

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 елементів систем точного землеробства на показники якості внесення твердих мінеральних добрив»

Виконав:

(підпис)

Божко О.Г.

(Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2301-1м ВН

(Науковий) керівник:

(підпис)

Лебедєв А.Т.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 40 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 2 таблиці, 10 рисунків, додатків 2, 26 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 Агронімічні аспекти мінерального живлення рослин	12
1.3 Особливості застосування мінеральних добрив	17
1.4 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм.....	18
2 Матеріали і методи досліджень.....	25
3 Аналіз результатів польового дослідження	31
Висновки.....	36
Список використаних джерел.....	37

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

Основна мета впровадження точного землеробства – економія ресурсів: насіння, добрив, хімікатів, палива і т.д. Досягається це за рахунок використання спеціалізованих методик внесення.

Також заощаджуються кошти завдяки зниженню витрат на придбання і ремонт техніки за рахунок її більш раціонального використання.

Нові технології процесу обробітку ґрунту, такі як картування врожайності, паралельне водіння і ін. знижують час і трудомісткість процесу.

Диференційоване внесення добрив – один з найважливіших елементів точного землеробства. Воно передбачає, що добрива вносяться вибірково, там, де необхідність в тих чи інших добривах особливо актуальна. Причому застосовується два основних способи: внесення в режимі реального часу і внесення з попередньо підготовленої картою поля. Найчастіше застосовується другий варіант.

На 1-му етапі створюється попередня електронна карта поля по забезпеченості ґрунту хімічними елементами живлення. Це можна зробити декількома способами, які відрізняються один від одного комбінацією вікорістовуваного обладнання.

Наприклад, можна використовуват дані врожайності, записані прямо під час збирання врожаю в пам'ять бортового комп'ютеру комбайну. Аналіз врожайності дає можливість визначити «проблемні» ділянки, тобто ділянки з мінімальним рівнем врожайності, и саме там відібрати проби ґрунту для аналізу. Якщо можливості зібрати такі дані немає, то відібрати проби доведеться з усього поля.

На 2-му етапі – відбір ґрунту. Технологія відбору при точному землеробстві полягає, перш за все, у визначенні координат виділених ділянок

на електронній карті. Місцезнаходження таких ділянок встановлюється за допомогою високоточного GPS-приймача.

Відбір проб для агрохімічного аналізу необхідно проводити з огляду на вертикальну структуру, неоднорідність ґрунтового покриву, рельєф і клімат місцевості.

Тут також є, різні методики:

- випадковий відбір проб – підходить для однорідних полів з невеликими змінами. Даний метод не підходить для точного землеробства, оскільки показує лише середні показники поля;

- виділення елементарних ділянок на підставі результатів моніторингу врожайності;

- еталонний відбір проб – добре підходить для неоднорідних полів з великою кількістю змін на поле (пагорби, зміни рельєфу і т.д.). Еталонний відбір проб зменшує площу обраного поля шляхом ділення його на ділянки розміром 5-10 га. Таким чином, після проведення аналізу повинні будуть дані рекомендації по внесенню добрив для кожної такої ділянки. В ідеалі координати кожного еталонного ділянки повинні бути відзначені за допомогою GPS, або іншим способом, щоб в майбутньому можна було повернутися на нього для відбору проб і внесення добрив. Відбір зразків в одному і тому ж самому місці покаже картину щорічних змін на полі.

Відбір змішаних зразків найкраще проводити навесні, коли на поле ще не внесені добрива і не проведені посіви. Другий термін відбору зразків – після збирання врожаю, коли основний запас доступних поживних елементів вже витрачено рослинами, а відсутність посівів не заважає виконанню робіт.

Найчастіше для відбору змішаних ґрунтових зразків застосовують метод «конверта»: на кожній з ділянок по діагоналі або по «конверту» (4 точки по кутах і одна в центрі) в його 5-ти точках відбирають проби.

Як правило, точкові проби відбирають з орного горизонту ґрунту, де глибина становить 0-30 см, а відбір проб в заданій точці здійснюється ручним буром або автоматичним пробовідбірником.

3-й етап – лабораторний аналіз ґрунту. Аналіз може включати тестування ґрунту на нітратний азот, доступний фосфор, доступний калій, сірку, кислотність ґрунту (рН), засоленість і вміст органічної речовини (потенціал ґрунту). Також проводяться аналізи на мікро- і макроелементи, такі як бор, молібден, мідь, залізо, марганець, цинк, кобальт, магній і кальцій, механічний склад (гранулометрія).

За результатами дослідження ґрунту в лабораторії отримують більш вичерпну та достовірну інформацію про хімічний склад ґрунту, а також його фізико-механічних показниках. Ця інформація уточнить уявлення про родючість ґрунту. Крім того, стає можливим створення за допомогою спеціального програмного забезпечення електронної карти поля для точного землеробства.

Як показує практика, існує пряма залежність між врожайністю і вмістом в ґрунті гумусу, рухомого фосфору, лужно-гідролізуемого азоту. Чим вищий вміст гумусу, фосфору й азоту в ґрунті, тим вище рівень врожайності. Ділянки полів із вмістом гумусу менше 2%, зазвичай, схильні до водної ерозії, коли помітний вихід материнської породи на поверхню. Менш значуща залежність за вмістом рухомого калію.

4-й етап – розрахунок дози добрив на запланований врожай. З огляду на рекомендації агрохіміків з ефективного використання добрив проводиться розрахунок норми діючої речовини на гектар.

Розраховані значення норм внесення добрив формують в програмі SMS-Advanced карту-завдання на внесення добрив, що складається з елементарних ділянок, колір яких відповідає заданій нормі внесення добрив у фізичній вазі.

Кожен з елементарних ділянок має однаковий розмір (виходячи з ширини захоплення розкидачів) і свою географічну прив'язку.

5-й етап – диференційоване внесення добрив. Карта-завдання завантажується в бортовий комп'ютер трактора. Під час руху трактора по полю при внесенні добрив бортовий комп'ютер, використовуючи дані позиціонування з високоточного GPS-приймача, зчитує інформацію з карти-завдання і керує положенням дозуючих заслінок, збільшуючи або зменшуючи подачу добрив.

Персональний підхід до кожного поля та вивчення ґрунтів стане основою на початку шляху до технології точного землеробства. Для того, щоб зрозуміти, що відбувається в ґрунті, тобто в яких умовах доведеться починати роботу (а саме тип ґрунту, вміст мікро та макро елементів, органічна складова) та яких елементів потребує поле, його слід дослідити, проаналізувати та сформувані стратегію роботи у вигляді карт-завдання для розкидача, обприскувача або аплікатора для внесення добрив. Від дослідження ґрунту до створення карти-завдань потрібно пройти декілька цікавих кроків: сканування ґрунту для виявлення неоднорідностей поля, створення стратегії, щодо відбору проб на аналіз ґрунту в зонах цих неоднорідностей, а після отримання результатів з лабораторії — сформувані карту-завдання для внесення добрив.

Проаналізувати результат стратегії можна через супутниковий або безпілотний моніторинг культур протягом вегетації або через карти врожайності отримані з комбайна.

Карта завдання - географічна карта, яка містить інформацію про норми внесення або висіву, завдяки якій контролери встановленні на техніці можуть застосовувати відповідну норму до певного місця з використанням навігаційних приладів в реальному часі.

Для створення таких карт нині існує безліч додатків, проте найпопулярнішими є FieldView від Climate, Farm Works від Trimble, SMS від AG Leader, інші GIS програми типу QGIS.

Розглянемо найпоширеніший спосіб складання карт, взявши за основу агрохімічний аналіз ґрунту, оскільки він дає можливість швидко зреагувати на отриманий результат.

Наприклад, компанія Agrilab для детального обстеження ґрунтового покриву, оцінки рівня його неоднорідності та доцільності впровадження технологій змінних норм внесення добрив використовує сітку з елементарною ділянкою в 10 га, але часто використовує меншу сітку від 5 до 3 і навіть 1 га: чим більш неоднорідні умови (ґрунти, рельєф, зрошення та ін), тим більша деталізація повинна використовуватися.

Наступний етап — створення карти-завдання. До цього етапу потрібно визначити зони з різним потенціалом за урожайністю та рівнем забезпечення елементами живлення, визначити форму добрив і норму для диференційованого внесення на кожну неоднорідну ділянку поля.

Диференційоване внесення комплексних добрив передбачає вплив на зони внесення всіх елементів, що входять до його складу. Наприклад: вносимо сульфоамофос і закриваємо потребу у фосфорі. Відповідно внесені елементи впливають на норму внесення азоту і сірки.

Наприклад, на картах-завдання є зона, де потреби у фосфорних добривах немає. Ця ділянка займає 11% всієї площі. Якби на цю зону внести середньозважену норму сульфоамофосу ми б отримали перевнесення 254 кг/га. В зоні із внесенням 222 кг/га перевнесення становило б 32 кг/га, а в зоні з потребою 319 кг/га — недовнесли 65 кг/га. В цілому, за диференційованого внесення добрив економія сульфоамофосу становить 1,35 т. При цьому на ділянки внесено стільки, скільки потрібно для оптимізації умов росту і розвитку.

1.2 Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин

Фізіологічна й агрохімічна школа мінерального живлення рослин поєднує в єдине ціле енергетичні потоки абіотичної та біотичної природи в ґрунтовому середовищі, які можуть бути природною властивістю, що не підлягають усвідомленому регулюванню (тепло, світло, механічний і гранулометричний склад ґрунту та ін.), та контрольовані людиною чинники у вигляді добрив, стимуляторів росту, ґрунтової біоти, зрошення, осушення тощо.

Культурні рослини завдячують своїми процесами росту як природним, так і регульованим потокам енергії. Створення комфорту для їх розвитку в обробітку ґрунту, мінеральному живленні, боротьбі з бур'янами і хворобами дає імпульс для встановлення таких систем землеробства, які відповідають рівню технічного прогресу і культури суспільства. В подальшому у дію вступають закони фізіології, біохімії росту і розвитку культур та пристосування до них найперспективніших технологій. На сьогодні таким вимогам відповідає відновлювана система удобрення, що передбачає оптимізацію мінерального живлення рослин з урахуванням біологічних властивостей сільськогосподарських культур та ґрунтово-кліматичних умов.

Функції мінерального живлення рослин виконує не тільки коренева, але й листкова поверхня рослини, яка здійснює процеси фотосинтезу. Через листкову поверхню можливе надходження до рослини хімічних елементів і сполук, що помітно впливають на ріст та розвиток рослин. Інтенсивність цього процесу залежить від абіотичних і біотичних чинників навколишнього середовища – температури повітря, вологості ґрунту, концентрації CO₂, віку рослини. На цьому принципі побудовано технологію позакореневого підживлення вегетуючих рослин хелатними розчинами, макро- і мікроелементами та стимуляторами росту. Ці препарати у малих дозах

забезпечують високий ефект у сівозміні на урожайність сільськогосподарських культур.

Відновлювана система землеробства передбачає обов'язкове залучення до позакореневого удобрення розчинів макро- і мікроелементів та стимуляторів росту, виготовлених на органічній основі. Застосування бактеріальних препаратів для оброблення насіння та позакорневих підживлень розчинами макро- й мікроелементів і стимуляторами росту забезпечує можливість підвищення продуктивності сівозміни [8]. У сучасних уявленнях щодо мінерального живлення рослин надається значна увага утворенню на коренях рослин мікоризи – симбіозу кореневої системи з деякими ґрунтовими грибами [11].

Взагалі абіотичні і біотичні чинники забезпечують біологічну активність ґрунтів – сумарне поняття, яке включає кількісний і видовий склад мікрофлори, 3. Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин 15 ферментативну активність, дихання, а також амоніфікуючу, нітрифікуючу і азотфіксувальну здатність ґрунту.

Раціональне застосування добрив, з метою оптимізації мінерального живлення рослин, передбачає рівень родючості і окультурення ґрунтового покриву. Розрахунок оптимальних доз мінеральних добрив прийнято виконувати для ґрунтів за середнього забезпечення основними елементами живлення. В той самий час ґрунтовий покрив України відзначається дефіцитом азоту на всіх землях в обробітку. Площі ґрунтів з низьким вмістом рухомого фосфору за результатами VI туру агрохімічного обстеження (1991–1995 рр.) становили 8,3% обмінного калію – 7,6%, підвищеним – відповідно 27,9 і 33,1%. Середньому рівню забезпечення P2 O5 відповідає 44,5 і K2 O – 23,6% площі земель в обробітку.

У зв'язку зі строкатістю потенційної родючості ґрунтового покриву та необхідністю одержання гігієнічно чистої продукції для дитячого і дієтичного

харчування розроблено критерії з надання статусу спеціальної сировинної зони та контролю за її використанням. Інститутом агроекології і природокористування НААН визначено, що для ґрунтів середнього гранулометричного складу вміст азоту за нітрифікаційною здатністю повинен становити понад 15 мг NO₃ /кг ґрунту, рухомого фосфору (за Кірсановим або Чириковим) – понад 100 мг/кг, за Мачигінім – 30 мг/кг, рухомого калію, відповідно 120 і 80 мг/100 г ґрунту [13]. Тобто якісні показники повинні відповідати середнім значенням за забезпеченням ґрунту азотом, фосфором і калієм. Сприятливий агрохімічний фон для вирощування сільськогосподарських культур, крім поживного режиму, визначається і реакцією ґрунтового розчину. На ґрунтах із кислою або лужною реакцією урожайність у 1,6–2 рази нижча порівняно з вапнованим фоном [12].

Відсутність хімічної меліорації таких земель може знівелювати будь-які технології і досягнення урожайності рослин до низьких показників через несприятливе середовище ґрунтового розчину. На сильнокислих ґрунтах (рН_{сол.} < 4,5) «запрограмовано» зниження урожайності на 0,34, на середньокислих – до 0,26 т/га зернових одиниць і таке саме підвищення урожайності – лише за проведення вапнування. Тому планування оптимізації мінерального живлення рослин є багатофакторною проблемою, де знання ґрунтових умов і фізіології формування врожайності ідуть поруч.

Вступивши у фазу росту рослина активно поглинає поживні елементи, які у сотні разів перевищують швидкість дифузії та осмосу. Так, вуглекислота від кореня до листя пересувається за 10–15 хв. Ще швидше надходять до кореневої системи елементи живлення, включаючи і внесені з добривами в ґрунт. Надходження 16 З. Агрономічні аспекти мінерального живлення рослин міченого фосфору (P32) від коренів до листка становить 2 хв. Основою мінерального живлення рослин є катіонний обмін, при якому внаслідок процесу дихання на поверхні корневих волосків виникають нові порції H⁺ і

HCO_3^- , що спонукає K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ негайно вступати в обмінну реакцію, витісняючи з поверхні волосків H^+ . Аніони NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^- , обмінюються і витісняють у розчин HCO_3^- . Поживні речовини надходять у рослину не лише пасивно, але й активно, процес мінерального живлення рослин не лише фізичний, а й фізіологічний.

Рослинні притаманна вбирна здатність до більшого споживання тих елементів, які їй потрібні, і меншого – тих, які не є необхідними. В житті рослини визначають періоди її розвитку – критичний, який часто спостерігається на початкових фазах росту, і період максимального споживання поживних речовин, що визначає важливість диференційованого застосування азотних добрив, як мобільної частини мінерального живлення рослин.

Важлива роль добрив у процесах раціонального споживання рослиною води. Як правило, вони знижують її витрати на одиницю врожаю на 10–20% порівняно з фонами без добрив. Щодо застосування добрив, зокрема, азотних, існують чинники, що визначають їх ефективність: 1) зовнішні чинники – рівень вологи, забезпеченість іншими макро- і мікроелементами; 2) внутрішні фізіологічні чинники – активність ферментів, відповідальних за первинне засвоєння мінерального азоту, нагромадження проміжних продуктів азотного обміну, транслокація сполук та гормональний обмін.

Специфічність азотного живлення в тому, що для рослини діапазон оптимального його засвоєння досить вузький і для неї можуть бути шкідливими як нестача так і надлишок цього елемента. Внесення фосфору у значних кількостях менше впливає на рослину, і тому фосфорні добрива рекомендують вносити «в запас» на декілька років. Однак процес зафосфачування ґрунту є небажаним, адже тоді виникає дефіцит у живленні рослин залізом і мікроелементами внаслідок зв'язування їх у нерозчинні сполуки. Визначено, що ефективність локального внесення фосфорних добрив

пов'язана з контактуванням незначної частини кореневої системи з легкодоступною фосфорною кислотою, зосередженою у підвищеній концентрації локально. Ось чому коефіцієнт використання поживних речовин найвищий за рядкового або локального внесення добрив. Відомо, що за посилення азотного живлення рослин наростання надземної частини відбувається більше, ніж кореневої системи. Так, у польових дослідях з кукурудзою встановлено, що у фазі цвітіння за внесення 67 кг/га N довжина коренів була на 69% більшою, ніж за дози азотних добрив 224 кг/га N. 3.

Поглинання рослинами азоту відбувається за участю нітратредуктази (НР) переважно у нітратній формі [18]. У кореневій системі відбувається відновлення нітратів до аміаку, який використовується на утворення амінокислот і амідів та у формі цих органічних сполук надходить в надземну частину рослин. За надлишкового азотного живлення НР не може впоратись з відновленням нітратів, і тоді у вегетативних органах, а також соковитих плодах нагромаджується значна кількість нітратів, які можуть бути шкідливими для людини і тварин. У цьому напрямі для фізіологів є перспективним напрям наукових досліджень із пошуку підвищення активності НР за регламентованого застосування добрив.

Активність ферменту нітратредуктази виявляється «вузьким місцем» в ланцюгу трансформації неорганічного азоту, обмежуючи ефективно застосування підвищених доз азотних добрив. Відсутність очікуваної ефективності від застосування високих доз мінеральних добрив за інтенсивного ведення сівозміни пов'язано з комплексом причин: 1) підвищення концентрації ґрунтового розчину, 2) порушення оптимального співвідношення хімічних елементів у ґрунтовому середовищі, що виникає за високих концентрацій; 3) недостатня водозабезпеченість; 4) нестача вуглекислого газу в процесі вуглецевого живлення рослин; 5) надлишкове розростання вегетативної маси надземної частини рослин, що понижує

інтенсивність фотосинтезу та призводить до вилягання злакових культур; б) розвиток хвороб і шкідників.

1.3 Особливості застосування мінеральних добрив

За будь-яких систем землеробства (крім органічної) застосування мінеральних добрив залишається основною частиною підвищення потенційної і актуальної родючості ґрунту. Привнесення відшкодованої з урожаєм частини поживних речовин можна компенсувати лише внесенням мінеральних добрив, адже органічні місцеві ресурси є поповненням вже використаних попередніми культурами поживних речовин.

Мінеральні туки знайдуть своє місце в інтенсивному і відновлювальному землеробстві, за ведення точного землеробства і за впровадження no-till – технологій. Залежно від технологічного оснащення і спеціалізації господарства перспективними залишаються прості азотні, фосфорні й калійні добрива у гранульованій формі: аміачна селітра, карбамід, суперфосфат, калій хлористий. За фізичним станом мінеральні добрива бувають тверді й рідкі, порошкоподібні і гранульовані. За хімічним складом – прості й комплексні – складні (хімічні сполуки), до яких відносять амофос, діамфос, калійна чи натрієва селітра, комбіновані – нітроамфоска та ін. Змішані добрива виготовляють шляхом механічного перемішування гранульованих або порошкоподібних добрив.

Сучасний ринок агрохімікатів в Україні пропонує широкий асортимент змішаних добрив, який не завжди відповідає потребам збалансованого мінерального живлення рослин, а в умовах виробництва часто не дотримуються середніх оптимальних доз мінеральних добрив під сільськогосподарські культури.

Способи і строки внесення мінеральних добрив мають відмінність у тому, що під зяблевий обробіток ґрунту пропонується майже повністю

виключити внесення азотних мінеральних добрив, крім 20% дози азоту під пшеницю озиму після гірших попередників за низького забезпечення ґрунту цим елементом. Це пов'язано з непродуктивними втратами азоту внаслідок денітрифікації і вимивання сполук азоту за межі кореневмісного шару ґрунту. Всю дозу азоту слід внести під ярі культури навесні у передпосівну культивуацію.

Згідно із існуючими рекомендаціями і біологічними особливостями культур пропонується внесення в рядки переважно суперфосфату або амофосу в межах 10–15 кг/га P₂O₅, а під окремі культури (кукурудза 20–40). Основні види добрив у сучасному землеробстві на зерно і силос, буряки цукрові й ріпак) – по 10–15 кг/га повного мінерального удобрення у співвідношенні 1:1:1. Для зони Полісся в першому мінімумі є азот, а в другому – калій, що визначає і склад співвідношень. На кислих ґрунтах слід уникати внесення фізіологічно і хімічно кислого добрива сульфату амонію.

Для різних ґрунтово-кліматичних зон важливо дотримуватись встановлених оптимальних співвідношень NPK, що дає можливість зосереджувати мінеральні добрив без зменшення їх продуктивності. Розроблені раніше наукою оптимальні дози добрив під сільськогосподарські культури визначали потребу у них згідно з виносом поживних речовин середнім врожаєм за умови періодичного внесення підстилкового гною, якого було вдосталь. На сьогодні за відсутності промислового тваринництва вся побічна продукція залишається на полі (солома, стебла, гичка тощо).

1.4 Аналіз досліджень внесення добрив за технологіями змінних норм

На думку економістів, однією з найприбутковіших стратегій для управління рН ґрунту є застосування VRA. Реакція врожайності на рН ґрунту унікальна тим, що врожайність може зменшуватися як при надто низьких, так

і при надто високих рівнях рН. Отже, існують збитки через врожайність за недостатнє або надмірне внесення вапна; таким чином, підвищена точність означає вищі врожаї. Подібним чином цей додатковий штраф (за надмірні ресурси) може бути штучно накладений на інші культури та ресурси у формі екологічних норм і податків, значно збільшуючи потенційні економічні вигоди від точного землеробства.

Аплікатори, які використовують VRA (внесення зі змінною нормою) для сухих хімічних речовин (вапняні добавки та поживні речовини (азот, фосфор і калій, NPK)) включають як обертові розкидачі, так і пневматичні аплікатори. Спиннерні розкидачі з одним корпусом бункера змінюють лише один продукт за раз. Конвеєрна стрічка або ланцюг передає матеріал. Їх ефективність може бути ускладнена залежно від погодних умов, доступності поживних речовин і сезонних циклів.

Ми розглянемо основні поживні речовини та розглянемо, чому деякі з них більш імовірно застосовуються з VRA. Внесення фосфору (P), ймовірно, є другим за прибутковістю напрямом VRA. Фосфор у ґрунті не такий швидкоплинний, як азот у ґрунті (N), що означає, що ґрунтові випробування сіткою можна використовувати протягом кількох років. Крім того, є докази того, що довгострокові економічні вигоди можуть виникнути від накопичення фосфору в ґрунті.

Ця характеристика капітальних вкладень у фосфор для ґрунту означає, що часто буває вигідно виявити суттєві відмінності у вмісті фосфору при дослідженні ґрунту в межах поля — принаймні в один момент часу.

Рівень застосування виробниками VRA для управління азотом (N) є низьким, незважаючи на потенційні економічні та екологічні переваги цієї практики.

Основною перешкодою є те, що рекомендовані норми внесення азотних добрив на основі цільової врожайності часто погано співвідносяться з

фактичними економічно оптимальними нормами азоту. Схеми реагування на азот часто залежать від поля та сезону та можуть значно відрізнятись в межах одного поля, що ще більше ускладнює розробку карт-завдань.

Порівняння рівномірного та VRA-N менеджменту не виявило жодних постійних переваг для обох стратегій щодо досягнутої врожайності, рентабельності, використання азоту на всьому полі чи ефективності використання азоту рослинами.

У майбутньому краще розуміння часових коливань рівня азоту в ґрунті під час випробувань, кращі моделі імітації посівів і вдосконалене обладнання для вимірювання вмісту азоту та внесення можуть допомогти виробникам отримати переваги управління VRA-N. Датчики культури в режимі реального часу пропонують найбільший потенціал для VRA-N, оскільки ці системи розроблені для «відчуття» потреби культури в азоті під час внесення. Ці системи вимагають добре удобрених ділянок у полі для калібрування датчика. Триваючі дослідження визначатимуть, чи будуть ці системи широко використовуватися в майбутньому.

Кожного сезону виробники кукурудзи повинні визначитися з правильною кількістю азотних добрив для внесення на свої поля. Сучасне обладнання для внесення з підтримкою GPS і відповідні інструменти точного землеробства створили ще одне рішення для виробників: вносити азот рівномірно чи за допомогою VRA на полях. Пристосування норм внесення азоту для більш точного задоволення потреб урожаю має підвищити прибутковість, зменшити ризик для навколишнього середовища та може призвести до вищої та сталішої якості зерна. Однак темпи впровадження змінного внесення азоту відстають від інших практик точного землеробства. Нещодавні університетські дослідження показали чому: управління азотом у субрегіонах полів або навіть у цілих полях є складним процесом і кидає виклик деяким давнім переконанням щодо управління поживними речовинами.

Ключем до успіху та можливого впровадження управління азотом зі змінною нормою буде розробка критеріїв прийняття рішень, які зможуть точно передбачити норми азоту для субрегіонів кукурудзи, пшениці, рису, бавовни та інших культур, які є економічно оптимальними та екологічно стійкими.

У середині 2000-х років багато дослідників очікували, що розробка точних рекомендацій щодо азоту для субділянок полів стане визначеною.

Частково цей оптимізм впливає з розробки багатьох нових інструментів для регулярного вимірювання характеристик ділянки, які безпосередньо впливають на стан азоту в культурах, запас азоту в ґрунті та продуктивність культур. Це включало передсезонні та пізньовесняні випробування нітратів у ґрунті, пізні випробування на нітрати в стеблах, дистанційне зондування властивостей культур і ґрунту, дані про конкретні ділянки від моніторів врожайності та карти електропровідності ґрунту.

Однак, щоб ці нові просторові інструменти були ефективними, встановлені карти азоту, які вони допомогли створити, повинні бути точними та застосовуватися з року в рік.

Перші стратегії азоту зі змінною швидкістю мали проактивний, директивний підхід. Поля були розділені на менші субділянки, а методи, розроблені для управління азотом у цілому, застосовувалися до цих окремих «зон управління». Карту-завдання змінної норми азоту було розроблено до вегетаційного періоду, а добрива вносили у звичайний час. Ці підходи включали використання сіткового відбору проб ґрунту та зон продуктивності сільськогосподарських культур. Загалом багато досліджень виявили:

- Немає постійної переваги в доходах ані для VRA, ані для стратегій азоту з єдиною нормою внесення.
- Стратегія використання азоту не вплинула на врожайність.
- Норми азоту в усьому полі були подібними для обох стратегій.

- Післясезонні рівні нітратів у ґрунті не були помітно знижені при використанні VRA-N.

- Будь-яка стратегія може перевершити іншу в певний вегетаційний сезон, залежно від пов'язаних з культурою умов.

Зрозуміло, що необхідні додаткові дослідження, щоб мати можливість передбачити моделі реакції азоту в польовому масштабі.

Другий підхід до управління азотом на конкретній ділянці передбачає реагування на фактичний рівень азоту на полях під час вегетації. Вміст азоту в посівах контролюється майже в режимі реального часу, і азот вноситься лише тоді і там, де це необхідно. За допомогою цього методу для відображення азотного стресу рослини використовується коефіцієнт відбивання світла або вміст хлорофілу в рослині або рослині. Цей підхід може використовувати дистанційне зондування зображень сходів і, як правило, вимагає наявності на полі відповідної «еталонної смуги», удобреної азотом. Цікаво, що ці оптичні методи створюють сезонні карти внесення азоту, які базуються на азотному стресі культури, а не на прогнозованому рівні врожайності.

Нові стратегії управління азотом будуть прийняті, якщо вони знижують ризик і є доступними, точними, простими у використанні та екологічно стійкими. Для виробництва кукурудзи це, ймовірно, виключає використання сіткового відбору проб ґрунту на вміст азоту через вартість відбору та аналізу та обмежений термін служби результатів проби.

Майбутнє використання будь-якого алгоритму рекомендацій щодо азоту на основі цільової врожайності, індексу продуктивності або типу ґрунту слід ретельно оцінити на точність і надійність у польових умовах. Технологія, доступна для зміни норм внесення азотних добрив на полі, ймовірно, перевищує знання про те, як її найкраще використовувати. Коли нарешті досягнуть успіху, стратегії внесення азоту зі змінною нормою необхідно буде

ретельно адаптувати відповідно до місцевих ґрунтових, кліматичних, екологічних та агрономічних умов.

Для внесення азоту з використанням GreenSeeker концепція полягає в тому, що кількість добрив, необхідну в певному місці в межах поля, можна визначити, використовуючи смугу, збагачену азотом, під час посадки або незабаром після неї та порівнюючи просторову мінливість росту культур по всій території. Поле для росту культур із смуги азоту. Багата азотом смуга забезпечує територію, в якій азот не є фактором, що обмежує врожайність. Збагачена азотом смуга впроваджується шляхом вибору однієї смуги, яка перетинає поле (зазвичай один прохід обладнання для внесення добрив), щоб отримати норму внесення азоту під час посадки. Потім під час обробітку дані NDVI збираються зі смужки, збагаченої азотом, для калібрування системи датчика культури. Згодом, коли аплікатор добрив охоплює поле, датчики зчитують значення NDVI, порівнюють їх зі значеннями NDVI зі смуги, збагаченої азотом, і вносять відкориговану кількість азоту.

Наприклад, якщо значення NDVI у збагаченій азотом смужі було 0,5, але було 0,6 у певному місці в межах поля, азот не буде внесено, оскільки датчик визначив, що доступного азоту вже достатньо. І навпаки, якщо смужка, збагачена азотом, мала 0,5 NDVI, а інше місце в межах поля мало 0,4 NDVI, тоді азот буде застосовано в цій області. Нещодавно було рекомендовано використовувати калібрувальну смужку з нахилом. Замість багатой азотом смуги, що складається з однієї норми по всьому полю, діапазон норм азоту застосовується по всьому полю. Це забезпечує перевагу в тому, що виробники можуть бачити фактичну реакцію на діапазон норм азоту та коли вони встановлюють діапазони для змінних норм внесення, вони мають більше інформації про те, як належним чином встановити перерви для різноманітних норм азоту.

Внесення добрив є значною витратою на при вирощуванні агрокультур. Неправильне використання факторів виробництва призводить до значних прямих економічних втрат, а також відображається в забрудненні навколишнього середовища, а саме водою. Відцентровий розкидач добрив є дуже важливим вибором для виробників у всьому світі. Причиною популярності цих машин є їх низька ціна, простота обслуговування та досить велика робоча ширина. Ці розкидачі використовувалися переважно для рівномірного внесення добрив на поле. Через високу мінливість поживних речовин (азот, фосфор і калій) і рівнів врожайності на більшості сільськогосподарських полів (показано на картах полів), рівномірне внесення добрив, ймовірно, призведе до надмірного внесення добрив в одних областях і неадекватного внесення в інших.

Технологія просторово змінної норми може покращити економічну віддачу на додаток до зменшення введення небажаних хімічних залишків у навколишнє середовище. Завдяки зростаючій турботі про навколишнє середовище та природному бажанню аграріїв бути економічними, внесення добрив на конкретну ділянку стало дуже важливою темою сільськогосподарських досліджень.

Коли добриво вноситься відповідно до вимог конкретної ділянки, вимивання в ґрунт і поверхневі води зводиться до мінімуму, в той же час зберігається значна кількість добрив. Технологія зі змінною нормою (VRT) супроводжується унікальними можливостями та труднощами. Однією з цих труднощів є відхилення фактичної кількості поживних речовин, що вноситься у порівнянні з бажаною.

Похибка внесення є функцією багатьох факторів, включаючи, але не обмежуючись конструкцією та ефективністю обладнання для внесення, щільністю та однорідністю поживних частинок і швидкістю вітру. Похибка внесення також частково пов'язана з реакцією обладнання для внесення на

різні вимоги норми в полі. Помилка внесення поживних речовин збільшується в середовищі зі змінною нормою внесення, коли норма внесення змінюється. Компоненти обладнання VRT не реагують миттєво на зміни бажаної норми внесення. Такі фактори, як робоча швидкість, алгоритм контролера, конструкція та конфігурація системного контролера та приводів, робоча ширина та фізичні характеристики використовуваних добрив, впливають на загальну динамічну поведінку обладнання VRT.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У період з 2023 по 2024 рік поле площею 6 га було інтегровано в проект точного землеробства з метою демонстрації нових технологій змінної норми внесення добрив (рис. 1). У жовтні кожного року постійні біорізноманітні поля удобрювали (19% суперфосфату) диференційованим способом залежно від концентрації фосфатів у ґрунті (P_2O_5) наприкінці циклу росту (травень-червень). Метою було поступово збільшити концентрацію P_2O_5 у ґрунті приблизно до 100 мг/кг. Для цього вносили добрива зі змінною нормою за допомогою відцентрового розкидача Vicon RS-EDW. Він обладнаний двома дисками, що обертаються в протилежних напрямках. Цей відцентровий розподільник добрив містить систему зважування з 5 тензодатчиками в нижній частині бункера, що дозволяє вимірювати масу добрива в бункері кожні півсекунди, як тільки маса потоку розподільника починає змінюватися.

Ця інформація є важливою для регулювання бажаної щільності добрива, яке буде внесено, відповідно до рівняння (1). Коли оператор змінює швидкість руху, мікропроцесор змінює ступінь відкриття дозувальних пластин (див. рис. 2).

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

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

Також використовувалося таке обладнання: стандартний контролер Ferticontrol; трактор Massey-Ferguson 6130 (63 кВт), оснащений системою Lightbar, приймачем Garmin GPS/DGPS 16 та системою точного землеробства FieldStar. Карта-завдання зазвичай складається з аналізу географічної інформаційної системи (ГІС), використовуючи вимірювання різних відповідних параметрів поля та встановлених зв'язків між обмеженнями

врожайності та економічними обмеженнями. Потім карта-завдання передається на контролер VRT, розташований на консолі оператора.

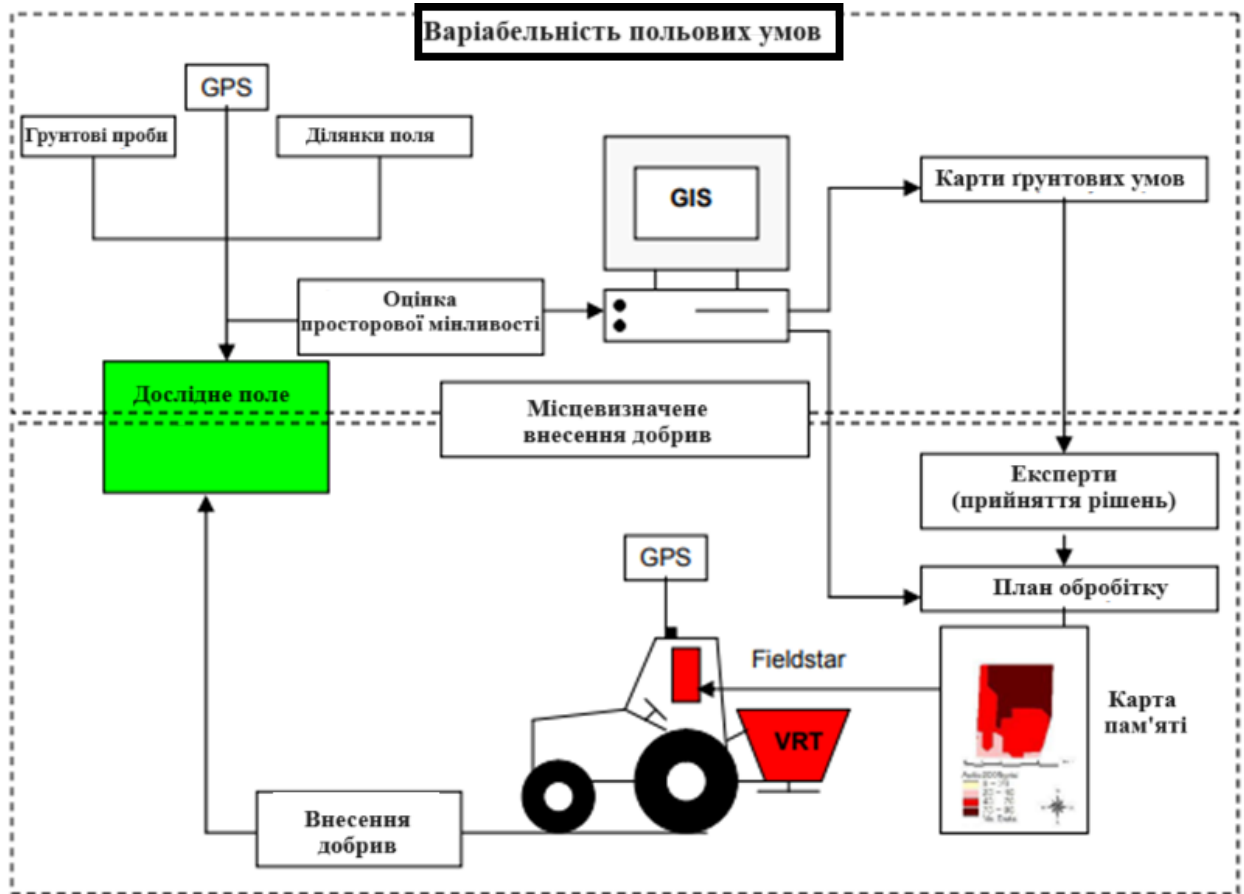


Рис. 1 - Діаграма, що ілюструє організацію експерименту в проекті з точного землеробства

Внесення змінних норм добрив і вапна часто не призводить до позитивного економічного та екологічного впливу. Трьома основними обмеженнями поточних методів є: висока вартість відбору та аналізу ґрунту, що призводить до отримання карт із неадекватною просторовою роздільною здатністю; неадекватні рекомендаційні алгоритми, які були розроблені для макромасштабних сільськогосподарських практик; неефективність техніки та регулювання призвели до помилки у фактичній кількості внесених поживних речовин порівняно з бажаною.

У зв'язку з цим третім обмеженням перед проведенням польових випробувань відцентровий розкидач добрив був протестований у чотири етапи:

- перший етап (калібрування) передбачав створення депозиту для збору добрив, що дає змогу оцінити потужність обох розподільних дисків для подачі потоку добрив, що забезпечує внесення запрограмованої щільності в залежності від швидкості роботи (рис. 3);

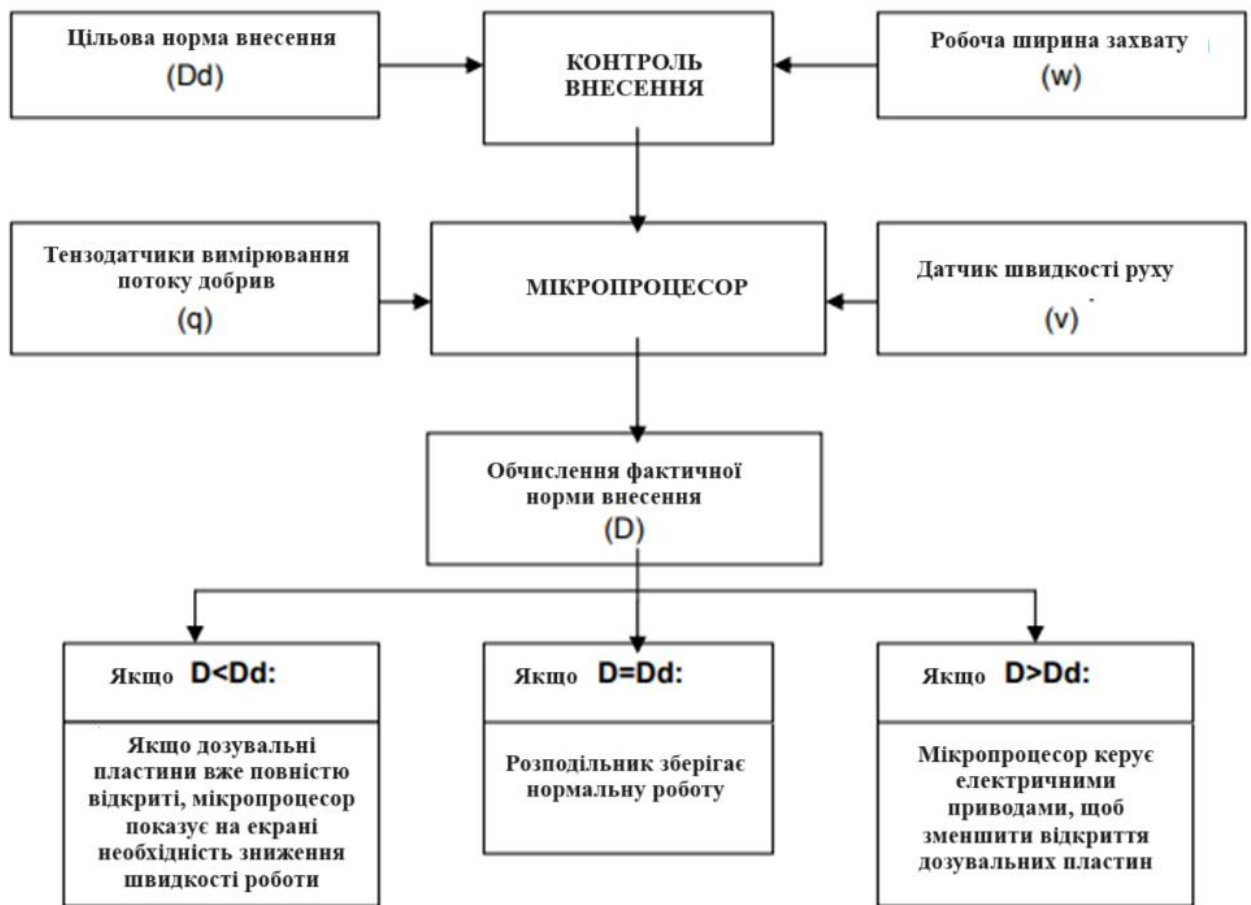


Рис. 2 - Схема керування Vicon RS-EDW

- другий етап включав оцінку оцінюваної схеми розкидання та поперечної рівномірності розподілу відцентрового тукорозподільника з метою встановлення ефективної робочої ширини. Це було виконано шляхом розміщення набору приймачів добрив (лотків) перпендикулярно до лінії, за якою слідував трактор, у якому збирали розподілені добрива; його масу потім

визначали та використовували для отримання кривої розподілу та ефективної вимірюваної робочої ширини розкидача (рис. 4);



Рис. 3 - Польові випробування для оцінки динамічного калібрування відцентрового розподільника добрив Vicon RS-EDW

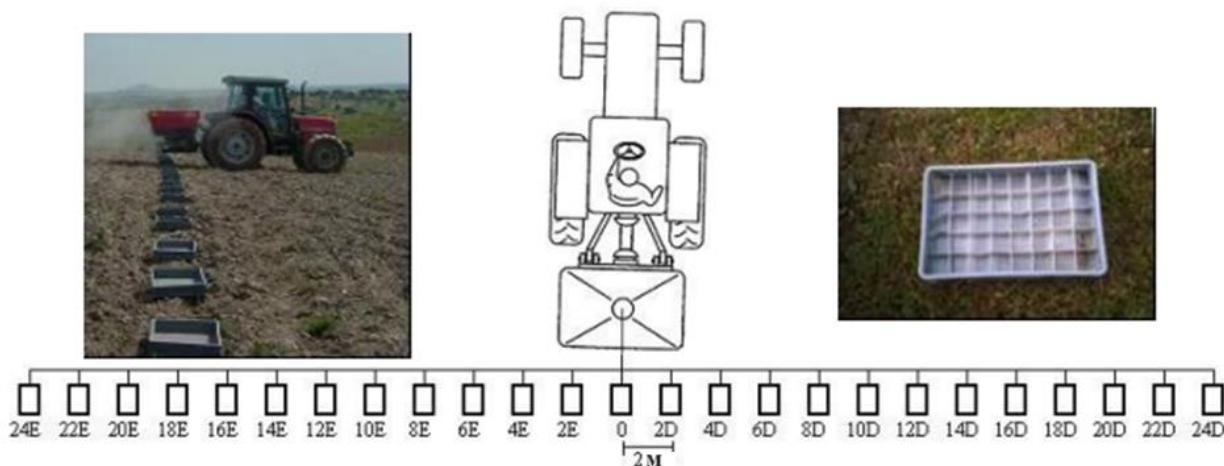


Рис. 4 - Польові випробування для оцінки рівномірності розподілу відцентрового розподільника добрив Vicon RSEDW.

- третій етап включав розміщення набору лотків уздовж лінії, за якою слідував розкидач, щоб визначити перехідну зону між різними нормами внесення (рис. 5); - четвертий етап включав розміщення дванадцяти лотків для збору добрив уздовж шляху розкидача на чотирьох квадратних ділянках дослідного поля, щоб продемонструвати, що змінна норма внесення виконується відповідно до фактичної карти внесення (рис. 6).

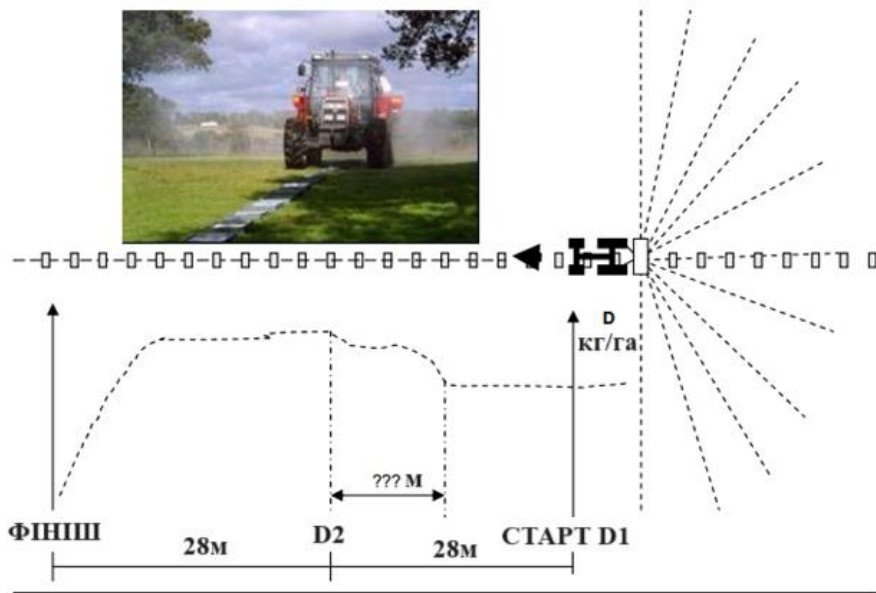


Рис. 5 - Польові випробування для оцінки переходу між різними нормами внесення у відцентрового розкидача добрив Vicon RS-EDW

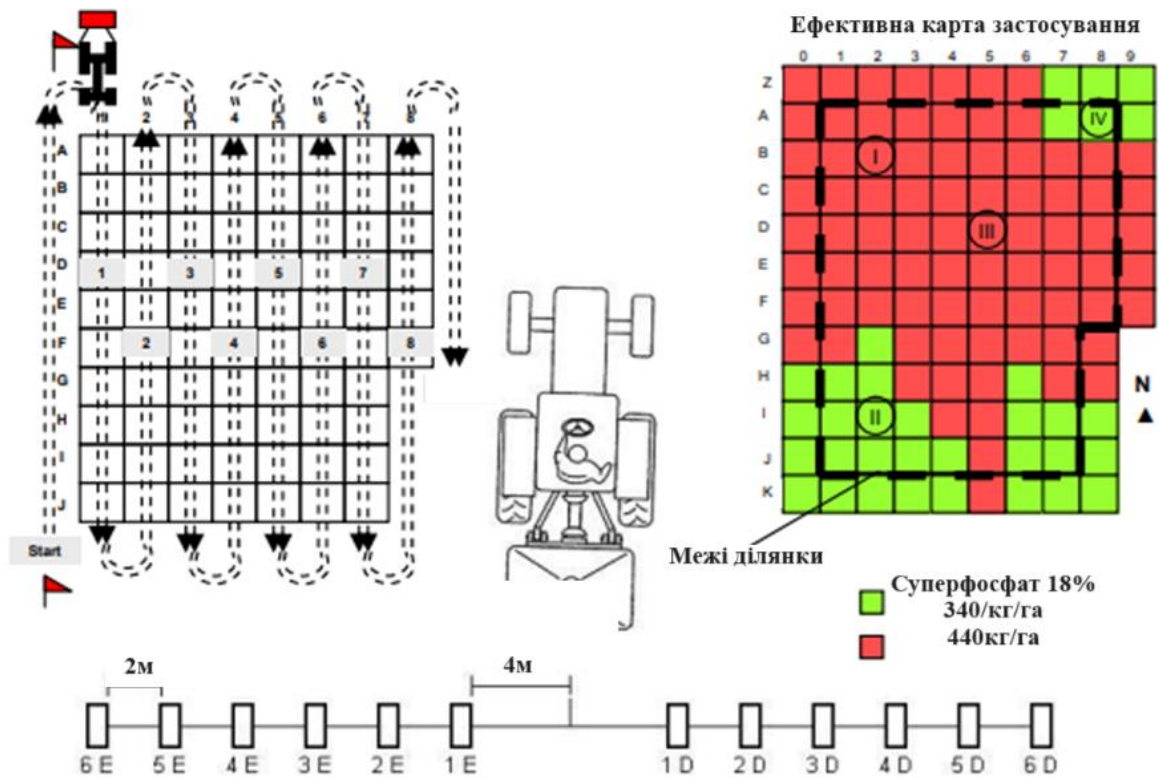


Рис. 6 - Тести для оцінки внесення змінної норми відповідно до фактичної карти обробки

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОЛЬОВОГО ДОСЛІДУ

У таблиці 1 наведено результати п'яти калібрувальних випробувань обох розподільних 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 тестів динамічного калібрування показують значну та систематичну (більше для лівого диска) різницю між нормами внесення дисків (різниця від 12 до 27%; середнє значення приблизно 20%). На рисунку 7 показано різницю між лівою та правою дозуючими пластинами для трьох запрограмованих норм внесення. Цю різницю довелося виправити виробнику, який вніс необхідні зміни в електроприводи (рис. 8). На рис. 9 показано результати польових випробувань поперечного розподілу для 18% суперфосфатного добрива, що призвело до ефективної робочої ширини 28 метрів із коефіцієнтом варіації 15%. Обертання назовні двох дисків у цьому розкидачі створює «пірамідальний» візерунок у поперечному розподілі, з вершиною безпосередньо за трактором, а краї рівномірно звужуються до центру технологічних колій з обох боків. Ці результати продемонстрували, що розкидач добрив мав хорошу однорідність розподілу, враховуючи різні робочі швидкості та різні налаштування.

Поздовжнє випробування в експериментальних умовах роботи (робоча швидкість між 7-8 км/год; використане добриво: 18% суперфосфату) призвело

до середньої відстані переходу у відповідь обладнання для внесення на змінні норми 14 м (рис. 10), що відповідає часу затримки машини від 6 до 7 секунд.

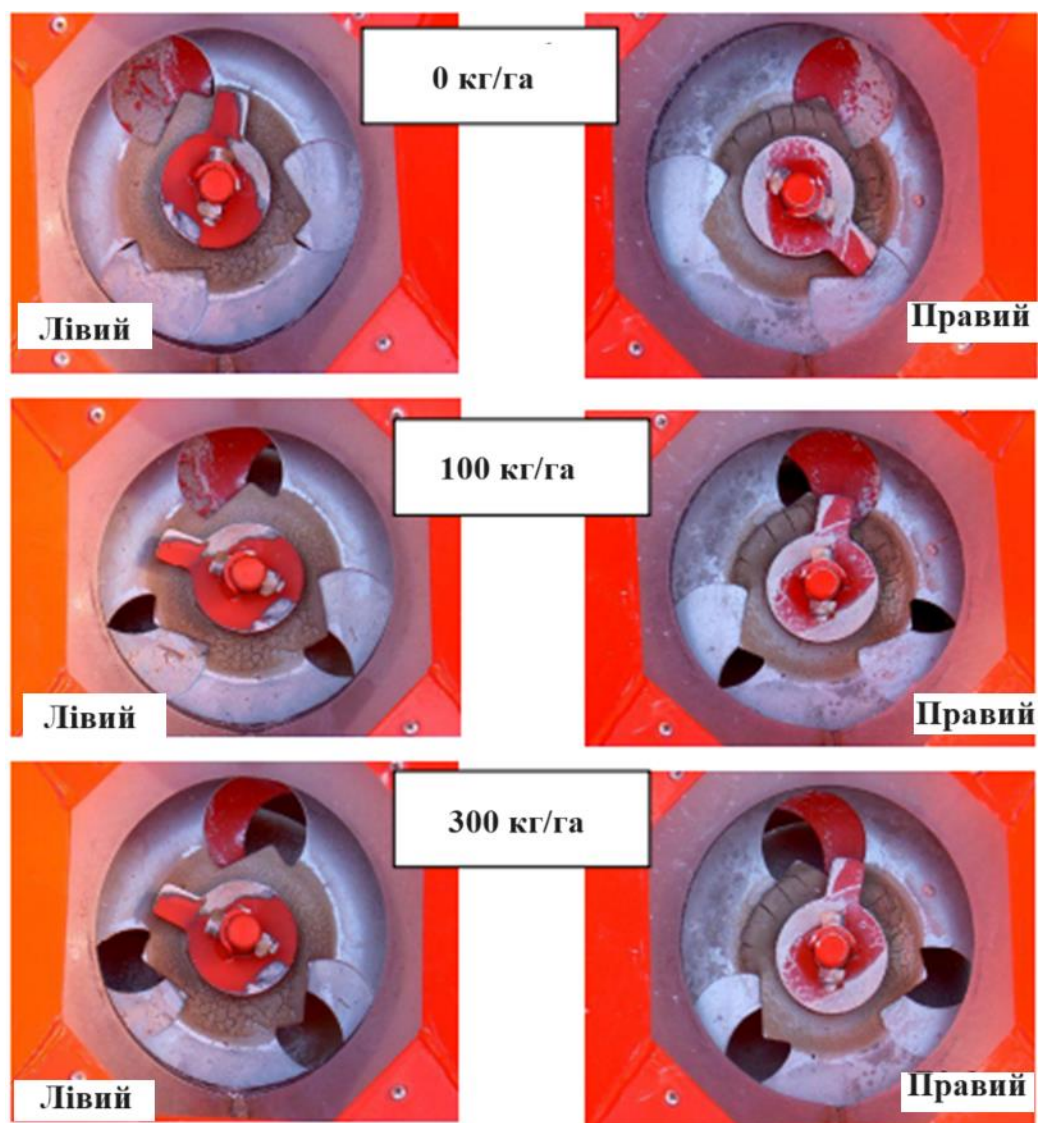


Рис. 7 - Ліва та права дозувальні пластини переходять до трьох запрограмованих норм внесення (0, 100 та 300 кг/га)



Рис. 8 - Доналаштування в електричних приводах

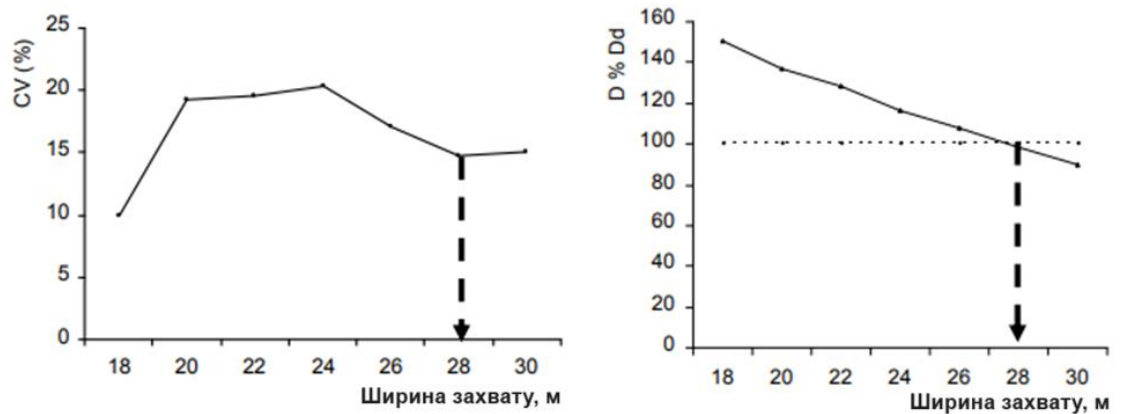


Рис. 9 - Результати польових випробувань для вибору робочої ширини на основі CV і співвідношення між фактичною (D) і бажаною нормою внесення (Dd)

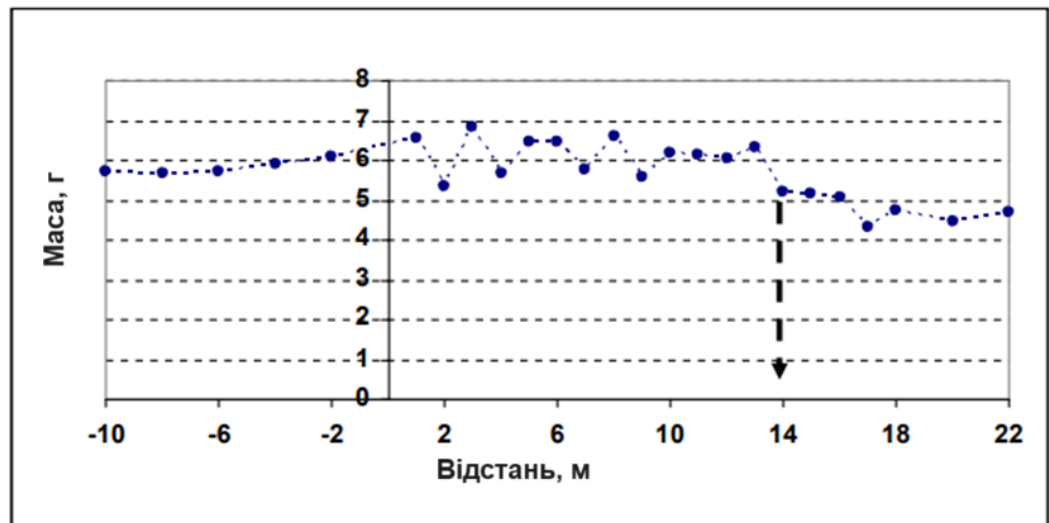


Рис. 10 - Середня відстань переходу обладнання для внесення на різні вимоги (робоча швидкість 7-8 км/год; 18% суперфосфатного добрива)

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

Щоб продемонструвати, що змінна норма внесення виконується відповідно до фактичної карти внесення, дванадцять лотків для збору добрив

розмістили вздовж шляху розподільника на чотирьох квадратних ділянках дослідного поля. Отримані результати (табл. 2) демонструють фактичну щільність внесення добрив 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.

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 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.; 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. 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 таобладнання 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 ресурсу: <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.

Додатки