. Морозов, М. Макаренко // Агробізнес Сьогодні. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1138-factory-efektyvnosti-sivalok.html>.
19. Wang, X. Analysis of the results of a trial of organic fertilizer replacing some chemical fertilizers in potatoes. Mod. Agric. 2021, 01, 56–57.
20. 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.
21. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). Precision Agriculture Basics. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.
22. Jupp L. (2018). Precision Farming From Above. Writing Matters Publishing, 113 p.
23. 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.
24. 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>.

25. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.
26. 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).
27. 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>.
28. 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>.
29. 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.