

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Допущено до захисту

“ ” 2025 p.

Зав. кафедри, д.т.н., професор

_____ Дідур В.В.

Кваліфікаційна робота (дипломна робота)

другий (магістерський)

(освітній рівень)

на тему **«ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛОКАЛЬНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ ЗА ТЕХНОЛОГІЇ НУЛЬОВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ»**

Виконав: студент 2 курсу,

групи 21м-ім

Спеціальність Н7

«Агроінженерія»

Артем АРТИЩЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник Андрій ВОЙТІК

(прізвище та ініціали)

Рецензент Олександр ТРУС

(прізвище та ініціали)

Умань – 2025

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Освітній рівень _____ магістр _____
Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дідур В.В.
“ ____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Артищенко Артему Миколайовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження процесу локального внесення добрив за технології нульового обробітку ґрунту»

керівник роботи _____ Войтік А.В., к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“14” листопада 2023 р. № 01-06/261

2. Строк подання студентом роботи _____ 20.11.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: існуючі способи внесення мінеральних добрив при виконанні технологічної операції сівби.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

провести аналіз існуючих способів та машин для внесення мінеральних добрив;
розробити механізм пошарового внесення мінеральних добрив під час виконання технологічної операції сівби;
дослідити роботу розробленого пристрою з метою визначення оптимальних конструктивних та кінематичних параметрів його роботи;
розробити заходи охорони праці при проведенні операції сівби з одночасним внесенням мінеральних добрив;
техніко-економічне обґрунтування роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 04.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	04.04.25 р.	
2.	Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень	05.05.25 р.	
3.	Розділ 2. Розробка механізму для внесення добрив при виконанні технологічного операції сівби	04.06.25 р.	
4.	Розділ 3. Моделювання процесу внесення добрив розробленим пристроєм	03.09.25 р.	
5.	Розділ 4. Охорона праці	01.10.25 р.	
6.	Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування	16.10.25 р.	
7.	Виконання презентаційної частини роботи	03.11.25 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	20.11.25 р.	

Студент

(підпис)

Артем АРТИЩЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Андрій ВОЙТІК

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Артищенко А.М. Дослідження процесу локального внесення добрив за технології нульового обробітку ґрунту. (Дипломна робота. Умань, Уманський національний університет, 2025: пояснювальна записка на 45 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 19 рисунків, 3 таблиці, 20 джерел).

Об'єкт дослідження – механізм для внесення добрив при виконанні технологічного операції сівби.

Мета роботи – розробка агрегату, який зможе працювати за технологією no-till, з локальним внесенням мінеральних добрив в різні шари ґрунту для забезпечення живлення рослин на різних етапах їхнього розвитку.

У першому розділі “Стан питання і задачі досліджень” наведено огляд існуючих способів внесення добрив та технічних рішень для внутрішньогрунтового внесення добрив, їх переваги та недоліки, та сформовано задачі досліджень.

У другому розділі “Розробка механізму для внесення добрив при виконанні технологічного операції сівби” обґрунтовано конструкцію сошника-глибокорозпушувача з порційним пошаровим внесенням добрив.

У третьому розділі “Моделювання процесу внесення добрив розробленим пристроєм”, перевірено експлуатаційну ефективність розробленого агрегату з пошаровим внесенням добрив, було здійснено моделювання процесу внесення добрив за допомогою програмного забезпечення EDEM.

У четвертому розділі “Охорона праці” розглянуто безпечне виконання операції сівби з одночасним внесенням мінеральних добрив та службу охорони праці на підприємстві.

У п'ятому розділі “Техніко-економічне обґрунтування” розраховано ефект від впровадження запропонованого сошника-глибокорозпушувача.

СІВАЛКА, ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ, NO-TILL, ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	7
1.1. Способи внесення мінеральних добрив	7
1.2. Огляд машин для внесення мінеральних добрив	12
1.3. Висновки і завдання досліджень.....	16
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕХАНІЗМУ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ ПРИ ВИКОНАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОПЕРАЦІЇ СІВБИ	17
2.1. Будова та принцип роботи висівної секції	17
2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів	17
2.3. Висновки до розділу	25
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ РОЗРОБЛЕНИМ ПРИСТРОЄМ	26
3.1. Побудова імітаційної моделі	26
3.2. Методика проведення експерименту	28
3.3. Результати проведення експерименту	28
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	32
4.1. Аналіз травмонебезпечних факторів при сівбі та внесенні мінеральних добрив	32
4.2. Техніка безпеки при застосуванні різних видів мінеральних добрив...	33
4.3. Розробка моделей травмонебезпечних та аварійних ситуацій під час сівби з одночасним внесенням мінеральних добрив	34
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	38
ВИСНОВКИ.....	42
Список використаних джерел.....	43

ВСТУП

Спосіб внесення мінеральних добрив належить до найважливіших чинників, що визначають як продуктивність сучасного сільського господарства, так і ступінь його впливу на навколишнє середовище. Окрім загальної норми, вирішальними є розміщення поживних елементів у профілі ґрунту, час їх аплікації та технологія внесення — всі ці параметри формують ступінь доступності елементів живлення для рослин, інтенсивність ґрунтових біохімічних процесів і шляхи втрат поживних речовин (вимивання, леткі втрати азоту тощо). За умов зростаючого тиску на природні ресурси, жорсткіших екологічних стандартів і прагнення підвищити рентабельність виробництва, оптимізація методів внесення добрив стає одним із стратегічних завдань агротехнологій.

Існує широкий спектр аплікаційних підходів: від рівномірного (суцільного) розкидання по площі до локалізованих методів — прикореневого внесення, стрічкового (banding) розміщення або точкового інжектуювання в зону ряду. Кожен із цих способів по-різному впливає на доступність фосфору, калію та різних форм азоту, на активність мікроорганізмів у ризосфері, на темпи мінералізації органічної речовини та на шляхи втрат елементів у навколишнє середовище. Сумісність методу внесення з типом ґрунту, кліматичними умовами, системою обробітку ґрунту і біологічними особливостями культури визначає кінцеву ефективність прийому.

Локалізовані стратегії внесення добрив — стрічкове (banding), прикореневе та точкове дозування — набувають все більшого значення в практиці точного землеробства. Їхня сутність полягає в подачі поживних речовин безпосередньо в зону кореневого живлення або поруч із насіниною, що дозволяє створити підвищену місцеву концентрацію доступних форм фосфору і калію та забезпечити ефективне поглинання азоту. Через локалізацію джерела живлення знижується ризик його вимивання у глибші шари або у водні об'єкти, зменшуються втрати азоту у вигляді летких сполук, а також часто скорочується загальна норма внесення без втрати врожайності. Крім того, локалізована аплікація поліпшує старт росту рослин, забезпечує кращу енергетичну і матеріальну ефективність технологічної лінії та може знизити загальний екологічний відбиток виробництва.

Водночас успіх локалізованих підходів залежить від точності їх виконання: потрібні якісні сівалки й аплікатори з можливістю banding і VRA (Variable Rate Application), точне позиціонування за допомогою GPS/RTK, відповідна налаштування робочих органів і синхронізація операцій (обробіток ґрунту — сівба — внесення добрив). Необхідно також урахувати обмеження: реакцію конкретної культури на локалізовані дози, ризики фітотоксичності при надмірній

концентрації поруч із насінням, а також специфіку ґрунтових умов (рівень вологості, механічний склад), що впливає на розповсюдження і доступність внесених елементів.

У цій статті системно розглядаються механізми впливу різних способів внесення мінеральних добрив на врожайність і якість продукції, на динаміку ґрунтових процесів і на втрати поживних речовин у навколишнє середовище. Окрема увага приділена перевагам і обмеженням локалізованого внесення, технічним вимогам і прикладним рекомендаціям щодо інтеграції banding- та прикореневих систем у сучасні технологічні лінії точного землеробства з урахуванням агрономічної доцільності, економічної ефективності та екологічної безпеки.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Способи внесення мінеральних добрив.

Нижче наведено детальний, практично орієнтований огляд основних методів аплікації мінеральних добрив з описом принципів дії, технологічних особливостей, переваг, недоліків, вимог до обладнання та екологічних аспектів.

Суцільне (поверхневе) розсипне внесення (broadcast)

Суть: рівномірне розсівання гранульованих або порошкових добрив по поверхні поля ручним або механізованим способом (розкидачі, сівалки-розкидачі). Можлива подальша закладка або залишення на поверхні.

Обладнання: причіпні/навісні розкидачі, сівалки-розкидачі, ручні розсипачі.

Переваги: проста реалізація, швидкість, підходить для великих площ.

Недоліки: великі втрати через вилуговування/вимивання і ветрове переміщення; низька ефективність поглинання при нерівномірних ґрунтах; потребує подальшого закладення на важких ґрунтах.

Екологія: висока ймовірність розповсюдження в навколишнє середовище; небезпечне при дощах невдовзі після внесення.

Закладення в ґрунт (incorporation / tillage incorporation)

Суть: після розсіву добриви механічно закладають у ґрунт (боронування, культивування, фрезерування) на задану глибину.

Обладнання: борони, культиватори, фрези, комбіновані агрегати.

Переваги: зменшення втрат аміачних/азотних форм, покращення контактів добрива з ґрунтом, зниження випаровування.

Недоліки: додаткові технологічні проходи (витрати пального, ущільнення); непридатне для no-till систем.

Екологія: зниження поверхневих втрат, але збільшення енергетичного сліду через додаткові операції.

Стрічкове (banding) внесення

Суть: локальна подача гранул/рідких добрив у стрічку поряд із рядком або під рядок (поперечна або поздовжня стрічка), часто під час сівби або одночасно з нею.

Обладнання: агроштанції banding на сівалках, локалізатори добрив, strip-till агрегати з аплікаторами.

Переваги: підвищена доступність фосфору й калію, кращий старт сходів, зменшення загальної норми внесення, знижені втрати азоту; особливо ефективно на важких і холодних ґрунтах.

Недоліки: ризик фітотоксичності при надмірній локалізації поряд із насіниною; потреба в точному налаштуванні техніки.

Екологія: зменшення вимивання і поверхневих втрат; більш екологічно прийнятний при якісній аплікації.

Прикореневе (starter) внесення

Суть: подача невеликих доз добрив безпосередньо в насіннєве ложе або в прикореневу зону молодих рослин.

Обладнання: сівалки з пристроями starter, точкові аплікатори, інжектори.

Переваги: покращення енергії проростання, швидка доступність поживних речовин під час стартових фаз; економія ресурсів.

Недоліки: обмежені обсяги внесення; потребує гарної координації з глибиною сівби і типом добрива.

Екологія: низький ризик втрат, якщо дотримано відстані до насінини.

Підкормка у фазі вегетації (side-dressing / top-dressing)

Суть: внесення другої/додаткових доз під час росту культури (підживлення азотом в фазах росту).

Обладнання: розкидачі, аплікатори рідких добрив, культиватори з аплікаторами.

Переваги: корегування постачання за фактичними потребами рослини, підвищення ефективності використання азоту.

Недоліки: залежність від погодних умов; може вимагати ряду проходів; ризик пошкодження рослин механічними агрегатами.

Екологія: зменшення втрат при точному визначенні фаз потреби; але ризик вимивання при невдалому таймінгу.

Фертигація / хемігація (fertigation / chemigation)

Суть: внесення розчинених мінеральних добрив через систему зрошення (краплинне, дощувальне, спринклерне).

Обладнання: системи краплинного зрошення з інжекторами/дозаторами, насосні установки, контролери.

Переваги: точна дозована подача, можливість частих малих підживлень, висока ефективність поглинання, економія води при краплинному зрошенні.

Недоліки: вимоги до якості води (фільтрація), ризик засмічення труб, потребує капіталовкладень, управління розчинністю і реактивністю сумішей.

Екологія: при правильному контролі мінімізує вимивання; при неправильному — ризик перенасичення і локального забруднення вод.

Глибоке (subsurface) внесення / інжекція

Суть: доставка добрив у глибші горизонти (під поверхню) за допомогою стріличних сошників, інжекторів або глибокорозпушувачів з аплікаторами.

Обладнання: субсурфейс-аплікатори, інжектори, ripper-bander.

Переваги: зниження випаровування і поверхневих втрат, краща доступність для коренів у посуху, зменшення контакту з рослинними рештками (зниження блокування).

Недоліки: складніше технічно, потребує потужнішої тяги, ризик ушкодження кореневої системи при неправильній глибині.

Екологія: зменшує ризик ерозійних втрат і вимивання у поверхневій воді.

Листкове (фоліарне) підживлення

Суть: розпилення розчинених добрив на листя і пагони; швидка абсорбція мікроелементів і деяких макроелементів.

Обладнання: обприскувачі, дрони, рукавичні баки.

Переваги: швидке коригування дефіциту мікроелементів, застосовне при обмеженому кореновому доступі; економія речовин при малих дозах.

Недоліки: обмежена кількість елементів, що ефективно надходять через листя; короткий ефект; чутливість до погодних умов (дощ, ультрафіолет).

Екологія: локалізована дія з низьким ризиком масштабного забруднення; можливі повітряні дрейфи при обприскуванні.

Точкове (spot) внесення і інжекція в прикореневу зону

Суть: аплікація обмежених доз безпосередньо в точку навколо рослини (посадкові ями, кущі).

Обладнання: ручні/мобільні інжектори, точкові аплікатори.

Переваги: висока ефективність на плодкових, ягідних, садових культурах; економія добрив.

Недоліки: ручна праця або спеціальне обладнання; малопридатно для зернових великих площ.

Екологія: мінімальні втрати при точній аплікації.

Дозоване (variable rate application, VRA)

Суть: змінна норма внесення по карті поля залежно від зони продуктивності, аналізу ґрунту, GPS-даних.

Обладнання: ISOBUS-сумісні контролери, картографія, датчики NDVI, секційні розподільники.

Переваги: підвищення продуктивності та економічна оптимізація; мінімізація перевитрати і екологічних ризиків.

Недоліки: потребує карт продуктивності, агрохімічних даних, початкових інвестицій та компетенцій.

Екологія: значне зниження надлишкового внесення і втрат у зонах підвищеної вразливості.

Внесення у вигляді суспензій, розчинів та рідких форм

Суть: застосування аміачних розчинів, карбаміду, рідких NPK, біурету у вигляді розчинів або суспензій.

Обладнання: баки-розчинники, інжектори, розпилювачі, системи краплинного зрошення.

Переваги: швидке розчинення і доступність, зручність для fertigation, можливість комбінування з ПАР або стимуляторами.

Недоліки: корозійність обладнання, потреба у відповідній техніці, ризик опіків при високих концентраціях.

Екологія: при раціональному використанні — висока ефективність; при неправильному дозуванні — ризик локального забруднення.

Використання гранул з контролюваним вивільненням (CRF, controlled-release fertilizers)

Суть: добрива з матрицею або покриттям, що поступово віддають поживні елементи протягом заданого періоду.

Обладнання: стандартні сівалки/розкидачі, іноді спеціальні висівні механізми.

Переваги: зменшення частоти підживлень, зниження втрат нітратів, покращення відповідності потребі культури у часі.

Недоліки: висока вартість; ефективність залежить від температури ґрунту/вологи.

Екологія: зменшення викидів та вимивання, поліпшення сталості системи.

Дрони та аерозольні аплікатори (для малих ділянок і специфічних задач)

Суть: рідкі/порошкові добрива розпилюються повітряним шляхом безконтактно.

Обладнання: сільськогосподарські дрони з баками, системи точного розпилення.

Переваги: швидкість, мінімальний контакт людини з хімією, доступ до важкодоступних місць, точкові підживлення.

Недоліки: обмежена вантажопідйомність, вплив вітру, потреба в регуляторних дозволах.

Екологія: при точному застосуванні можливе зниження витрат і втрат; ризик дрейфу і нерівномірного розподілу при невідповідних погодних умовах.

Комбіновані технології (strip-till + banding, seeding + banding)

Суть: поєднання операцій (локальна обробка смуги + одночасне внесення добрив + сівба).

Обладнання: strip-till агрегати з аплікаторами, інтегровані сівалки.

Переваги: оптимізація кількості проходів, збереження мульчі між смугами, економічність.

Недоліки: складність налаштування; потреба в синхронізації техніки.

Екологія: сприяє збереженню вологи і зниженню втрат добрив.

Підбір способу внесення за критеріями (коротко)

Тип ґрунту: на легких піщаних — subsurface/banding для зниження вимивання; на важких холодних — starter/banding для доступності Р.

Клімат: у посушливих умовах — subsurface/strip-till banding або fertigation; у вологих — уникають суцільного розсіву перед дощем.

Культура: зернові — banding, side-dressing, VRA; овочі/сад — точкова інжекція, fertigation, CRF; багаторічні — довготривалі CRF або точкове внесення.

Технологія обробітку: no-till — preference для subsurface banding/strip-till і fertigation; класична оранка — закладення після broadcast.

Практичні рекомендації для впровадження

Проводити агрохімічне обстеження ґрунту і зонування полів перед вибором способу.

Комбінувати banding/strip-till із VRA і GPS-навігацією для мінімізації витрат і екологічних ризиків.

Для азотних підживлень застосовувати дробове внесення (split-application) у фазах високої потреби.

Використовувати CRF для культур з довготривалим циклом та в умовах обмежених підгодівель.

Забезпечувати сумісність добрив (реакційність) при змішуванні в баках чи інжекційних системах.

Планувати внесення з урахуванням прогнозу погоди та стану ґрунту (уникати внесення перед інтенсивними опадами).

Висновок

Кожен метод внесення мінеральних добрив має свої технологічні особливості, вимоги до техніки та різні екологічні наслідки. Сучасні тенденції спрямовані на локалізацію внесення (banding, subsurface, strip-till), інтеграцію з fertigation і впровадження VRA/ISOBUS-рішень — це дає змогу підвищити ефективність використання ресурсів, знизити втрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля. Вибір оптимальної стратегії має робитися на підставі агроекологічної діагностики поля, економічного аналізу та технічної готовності господарства.



Рисунок 1.1. Класифікація способів внесення гранульованих мінеральних добрив [5].

1.2. Огляд машин для внесення мінеральних добрив.

Технічно-орієнтований огляд основних конструктивних рішень сучасних аплікаторів для стрічкового (banding/row-placement) внесення твердих (гранульованих, порошкоподібних) та рідких мінеральних добрив. Розглянуто принципи роботи, ключові вузли, варіанти реалізації для різних технологій (strip-till, no-till, conventional), вимоги до агротехніки, експлуатаційні нюанси та можливості інтеграції з системами точного землеробства.

Класифікація та призначення аплікаторів

За режимом роботи: інтегровані (вбудовані) — модулі, встановлені безпосередньо на сівалки або strip-till агрегати; забезпечують одночасну підготовку смуги, внесення добрив і сівбу; автономні рядкові аплікатори — навісні або причіпні блоки, які працюють незалежно від сівалки, часто застосовуються для підживлень чи повторних внесень; причіпні та самохідні бандери — призначені для точного внесення на великих площах із високою продуктивністю.

За видом продукту: для твердих форм (NPK-гранули, аміачна селітра, суперфосфат); для рідких розчинів (аміачні розчини, рідкі NPK, карбамідні розчини); комбіновані системи — оснащені лініями і для гранул, і для рідких препаратів, що дозволяє одночасну аплікацію різних форм.

За позиціюванням стрічки: in-row (підрядне) — безпосередньо під насіниною або в центрі рядка; side-band (бокова стрічка) — 2–5 см від насінини збоку; subsurface banding — глибоке розміщення в смузі на 8–15 см для посухостійкості.

Конструктивні елементи аплікаторів для твердих добрив

Бункери та дозуючі механізми:

вертикальні або горизонтальні бункери з шнековою подачею, барабанні та роликові дозатори; застосовують електро- або гідроприводи для плавного регулювання подачі;

вагові системи або датчики витрати для контролю і реєстрації фактичної норми внесення.

Тракти подачі і розподілу:

шнеки, ланцюгові конвеєри або вакуумні лінії (для дрібних гранул і мікродоз); розподільні колектори під кожну секцію сівалки з індивідуальним підведенням до сошника.

Сошники та формувачі борозни:

різні профілі (V-, U-, клиноподібні), дискові або плоскорізні елементи для прорізання смуги у важких пожнивних рештках;

закриваючі або притискаючі диски/фартухи для герметизації стрічки й запобігання контакту з насінням (особливо важливо при in-row).

Секційна конструкція:

кожна рядкова секція має підвіску (пружинну або гідравлічну) з можливістю самовирівнювання по рельєфу; модульність дозволяє змінювати кількість рядків.

Антиналипні та захисні рішення:

вібратори, чистики, антистатичні покриття, підігрів бункерів; захисні кожухи для запобігання потраплянню соломи між дозаторами.

Автоматика і контроль:

тахометри, датчики кроку/швидкості, вагові датчики, ISOBUS-інтерфейс для VRA; можливість дистанційного калібрування і реєстрації карт внесення.

Конструкції аплікаторів для рідких добрив

Баки і система насоса:

баки різних об'ємів з мішалками, датчиками рівня та підігрівом; насоси шестеренчаті або мембранні з можливістю точного регулювання подачі;

системи «on-demand» змішування з можливістю підключення препаратів у процесі руху.

Розподільчі магістралі та інжектори:

паралельні лінії з електромагнітними або пропорційними клапанами на кожну секцію; інжектори, інтегровані в сошник, вводять розчин в борозну або під її краї.

Фільтрація та самоочищення:

багатоступінчасті фільтри, промивні клапани, системи промивки ліній; легкодоступні фільтри для полегшення технічного обслуговування.

Матеріали і стійкість:

корозійностійкі сплави і полімери, ущільнення та труби стійкі до агресивних реагентів; системи для запобігання піненню.

Електроніка:

контролери потоку, датчики тиску, інтеграція з картами VRA та GPS; можливість дозування по секціям і реєстрація виконаної роботи.

Інноваційні та комбіновані рішення

Strip-till + banding секції:

плоскоріз або дисковий ріппер формує смугу, одночасно в неї інжектуються рідини або закладаються гранули; задній коток закриває і прикочує смугу, забезпечуючи оптимальний контакт добрива з ґрунтом.

Seed-fert інтегровані блоки:

компактні мікробункери біля сошника сівалки для starter-доз; електроприводи дозволяють точне дозування навіть на високих робочих швидкостях.

Subsurface twin-band системи:

пара підрядних стрічок (по боках) на глибині 8–12 см — покращують доступність у посуху і зменшують втрати.

Комбі-модулі (тверде + рідке):

окремі магістралі дозволяють комбінувати гранульовані стартери з рідкими стимуляторами або N-формами в одній операції.

Повністю електронні дозатори з VRA:

індивідуальні електродвигуни на кожному дозаторі, інтеграція з картами зон поля і автоматичне регулювання норми в реальному часі.

Технічні параметри, точність і продуктивність

Точність дозування: сучасні механізми для рідких розчинів досягають похибки $\pm 2\text{--}5\%$; для твердих — близько $\pm 3\text{--}7\%$ (залежить від фракції та умов роботи).

Діапазон норм: твердих — від грамових стартерів на рядок до десятків кг/га для banding; рідких — від кількох літрів на гектар (мікродози) до сотень л/га.

Глибина розміщення: типово 2–6 см для starter/in-row, 8–15 см для subsurface banding.

Робочі швидкості: 4–12 км/год; якісні seed-fert рішення підтримують вищі швидкості без втрати точності.

Тягові і енергетичні вимоги: від 80–300 к.с. в залежності від ширини захвату, типу soil-engagement елементів і маси агрегату.

Агротехнічні та експлуатаційні вимоги

Позиціонування стрічки: для side-band рекомендована відстань 2–5 см від насінини; in-row потребує суворого контролю для уникнення фітотоксичності.

Сумісність із сівалкою та strip-till блоком: необхідна синхронізація глибини й відстані; бажана ISOBUS-сумісність.

Обробка пожнивних решток: для полів із великою кількістю рослинних залишків потрібні дискові або плоскорізнні сошники, що забезпечують чистоту смуги.

Регламент обслуговування: щоденне чищення фільтрів, контроль ущільнень, перевірка чистиків і вібраторів; для рідких систем — промивка між змінами типів розчинів.

Калібрування: обов'язкове тестове калібрування дозаторів в реальних умовах перед масовим внесенням.

Інтеграція з системами точного землеробства та безпека

ISOBUS/RTK-інтеграція: автоматичне відключення секцій, корекція насичення по GPS, ведення електронних журналів внесення, передача даних у фермерські інформаційні системи.

Моніторинг: вагові датчики бункера/бака, датчики потоку рідини, датчики налипання, телеметрія для раннього виявлення проблем.

Безпека: закриті механізми роздачі, аварійне скидання тиску, захист оператора при технічному обслуговуванні, зручні місця для миття рук при роботі з концентратами.

Екологічний контроль: можливість запису карт внесення для звітності та оцінки впливу на навколишнє середовище.

Переваги і обмеження окремих конструкцій

Інтегровані seed-fert рішення:

переваги — синхронність сівби і внесення, економія ходів; обмеження — залежність від сівалки, складність сервісу.

Автономні banders:

переваги — універсальність, можливість адаптації під різні операції; обмеження — додаткові проходи або потреба в координації з іншими агрегатами.

Subsurface injectors:

переваги — зменшення втрат, покращена доступність у посуху; обмеження — підвищені витрати тяги, складність налаштування.

Комбіновані твердо/рідкі блоки:

переваги — гнучкість технології, одночасна аплікація різних типів добрив; обмеження — складність обслуговування та ризик перехресного забруднення ліній.

Електронні VRA-системи:

переваги — економія ресурсів і точність; обмеження — висока вартість, вимога підготовленого персоналу.

Рекомендації при виборі та впровадженні

Визначте агрономічну мету: підвищення старту сходів, економія N/P/K, захист водних ресурсів — від цього залежить конструкція аплікатора.

Оцініть наявну технічну базу: чи сумісна сівалка, чи є можливість ISOBUS/RTK інтерфейсу, чи вистачає тяги.

Тестуйте і калібруйте: робіть пілотні проходи в різних умовах ґрунту і вологості, відпрацьовуйте налаштування дозаторів.

План технічного обслуговування: запасні сошники, вставки, фільтри, ущільнення; навчені екіпажі для швидкої діагностики.

Враховуйте економіку: співвідношення капітальних інвестицій і очікуваної економії добрив/зростання врожайності.

Ринок конструкцій для локального стрічкового внесення добрив пропонує широкий спектр технічних рішень — від простих механічних бункерних дозаторів до високоточних електронних комплексів з інжекцією рідких форм і повною інтеграцією з точним землеробством. Правильний підбір конструкції і налаштувань залежить від агрономічних завдань господарства, типу культур, ґрунтово-кліматичних умов та можливостей технічної бази. Для досягнення максимальної агрономічної, економічної та екологічної користі необхідні ретельне калібрування, регулярне обслуговування, інтеграція з VRA/ISOBUS та поетапне впровадження з пілотними випробуваннями в реальних польових умовах.

1.3. Висновки та завдання досліджень.

Виходячи з вказаного вище, можна зробити висновок, що більш перспективним способом підвищення родючості ґрунтів і урожайності сільськогосподарських культур є локальне внесення гранульованих мінеральних добрив, суміщене з поверхневим обробітком ґрунту та сівбою. Тому метою даної роботи є розробка агрегату, який зможе працювати за сучасними технологіями землеробства, такими як no-till, з локальним внесенням мінеральних добрив в різні шари ґрунту для забезпечення живлення рослин на різних етапах їхнього розвитку.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Дослідити існуючі системи та машини для внесення мінеральних добрив.
2. Розробити механізм для внесення мінеральних добрив в різні шари ґрунту при виконанні технологічної операції сіви.
3. Змоделювати та дослідити процес внесення добрив розробленим пристроєм.
4. Розробити заходи охорони праці при роботі з розробленим агрегатом.
5. Провести аналіз економічних показників застосування розробленого агрегату.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕХАНІЗМУ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ ПРИ ВИКОНАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОПЕРАЦІЇ СІВБИ

2.1 Будова та принцип роботи висівної секції.

Застосування технології пошарового внесення добрив полягає в одноразовому пропорційному внесенню добрив, необхідного для всього циклу росту рослин в ґрунті, базове добриво при цьому вноситься смугами, а додаткове добриво, яке буде використовуватись рослинами в процесі росту вносяться порціями, це забезпечить найкращі результати, з точки зору поглинання поживних речовин рослинами і майбутнього врожаю [11]. Пропонується вносити базове добриво смуговим способом з боковою відстанню від насінин $L_1=50$ мм (рис.2.1), а глибина внесення при цьому буде становити $H_1=50$ мм; що допоможе ефективно уникнути негативного впливу добрив на насінини. Порційне внесення наступних видів добрив, для підживлення, відбувається на глибину $H_2=110$ мм та $H_3=160$ мм відповідно.

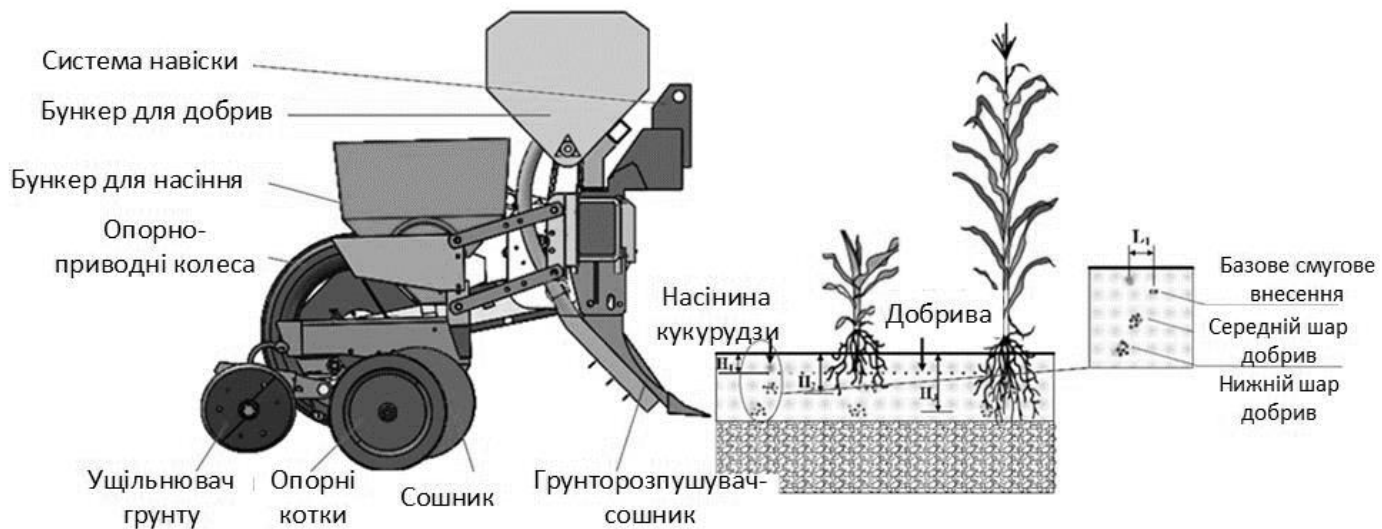


Рисунок 2.1. Схема пошарового внесення добрив при сівбі кукурудзи.

2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів.

2.2.1. Конструкція сівалки з багатошаровим удобренням без обробки ґрунту

Схематичне зображення агрегату у складі трактора та сівалки для просапних культур з багатошаровим внесенням добрив, який працює по технології по-till представлено на (рис.1.2). Сівалка під'єднана до задньої навіски трактора за допомогою триточкової навіски, передній сошник-глибокорозпушувач для

внесення добрив прикріплений до рама болтовим з'єднанням, висівні апарати з'єднані з рамою паралелограмною підвіскою. При роботі машин, опорні привідні колеса сівалки обертаються завдяки тертю об ґрунт та приводять в рух висівні апарати для висіву мінеральних добрив та насіння. Сошники-глибокорозпушувачі 10 встановлені попереду насінневих сошників і служать для обробітку ґрунту перед дисковим насінневим сошником та одночасного внесення добрив. Обробіток ґрунту в смугах сприяє кращому проростанню і наступному росту насіння. Диски насінневого сошника ущільнюють і розрізають солом'яну стерню та відкривають посівне ложе, насінини випадають в борозну, далі прикочувальні колеса завершують операцію ущільненням насіння кукурудзи з ґрунтом.

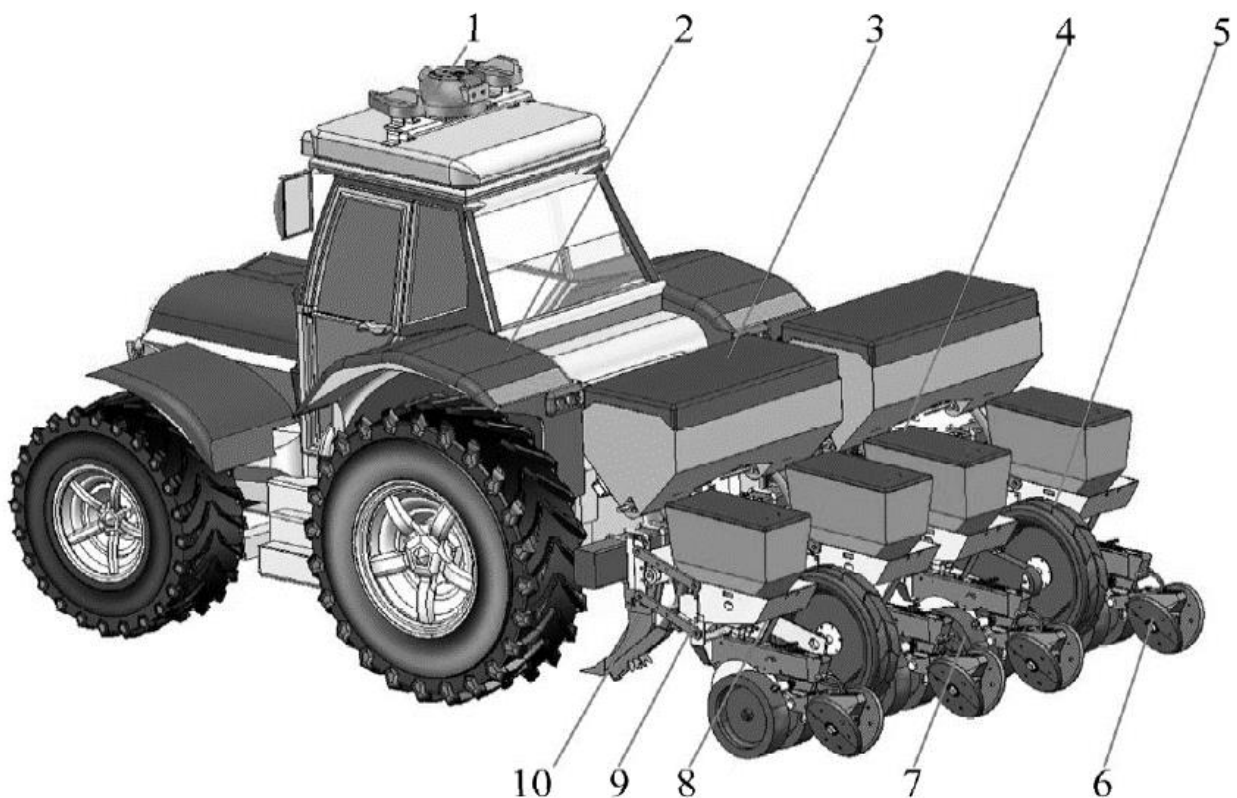


Рисунок 2.2. Принципова схема агрегату для пошаровим внесення добрив по потіл: 1. навігаційний приймач; 2. трактор; 3. бункер для добрив; 4. бункер для насіння; 5. привідне колесо; 6 ущільнювач ґрунту; 7. опорне колесо; 8. висівний апарат для насіння; 9. паралелограмний механізм; 10. сошник-глибокорозпушувач пошарового внесення добрив.

2.2.2. Будова та принцип роботи сошника-глибокорозпушувача з порційним внесенням добрив.

Сошник-глибокорозпушувач з порційним внесенням добрив складається з глибокорозпушувача з тримачем для кріплення до рами, тукопровода, приводного валу, електричного двигуна, реверсивного пристрою, щітки і дозувальної котушки з отворами для внесення добрив (рис. 2.3).

При роботі агрегату, приймач, що отримує сигнал про швидкість руху від трактора та передає його на комунікаційний контролер, який обробляє цей сигнал та на основі нього встановлює необхідну швидкість електричного двигуна для контролю кутової швидкості висівної котушки для добрив. Глибокорозпушувач розпушує ґрунт і утворює щілину в ґрунті для добрив. Добрива з бункера для мінеральних добрив потрапляють у тукопровід і під дією сили тяжіння рухаються донизу. Досягнувши перегородки в тукопроводі, вони діляться на дві частини, одна частина попадає у верхній вихідний отвір і далі смугою вноситься у верхній шар ґрунту, інша частина рухається нижче до висівної котушки; яка обертається від електричного двигуна через привідний вал. Щіточка біля висівної котушки сприяє потраплянню добрив у тукопровід і запобігає застряганню добрив у висівній котушці, і добрива далі потрапляють із середніх і нижніх випускних отворів у тукопроводі у середній і нижній шари ґрунту порціями.

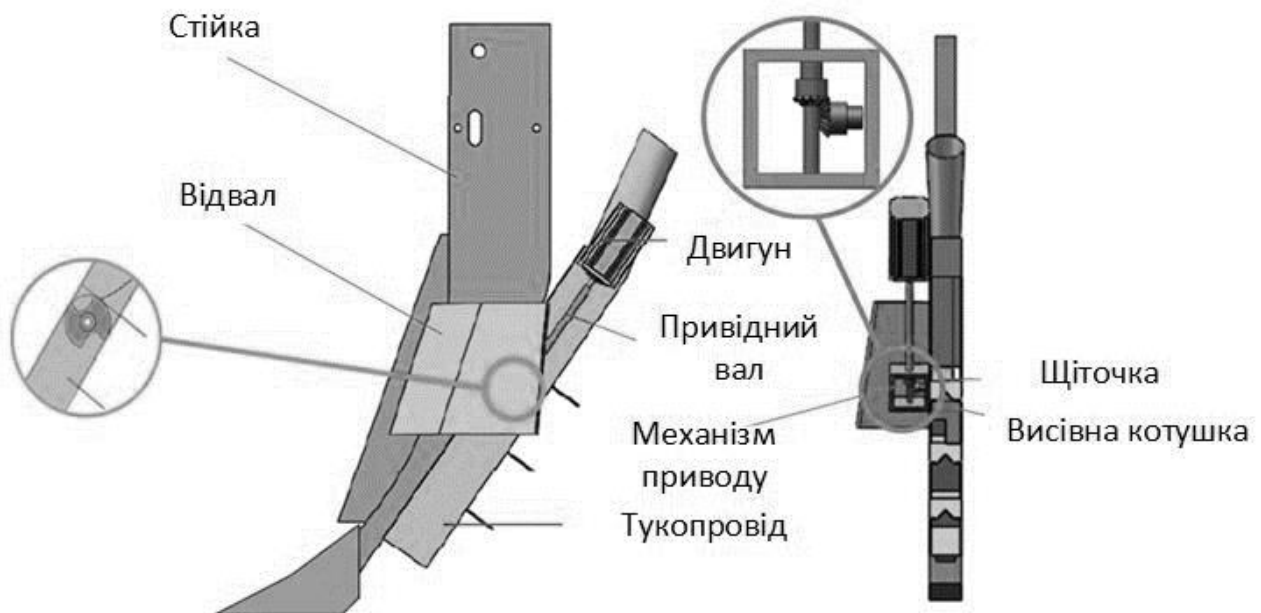


Рисунок 2.3. Конструкція сошника-глибокорозпушувача.

2.2.3. Розрахунок основних елементів котушки для дозування добрив.

Конструкція і розмір котушки для внесення добрив, зусилля на привід, розміщення частинок добрив у пазові впливають на ефективність і стабільність внесення добрив. Норма внесення добрив для кукурудзи зазвичай становить 450-750 кг/га², добрива можуть вноситься суцільним способом, рядковим та лунковим, щоб забезпечити необхідну кількість добрив на кожному етапі циклу росту кукурудзи. Саме для покращення внесення добрив лунковим порційним способом на певній глибині для забезпечення підживлення кукурудзи на різних етапах розвитку запропоновано конструкцію котушки з пазами (рис.2.4).

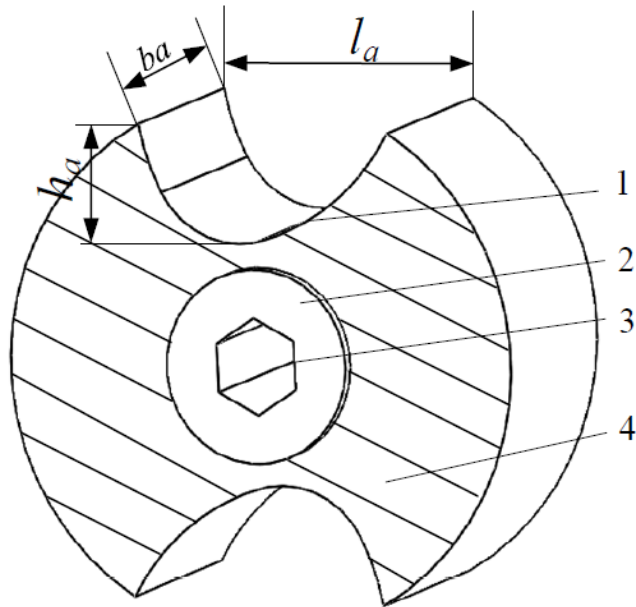


Рисунок 2.4. Висівна катушка для внесення добрив: 1. паз; 2. вал; 3. отвір під вал; 4. катушка.

Об'єм добрива, що дозується з кожного пазу катушкового висівного апарату, залежить від об'єму цього пазу:

$$V_1 = \frac{2}{3} l_a h_a b_a \quad (2.1)$$

де V_1 – об'єм пазу (мм^3);

l_a – ширина пазу (мм);

h_a – глибина пазу (мм);

b_a – довжина пазу (мм).

З розрахунку на норму внесення добрив 6,8–10,8 г на лунку вибираємо наступні розміри пазу: ширина пазу $l_a = 16\text{--}27$ мм, глибина пазу $h_a = 7\text{--}12$ мм, довжина пазу $b_a = 35$ мм. Щоб забезпечити одноразове вивантаження добрива з катушки, максимальна кількість пазів для викидання добрив становить чотири з врахуванням ширини, глибини та довжини одного пазу та з врахуванням діаметру тукопровода. Припускаючи, що частинки добрива можуть бути швидко виведені та ні враховуючи опір повітря, час вивантаження однієї порції добрив з одного пазу можна розрахувати за наступною формулою:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{l_1}{v_1} \quad (2.2)$$

де t – цикл внесення добрив катушкою (с);

t_1 – час між початком виведення добрив з пазу і закінченням цього процесу (с);

t_2 – час між закінченням внесення добрив із першого пазу та початком внесення добрив наступним пазом катушки (с);

l_1 – відстань між насінинами кукурудзи, мм;

v_1 – швидкість руху агрегату (мм/с).

Наведене вище рівняння показує, що кількість внесеного добрива в ґрунті пов'язана з співвідношенням циклів t_1/t . Тобто, під час руху агрегату, відстань між насінинами кукурудзи l_1 та робоча швидкість агрегату v_1 є сталими; таким чином вибираємо робочу швидкість агрегату в межах 1–4 км/год, що відповідає швидкості висівної катушки для внесення добрив 6,67–20 об/хв.

2.2.4. Динамічний аналіз процесу входження добрив до пазу висівної катушки.

При аналізі внесення добрив, припустимо, що добриво є твердим тілом однорідного матеріалу, без врахування вібрації та тертя між частинками, частинки добрив в пазі висівної катушки розглянемо як одне ціле тіло, з центром маси групи добрив як початок системи координат [12]. Добрива здійснюють нормальний і тангенціальний рухи відносно початку системи координат, як показано на рисунку 2.5.

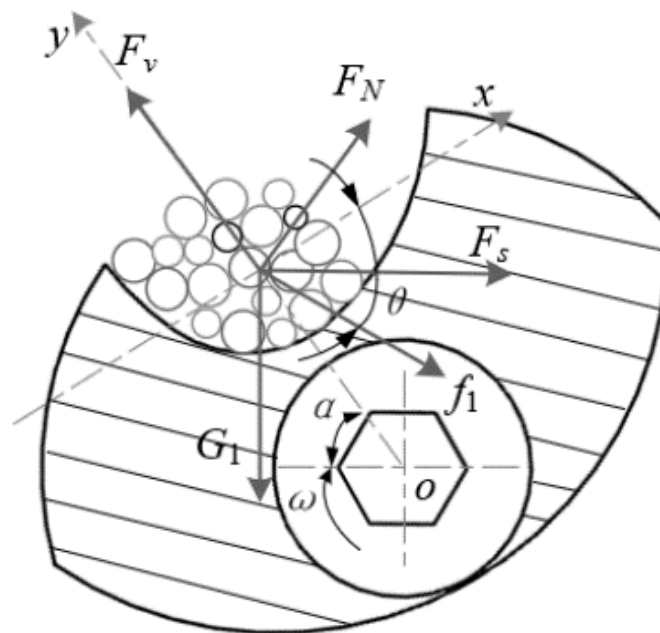


Рисунок 2.5. Схема захоплення добрив висівною катушкою.

Запишемо систему рівнянь сил що діють на добрива в пазу висівної катушки відповідно до рисунку 2.5:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_N \sin \theta + F_s \sin \alpha + f_1 \cos \theta = G_1 \cos \alpha \\ F_v + F_N \cos \theta \leq G_1 \sin \alpha + f_1 \sin \theta + F_s \cos \alpha \\ f_1 = \mu F_N \\ G_1 = mg \\ F_v = m\omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n}{30} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де F_N – нормальна сила опору, яка діє на добрива від стінки пазу (Н);

F_s – бічна сила, що діє на добрива зі сторони зі сторони стінки пазу (Н);

f_1 – сила тертя внутрішньої стінки пазу об групу добрив (Н);

G_1 – сила ваги добрив (Н);

F_v – відцентрова сила інерції (Н);

μ – коефіцієнт тертя між контактною поверхнею добрив і стінками пазу;

m – кількість групи добрив (кг);

θ – кут конусності пазу (°);

ω – кутова швидкість висівної катушки (рад/с);

R – радіус висівної катушки (мм);

n – частота обертання висівної катушки (об/хв);

g – прискорення вільного падіння (м/с²).

Відповідно до рівняння (2.3):

$$\alpha \geq \arccos \frac{e_1}{g\sqrt{1+\mu^2}} - \arctan \frac{\omega^2 R e_1}{e_2} \quad (2.4)$$

де $e_1 = \cos \theta - \mu \sin \theta$, $e_2 = \mu \cos \theta + \sin \theta$.

З рівняння (2.4) випливає, що початковий кут заповнення α , який впливає на ефективність заповнення, пов'язаний з кутовою швидкістю ω висівної катушки, радіусом R , кутом конусності θ паза, і коефіцієнтом тертя μ добрива об катушку. При визначенні кутової швидкості висівної катушки початковий кут заповнення добривом α та кут конусності паза θ обернено пропорційні. Для того щоб гранули добрив потрапили в паз висівної катушки при частоті її обертання $n=6,67\text{--}20$ об/хв потрібно щоб початковий кут заповнення добривом був меншим або дорівнював природному куту спокою добрив $\alpha=35^\circ$, а кут конусності θ паза тоді розраховується з формули (2.4) як $\theta=8,02\text{--}50,42^\circ$.

2.2.5. Динамічний аналіз процесу виходу добрив з пазу висівної катушки.

Процес виходу добрив з пазу висівної катушки в осьовому та радіальному напрямках відбувається під дією сили тяжіння та відцентрової сили. Часовий проміжок між початком та кінцем сходження гранул добрив з висівної катушки безпосередньо впливає на довжину порції добрив в ґрунті. Чим більший цей часовий інтервал довший розподіл добрив та довжина лунки, гірша якість формування лунки. Щоб підвищити ефективність використання добрива, цей інтервал часу слід зменшити.

Аналіз сил, які діють на добрива у процесі сходу з пазу висівної катушки представлено на рис.2.6.

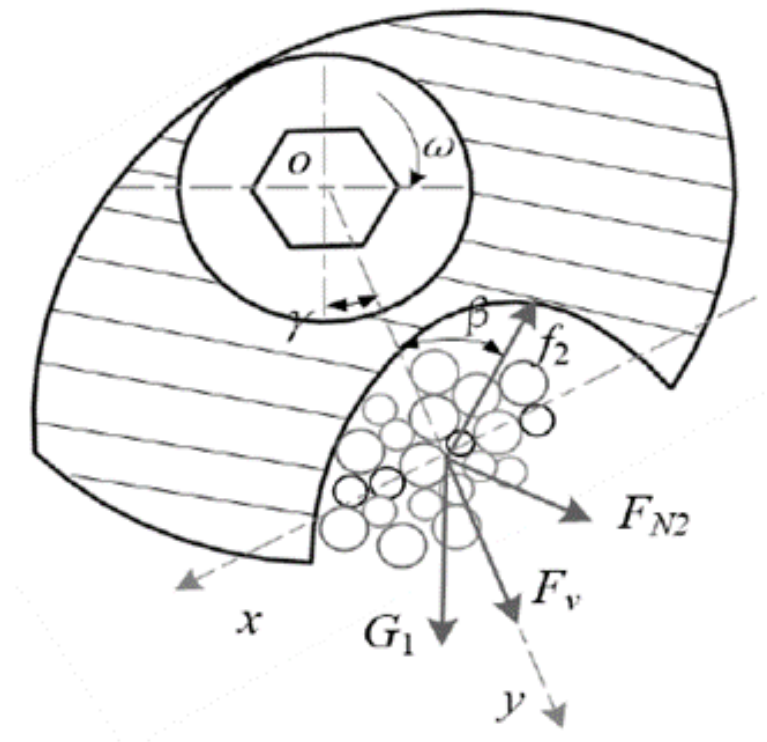


Рисунок 2.6. Схема сходу добрив з висівної катушки.

$$\begin{cases} G_1 \sin \gamma = f_2 \sin \beta + F_{N2} \cos \beta \\ G_1 \cos \gamma + F_v + F_{N2} \sin \beta = f_2 \cos \beta \\ f_2 = \mu F_{N2} \end{cases} \quad (2.5)$$

де F_{N2} – нормальна сила яка діє на добрива зі сторони стінок паза висівної катушки (Н);

f_2 – сила тертя внутрішньої стінки паза об групу добрив (Н);

γ – кут сходу добрив з паза висівної катушки (°);

β – кут вивантаження добрива (°).

З рівняння (2.5) можна отримати.

$$\gamma = \arccos \frac{j_1}{G_1 \sqrt{j_1^2 + j_2^2}} + \arcsin \frac{F_v j_2}{\sqrt{j_1^2 + j_2^2}} \quad (2.6)$$

де $j_1 = \mu \sin \beta + \cos \beta$, $j_2 = \mu \cos \beta - \sin \beta$.

Виходячи з фізичних властивостей добрива та швидкості колеса типу отворів для заповнення добривом 6,67–20 об/хв, а також для простоти розрахунку, а також простоти обробки, кут δ , під яким було обрано що кут сходження добрив має бути 50–70°. Для визначення кута установки трубки для добрива було проведено динамічний аналіз сил що діють на гранули добрив після того, як вони вийшли з пазу висівної катушки (рис. 2.7).

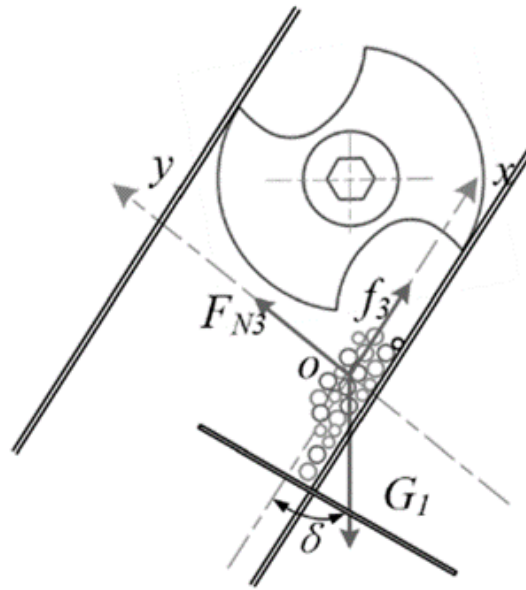


Рисунок 2.7. Схема руху добрив по тукопроводу.

$$\begin{cases} F_a = G_1 \cos \delta - f_3 \\ F_{N3} = G_1 \sin \delta \\ f_3 = \mu_1 F_{N3} \end{cases} \quad (2.7)$$

де F_a – сукупні сили на групи добрив (Н);

F_{N3} – нормальна сила стінки тукопроводу на добрива (Н);

f_3 – сила тертя гранул добрив об стінки трубопроводу (Н);

δ – кут установки тукопроводу (°);

μ_1 – коефіцієнт тертя добрив об стінки тукопроводу.

Відповідно до рівняння (2.7) отримуємо:

$$F_a = G_1(\cos \delta - \mu_1 \sin \delta) \quad (2.8)$$

Діапазон значень δ становить 30–40°, з рівняння (2.8) видно, що сумарна сила F_a на частинки добрив після виходу з пазу зменшується зі збільшенням δ , отже, кут встановлення туковисівної трубки впливає на рух частинок добрива та кількість добрив, що вноситься до кожного шару ґрунту. Частинки добрива в основному піддаються дії сили тяжіння G_1 у момент, коли вони залишають паз висівної катушки, і їхня траєкторія визначається рухом вільного падіння з початковою швидкістю v . Різні початкові швидкості розподілятимуть частинки добрив у різні отвори, що, у свою чергу, впливає на ефект точності операція внесення добрив глибокорозпушувачем-сошником.

2.3. Висновки до розділу.

1. Розроблено сошник-глибокорозпушувач, який може вносити мінеральні добрива в різні шари ґрунту, забезпечуючи таким чином живлення рослин на різних етапах їх розвитку.

2. Глибокорозпушувач може глибоко розпушувати нижній шар ґрунту перед сівбою рослин за технологією по-till, допомагаючи зменшити ерозію ґрунту, збільшити здатність ґрунту зберігати воду, покращити середовище росту кореневої системи рослин та сприяти та повному поглинанню поживних речовин добрива.

3. Теоретичним аналізом було встановлено, що робочу швидкість агрегату в необхідно вибрати в межах 1–4 км/год, що відповідає швидкості висівної катушки для внесення добрив 6,67–20 об/хв, початковий кут заповнення добривом був меншим або дорівнював природному куту спокою добрив $\alpha = 35^\circ$, а кут конусності θ паза був в межах $\theta = 8,02\text{--}50,42^\circ$.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ РОЗРОБЛЕНИМ ПРІСТРОЄМ

3.1. Побудова імітаційної моделі.

Щоб перевірити експлуатаційну ефективність розробленого агрегату з пошаровим внесенням добрив, було здійснено моделювання процесу внесення добрив за допомогою програмного забезпечення аналізу дискретних елементів для визначення частинок ґрунту та частинок добрив, а також для обговорення ефектів кута встановлення тукопровода на ефективність формування отворів і стабільність внесення добрив.

Програмне забезпечення для 3D-моделювання було використано для побудови моделі пристрою для пошарового внесення добрив з допомогою програмного забезпечення для дискретних елементів EDEM [13].

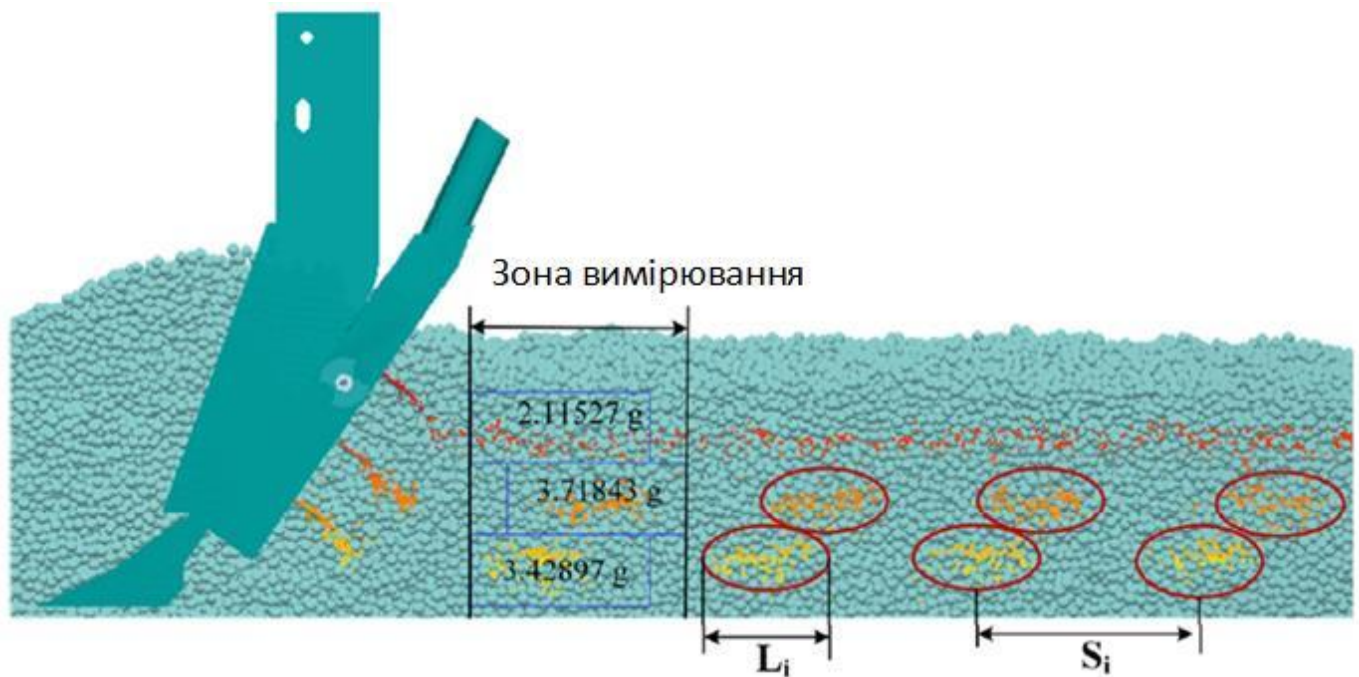


Рисунок 3.1. Імітаційна модель пошарового внесення добрив.

Модель контактної механіки Герца–Міндліна (без ковзання) була обрана як модель міжчастинкового контакту. Багато вчених [14,15] показали, що модель ґрунту можна замінити еквівалентними сферичними частинками з радіусом 6 мм, які можуть дуже добре імітувати взаємодію між ґрунтом і глибокорозпушувачем; частинки добрива в основному мають сферичну форму, і їхня сферична частка становить понад 90%, що можна вважати сферичними з еквівалентним розміром

частинок 3 мм. Деякі структури, які не впливають на аналітичну продуктивність, були спрощені. Імітаційна модель показана на рисунку 3.1.

Параметри частинок ґрунту, частинок добрива та смугово-пошарового внесення добрив змінних наведені в таблиці 1 [16].

Таблиця 3.1. Параметри моделювання та їх значення

Параметр	Елемент конструкції	Значення
Щільність, кг/м ³	Гранули добрив	1575
	Ґрунт	2500
	Сталь	7865
	Пластик	1200
Модуль зсуву, Па	Гранули добрив	$1,25 \times 10^8$
	Ґрунт	$1,00 \times 10^8$
	Сталь	$7,90 \times 10^{10}$
	Пластик	$1,00 \times 10^9$
Коефіцієнт Пуассона	Гранули добрив	0,25
	Ґрунт	0,30
	Сталь	0,37
	Пластик	0,40
Коефіцієнт реституції	Добриво-добриво	0,09
	Добриво-сталь	0,50
	Добриво-пластик	0,40
	Добриво- Ґрунт	0,02
	Ґрунт - Ґрунт	0,50
	Ґрунт -сталь	0,30
Коефіцієнт статичного тертя	Добриво-добриво	0,30
	Добриво-сталь	0,40
	Добриво-пластик	0,20
	Добриво- Ґрунт	1,25
	Ґрунт - Ґрунт	0,50
	Ґрунт -сталь	0,50
Коефіцієнт тертя кочення	Добриво-добриво	0,25
	Добриво-сталь	0,02
	Добриво-пластик	0,09
	Добриво- Ґрунт	1,25
	Ґрунт - Ґрунт	0,15
	Ґрунт -сталь	0,05

3.2. Методика проведення експерименту.

На основі вищезазначеного аналізу було проведено однофакторний експеримент для отримання оптимального кута встановлення тукопроводу з поступальною швидкістю руху 4 км/год і кутом сходу добрив 60° , щоб перевірити вплив п'яти значень кута встановлення тукопроводу на коефіцієнт стабільності надходження добрив у верхній, середній і нижній шари.

Ми додали функцію Grid Bin Group до інтерфейсу програми EDEM після завершення тесту моделювання та вибрали 10 випадково вибраних областей довжиною 25 мм в експериментальній зоні стабільності однофакторного тесту на удар. Таким же чином ми записали масу добрив у верхньому шарі Grid Bin Group, а також масу добрив у середньому та нижньому шарах під ним. Далі було розраховано коефіцієнт стабільності відхилення об'єму внесення добрив у три шари за різних обробок за формулою:

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - m_0)^2}}{m_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

де η – коефіцієнт стабільності відхилення кількості внесених добрив (%);
 m_i – фактична кількість внесених добрив (г);
 m_0 – нормативна норма внесення добрив (г);
 n – кількість вимірювань.

3.3. Результати проведення експерименту.

Щоб дослідити вплив кута нахилу на коефіцієнт стабільності внесення та довжину розподілень добрив, було досліджено кількість добрив, що потрапляють у середній і нижній шари, та проаналізовано їх характеристики (рис. 3.2).

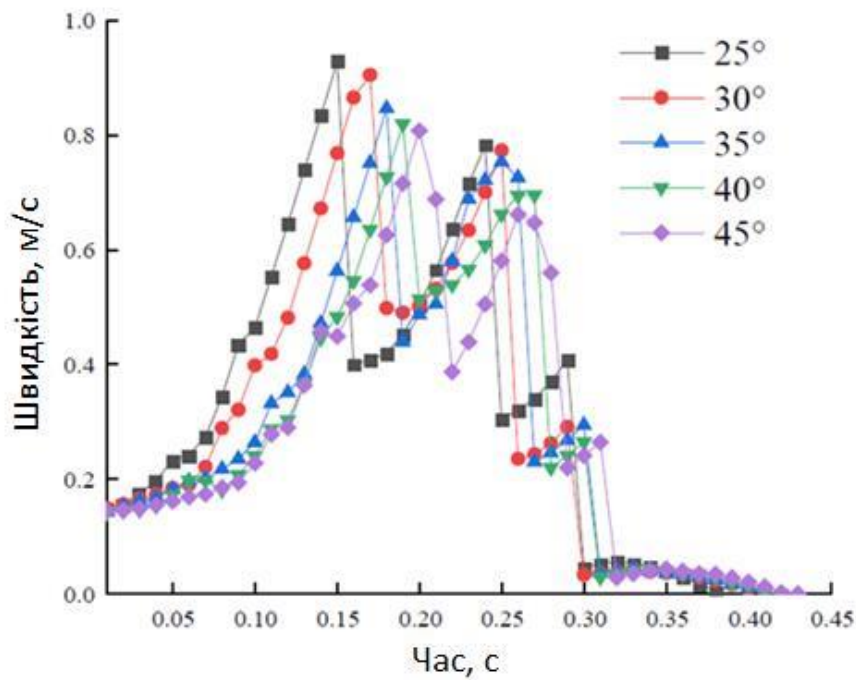


Рисунок 3.2. Залежність швидкості руху гранул добрив від кута нахилу тукопровода при виході в середній шар ґрунту.

Як видно з рисунку гранули добрив прискорилися під дією сили тяжіння після виходу з пазу висівної котушки, і при встановленні кута нахилу тукопровода на 25° гранули добрив першими досягли отвору; час, необхідний для досягнення розвантажувального отвору середнього шару, становив 0,15 с, а розвантажувального отвору нижнього шару становив 0,20 с. При 45° , гранули добрива останніми досягали розвантажувального отвору, а час, необхідний для досягнення розвантажувального отвору середнього шару становила 0,21 с, а для нижнього шару - 0,25 с. Таким чином, чим менший кут встановлення тукопровода, тим більше прискорення частинок добрива, тим більша швидкість частинок добрива, які першими надходять до розвантажувального отвору та досягають отвору, і тим більші втрати швидкості, викликані зіткненням між частинками добрива в отворі, але чим більша швидкість частинок добрива надходить до отвору, тим більша швидкість після викиду і тим менше часу, витраченого на виведення з тукопровода добрив. Порівняно з рисунком 3.3, можна побачити, що швидкість частинок добрива, що падають у нижній розвантажувальний отвір, більша, ніж швидкість середнього розвантажувального отвору, й різниця в часі між нижнім шаром різних кутів встановлення тукопровода, коли частинки добрива потрапляють у ґрунт, більша, ніж різниця в часі в середньому шарі, що приводить до більшої різниці в довжині розподілення добрив.

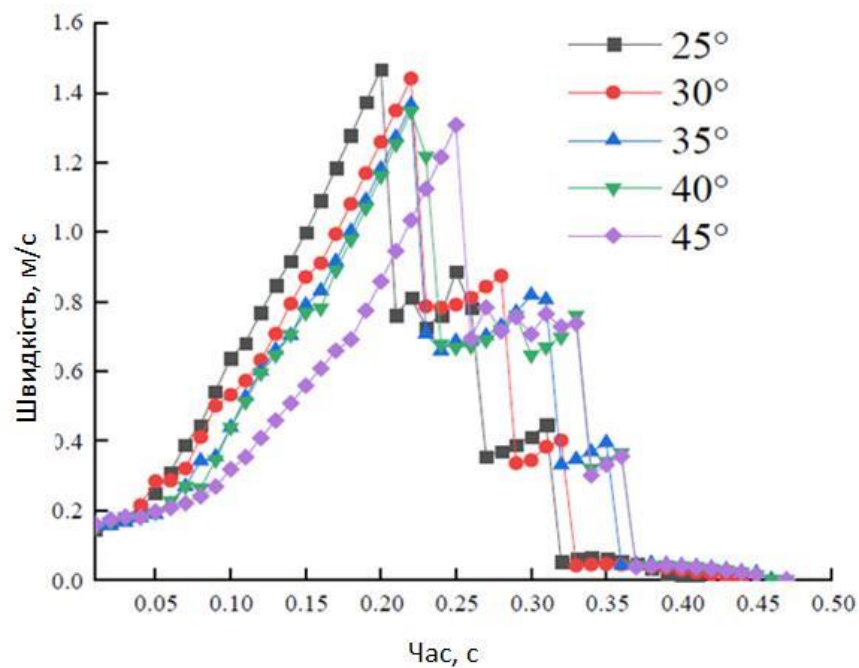


Рисунок 3.3. Залежність швидкості руху гранул добрив від кута нахилу тукопроводу при виході в нижній шар ґрунту.

Вплив різних кутів встановлення тукопроводу на кількість добрив, що вноситься до кожного шару, показано на рисунку 3.4.

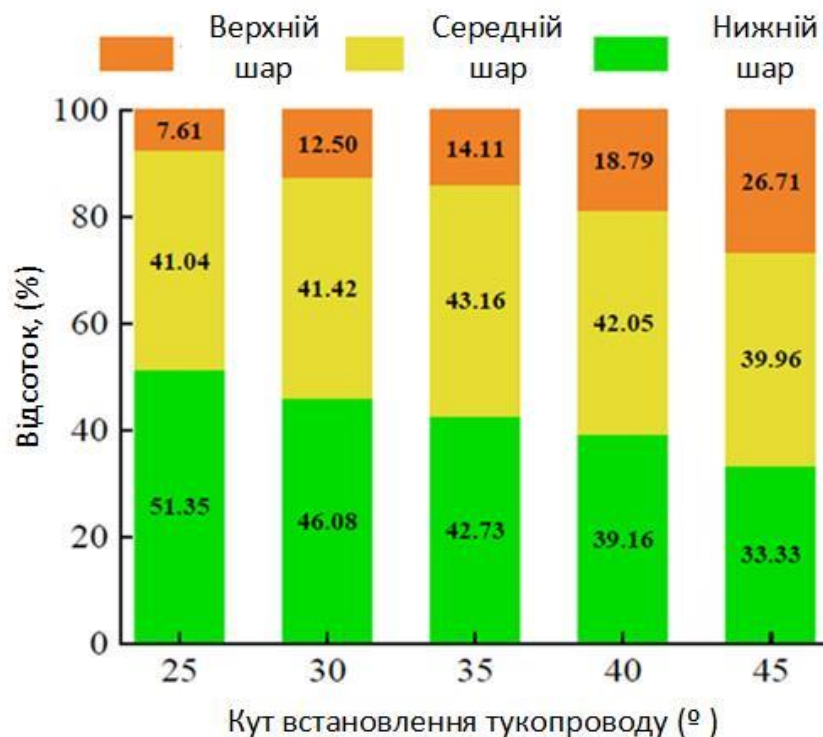


Рисунок 3.4. Процентний вміст добрив при внесенні в різні шари ґрунту.

Дослідження середньої маси добрив, внесених у верхній, середній і нижній шари, показало, що частка добрив, внесених у верхній шар, зростала зі збільшенням

кута встановлення тукопровода, з 7,61% до 26,71%, частка добрив, внесених у середній шар, не сильно змінилася, а частка добрив, внесених у нижній шар, зменшилася з 51,35% до 33,33%. Вплив кута встановлення тукопровода на середній і нижній шари показано на рисунку 3.5.

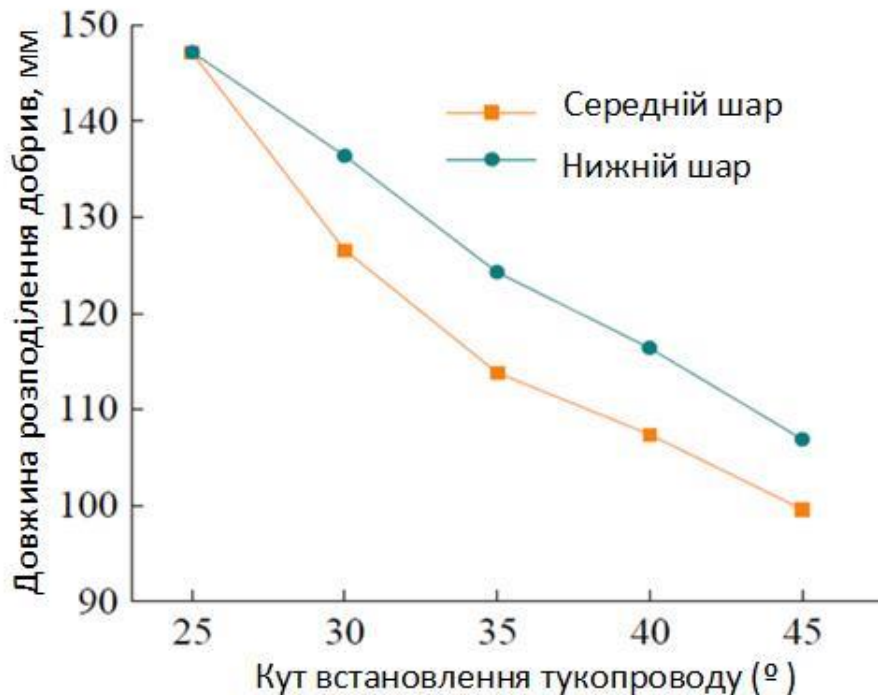


Рисунок 3.5. Довжина розподілення добрив в лунках в середньому та нижньому шарах ґрунту.

Довжина розподілення добрив середнього і нижнього шарів зменшується зі збільшенням кута встановлення тукопровода. Це означає, що збільшення кута встановлення тукопровода може зменшити швидкість частинок добрива, що виходять із розвантажувального отвору, і таким чином зменшити довжину розподілення добрив, але це призведе до збільшення частки добрива, що вноситься у верхній шар, і збільшення проміжку між середнім і нижніми шарами. Щоб гарантувати, що співвідношення добрив між середнім і нижнім шарами відповідає характеру росту кукурудзи [17], кут встановлення тукопровода було визначено рівним 30–40°.

3.4. Висновки до розділу.

В результаті проведеного однофакторного експерименту для отримання оптимального кута встановлення тукопровода з поступальною швидкістю руху 4 км/год і кутом сходу добрив 60°, було визначено, що кут встановлення тукопровода повинен бути рівним 30–40°.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз травмонебезпечних факторів при сівбі та внесенні мінеральних добрив.

Під час виконання операцій strip-band (локальне стрічкове внесення) основні травмонебезпечні фактори подібні до загальних для сівби й внесення добрив, але мають специфічні джерела ризику, пов'язані з конструкцією аплікатора та місцем розташування стрічки:

Перекидання та нестійкість агрегатів: підвищений ризик на нерівностях, ухилах, при маневруванні з причіпними/широкозахватними bander-блоками; додаткове навантаження при заповнених бункерах/баках змінює центр мас.

Наїзди та контакти із людьми: робота в полі впритул до техніки, маневрування між секціями — загроза для сторонніх осіб; небезпечно перебувати під або між агрегатами під час монтажу/регулювання.

Захоплення рухомими частинами: відкриті приводи дозаторів (шнеки, барабани), карданні передачі, ролики та рухомі елементи сошників/інжекторів — при очищенні, регулюванні чи калібруванні без вимкнення приводів.

Ураження від рухомих сошників і формувачів смуги: диски, плоскорізи й інжектори можуть відкинути каміння або обрости рослинністю уламки, що травмують оператора або сторонніх.

Контакт із сипкими добривами: задусення чи засипання при роботі з насипними бункерами, ризик потрапляння у дихальні шляхи та очі при розвантаженні/калібруванні.

Хімічні та токсичні ризики: пил від гранул (аміачна селітра, суперфосфат), випари/пари від рідких концентратів; ризик опіків при контакті концентрованих розчинів або при пожежі.

Пожежі та вибухи: аміачна селітра та суміші з органічними речовинами — підвищений пожежний ризик при неправильному зберіганні або знешкодженні розливів; іскри від електроінструменту чи нагрітих поверхонь.

Механічні ушкодження під час ТО: травми при підпирані агрегатів, відскоку інструментів, неправильному використанні домкратів чи упорів.

Електробезпека: у аплікаторів з електроприводами/електронікою — ризик ураження струмом через пошкоджені кабелі або вологі умови.

Біомеханічні й ергономічні фактори: тривале кермування, вібрація, шум, переповнені баки — вплив на працездатність оператора, підвищення ймовірності помилок.

4.2. Техніка безпеки при застосуванні різних видів мінеральних добрив.

Загальні правила допуску та інструктажу

До роботи допускаються особи не молодші 18 років із пройденим інструктажем (вступним, первинним на робочому місці, повторним) і медичним оглядом; записи зберігаються в журналі.

Оператори та обслуговуючий персонал повинні володіти інструкцією з експлуатації конкретного bander-модуля; для робітників складу — інструкціями з пожежної та санітарної безпеки.

Захисні засоби та спецодяг

Обов'язкове ППЕ: робочий комбінезон, захисні рукавиці, захисні окуляри, респіратор при пилі; при роботі з концентрованими чи аміачними розчинами — захисні щитки/протигази і гумові чоботи.

Періодичні перерви під час безперервної роботи у респіраторі (рекомендація: ~5 хв перерва кожні 30 хв роботи залежно від навантаження і рівня пилу).

Організація робочого місця та зберігання

Склади добрив розташовують і експлуатують відповідно до норм (відстані від житлових будівель, протипожежні заходи). Забороняється зберігання аміачної селітри разом з горючими матеріалами; місця паління суворо заборонені.

Запаси води, аптечка, засоби для миття очей і шкіри мають бути доступні на полі і в машинній бригаді.

Технічна експлуатація аплікаторів

Заправка і калібрування бункерів/баків — виключно на стоянці з вимкненим двигуном; всі приводні вузли закриті захисними щитками.

Завантаження гранул і розчинів проводити при повній зупинці машини; розвантаження/промивка ліній — за інструкцією виробника.

Змашування, очищення, регулювання дозаторів і сошників — лише при заглушеному двигуні, відключеному ВВП і зафіксованій гідросистемі (LOTO).

Під час руху заборонено перебувати між трактором і аплікатором, сидіти на бортах бункерів або стояти на рамі агрегату.

Обмеження швидкості руху згідно технічних умов агрегату; при перевезенні в транспортному положенні секції мають бути механічно зафіксовані й освітлення справне.

Заходи з охорони праці при роботі з сипкими гранулами

Забезпечити герметичність кузовів під час транспортування насипних добрив; уникати утворення пилу при пересипанні (використовувати закриті лінії, аспірацію при перевантаженні).

Не допускати засипання людей у бункерах; забороняється працювати в зоні відкритих завантажувальних лотків без контролю.

Заходи при роботі з рідкими добривами

Баки повинні мати системи герметичного з'єднання та фільтрації; всі магістралі — з клапанами аварійного відсікання.

Перед зміною типу розчину — промивати лінії; промивні операції проводити в спеціально відведених місцях із лотками для збору та нейтралізації.

Захист від корозії: використовувати матеріали, стійкі до розчинів, перевіряти ущільнення та шланги.

Слід передбачити засоби для швидкого нейтралізування розливів (поглинальні матеріали, лотки).

Пожежна та екологічна безпека

Заборонено куріння та використання відкритого вогню біля місць зберігання та обладнання для аміачної селітри.

Організувати системи локалізації та прибирання розливів, план дій при загорянні; наявність вогнегасників у транспортних засобах бригади.

Механічне обслуговування та LOTO

Впровадити процедуру Lock-Out/Tag-Out: відключення двигуна, зниження тиску у гідролініях, механічна фіксація піднятих елементів перед обслуговуванням.

Не використовувати підпертя людьми при піднятті важких секцій; застосовувати сертифіковані підпирні опори та домкрати.

Медична та гігієнічна підтримка

Після зміни роботи з добривами — обов'язкове миття тіла, прийом душу; чистий комплект одягу для поїздки додому.

У разі потрапляння в очі або на шкіру — промивання великою кількістю води та звернення до медпункту.

4.3. Моделювання травмонебезпечних і аварійних ситуацій під час сівби зі стрічковим внесенням добрив (логічні моделі та приклади)

Під час комбінованих операцій «сівба + стрічкове внесення» формуються складні взаємозв'язки причин і наслідків; для їхнього аналізу застосовують логічні (деревоподібні) та ймовірнісні моделі. Нижче наведено приклади типових сценаріїв з поділом на початкові, проміжні та кінцеві події та заходи для зниження ймовірності їх реалізації.

Приклад 1 — Перекидання трактора з аплікатором

Початкова подія: рух по схилу/нерівності або раптовий маневр із перевищенням швидкості; перевантажений бункер.

Проміжні події: втручання оператора у керування при втраті стійкості; зрив тяги або пробуксовка; деформація амортизаційної підвіски секцій.

Кінцева подія: перекидання агрегату → травми оператора/пошкодження обладнання/витік добрив.

Заходи запобігання: обмеження швидкості, моніторинг навантаження бункера, підсилення стабілізуючих елементів, навчання дій при втраті стійкості, встановлення ROPS та ременів безпеки.

Приклад 2 — Захоплення оператора рухомими частинами при регулюванні дозатора

Початкова подія: регулювання/очищення дозатора під час увімкненого ВВП або без виконаного LOTO.

Проміжні події: неповна зупинка приводу, неповне скидання енергії гідросистеми.

Кінцеві події: захоплення одягу/рук і травма або ампутація.

Заходи: суворе дотримання LOTO, інструктаж, блокувальні пристрої на кожусах, аварійні вимикачі з доступом оператора.

Приклад 3 — Отруєння/опік від рідкого добрива при розливі

Початкова подія: пошкодження магістралі/шланга, несправний клапан.

Проміжні події: розбризкування розчину на оператора або в зону завантаження; утворення пари/аерозолі.

Кінцеві події: опіки шкіри, ураження очей, інгаляційні розлади.

Заходи: регулярний контроль герметичності, багаторівневі фільтри та клапани, засоби локального блокування магістралей, наявність ППЕ, пляшки для промивання очей, план дій при розливі.

Приклад 4 — Удушення/задушення при роботі з насипними бункерами

Початкова подія: підняття працівника в бункер для очищення/ущільнення без запобіжних заходів.

Проміжні події: засипання сипким матеріалом, нестача повітря.

Кінцева подія: задушення або серйозна травма.

Заходи: заборона входу в бункери без засобів рятування, використання дистанційних механічних засобів очищення, нагляд другого працівника, системи датчиків рівня/руху у бункері.

Модельна побудова ймовірностей

Кожна логічна модель складається з подій, з'єднаних послідовно (серія подій) або паралельно (альтернативні сценарії). Для кількісної оцінки застосовують імовірнісні коефіцієнти появи подій і методи аналізу ризику (FMEA, дерево відмов, fault tree analysis).

Практичне застосування: складання карти ризиків для кожної операції (зона складування, заправка, рух по полю, калібрування дозаторів, ТО), визначення пріоритетів за рівнем ризику та розробка коригувальних заходів із термінами виконання.

На рис.4.1. зображено моделі формування і виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій під час виконання процесу розкидання мінеральних добрив. В результаті аналізу отриманої моделі пропонується наступні заходи запобігання небезпечних ситуаціям: 1) організувати постійний контроль за трактором перед виходом у рейс; 2) не допускати до роботи трактор без гальм;

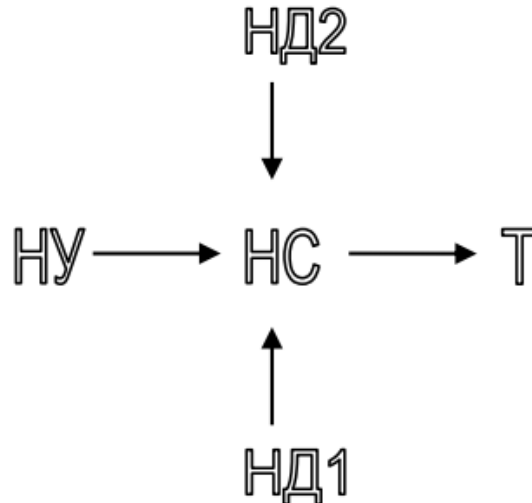


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травмонебезпечної ситуації під час експлуатації трактора без гальм: НУ – небезпечна умова (трактор експлуатується без гальм); HD1 – небезпечна дія (перевищення швидкості руху); HD2 – небезпечна дія (різкий поворот); HC – перекидання трактора - небезпечна ситуація); Т – травма, аварія.

На рис.4.2. зображено модель процесу формування і виникнення небезпечних ситуацій при загорянні трактора і появі пожежі.

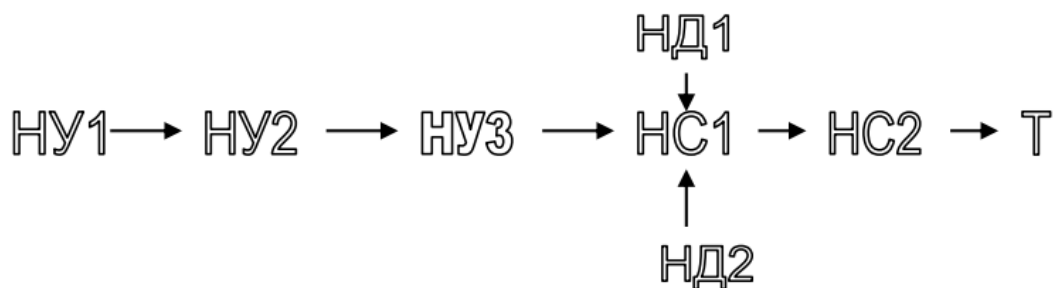


Рисунок 4.2. Модель процесу формування і виникнення травмонебезпечних ситуацій, якщо не обладнано і не позначено місце для заправки тракторів NU1, відсутності контролю за заправкою тракторів NU2, несправності пристрою для заправки тракторів та розливанні палива NU3 : HD1 – заправка тракторів біля сухих рослин (сіно, солома) (небезпечна дія); HD2 – трактористи користуються відкритим вогнем (небезпечна дія); HC1 – загоряння розлитого палива (небезпечна ситуація); HC2 – загоряння трактора небезпечна ситуація); Т- пожежа.

Аналіз моделі дав змогу обґрунтувати наступний захід запобігання з небезпечних ситуацій: організувати постійний пожежний контроль за роботою машинно-тракторних агрегатів і добитися суворого дотримання працівниками правил пожежної безпеки.

Висновки й рекомендації

Проведення операцій strip-band потребує адаптованих правил безпеки: акцент на ЛОТО, контроль стану бункерів/баків, герметичність ліній, пожежну безпеку при зберіганні аміачної селітри та інших реактивних солей.

Необхідно впровадити регламентовані інструкції «перед виїздом», «перед завантаженням», «перед обслуговуванням»; обов'язкове калібрування дозаторів і фіксація в електронних журналах.

Рекомендується створити набори логічних моделей (дерев відмов) для ключових сценаріїв і здійснювати періодичні тренування персоналу по відпрацюванню аварійних алгоритмів.

Комплексна система безпеки повинна поєднувати технічні заходи (захисти, клапани, фільтри), організаційні процедури (допуски, інструктажі), засоби індивідуального захисту і моніторинг (телеметрія, датчики), що разом мінімізує ризики травматизму та аварій під час стрічкового внесення мінеральних добрив.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Економічний ефект від використання розробленого сошника-глибокорозпушувача для пошарового внесення мінеральних добрив на сівалках для висіву просапних культур полягає у зменшенні витрат добрив та дозволяє відмовитись від двох додаткових операцій підживлення рослин та попередніх операцій обробітку ґрунту. Тому для порівняння виберемо з технологічного процесу вирощування кукурудзи операції які заміщає удосконалена сівалка на базі сівалки John Deere 7000, а саме оранку агрегатом John Deere 6R 110 + Lemken EurOpal 5 3+1 N, передпосівна культивация агрегатом John Deere 6R 110 + John Deere 2210, сівба з одночасним внесенням мінеральних стартових добрив агрегатом John Deere 6R 110 + John Deere 7000, перше та друге підживлення агрегатом John Deere 6R 110 + John Deere M 732.

Експлуатаційні показники, які характеризують ефективність застосування розробленого пристрою, визначали відповідно до стандартної методики [20].

Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності розробленого сошника-глибокорозпушувача для пошарового внесення мінеральних добрив

Показник	Базовий варіант	Удосконалений варіант
Склад агрегату	John Deere 6R 110 + Lemken EurOpal 5 3+1 N John Deere 6R 110 + John Deere 2210 John Deere 6R 110 + John Deere 7000 John Deere 6R 110 + John Deere M 732	John Deere 6R 110 + розроблена сівалка
Номінальна потужність двигуна енергозасобу, кВт	89	89
Вартість трактора, грн.	3000000	3000000
Річне завантаження трактора, год.	1600	1600
Вартість с.-г. машини, грн.	480000	700000

	1120000 662447 1200000	
Річне завантаження с.-г. машини, год.	600 230 170 450	170
Сумарні відрахування на машину (амортизація, ТО та поточний і капітальний ремонт), %	21,5	21,5
Кількість обслуговуючого персоналу	1 1 1 1	1
Робоча швидкість агрегату, км/год	8 10 8 10	2
Ширина захвату, м	1,76 13,6 5,6 18	2,8
Коефіцієнт використання часу зміни	0,8	0,8
Продуктивність, га/год	3,6	7,2
Заробітна плата, грн./год.	100,00	100,00
Витрата палива, кг/га	14,0 6,0 8,0 5,0	10,0
Ціна палива, грн.	55,00	55,00

Прямі експлуатаційні витрати на одиницю роботи становлять:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4, \quad (5.1)$$

де C_1 – оплата праці персоналу, що обслуговує агрегати та відрахування на соціальні заходи, грн./га;

C_2 – вартість витрачених паливо-мастильних матеріалів, грн./га;

C_3 – відрахування на реновацію та капітальний ремонт агрегату, грн./га;

C_4 – відрахування на поточний ремонт та технічне обслуговування агрегату, грн./га.

Оплата праці обслуговуючому персоналу дорівнює:

$$C_1 = \frac{m_1 n_1 + m_2 n_2 + \dots + m_i n_i}{W_{зм}}, \quad (5.2)$$

де m_i – кількість працівників i -ої кваліфікації на агрегаті;

n_i – оплата праці за змінну норму виробітку працівника i -ої кваліфікації, грн;

$W_{зм}$ – змінна продуктивність агрегату, га/зм.

Вартість паливно-мастильних матеріалів дорівнює:

$$C_2 = \Pi_K Q_{\Pi}, \quad (5.3)$$

де Π_K – комплексна ціна кілограма палива, грн/кг;

Q_{Π} – витрата палива, кг/га.

Відрахування на реновацію та капітальний ремонт машин в агрегаті визначаються з формули:

$$C_3 = \frac{B_{TP} \cdot a_{TP}}{100 \cdot W_z \cdot t_{TP}} + \frac{B_M \cdot a_M \cdot n_M}{100 \cdot W_z \cdot t_M}, \quad (5.4)$$

де B_{TP} – балансова вартість комбайна, грн;

a_T – норми відрахувань на амортизацію та капітальний ремонт відповідно агрегату, % ($a_K = 15\%$);

t_{TP}, t_M – зональне річне (або фактичне) завантаження агрегату, год.

Відрахування на поточний ремонт і технічне обслуговування машин в агрегаті дорівнюють:

$$C_4 = \frac{B_{TP} \cdot P_{TP}}{100 \cdot W_z \cdot t_{TP}} + \frac{B_M \cdot P_M}{100 \cdot W_z \cdot t_M}, \quad (5.5)$$

де P_{TP} – сумарна норма відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування агрегату, % ($P_{TP} = 6,5\%$).

Різниця прямих експлуатаційних витрат на гектар при впровадженні удосконалення у виробництво буде становити:

$$E_n = C - C' \quad (5.6)$$

де C' – експлуатаційні витрати при використанні удосконаленої машини, грн.

При використанні удосконаленої машини на площі 100 га різниця прямих витрат буде становити:

$$E'_n = E_n \cdot F \quad (5.7)$$

де F – площа ділянки, га.

Враховуючи, експлуатаційні витрати на машини та економічний ефект від збільшення продуктивності агрегату можна записати, що економічний ефект на гектар посівів буде становити:

$$E' = E_g' - E_n \quad (5.8)$$

Термін окупності удосконаленої сівалки:

$$T_{ок} = \frac{\Delta B}{E} \text{ рік} \quad (5.9)$$

Складові витрати коштів подано в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Розрахунок показників економічної ефективності впровадження розробленого сошника-глибокорозпушувача для пошарового внесення мінеральних добрив

Показник	Варіанти		Відхилення
	Базовий варіант	Удосконалений варіант	
Затрати праці, люд.-год/га	1,5	1,1	- 0,4
Заробітна плата, грн./га.	149,06	111,61	- 37,45
Вартість палива, грн./га	2090,00	550,00	- 1540
Відрахування на реновацію та капітальний ремонт, грн./га;	865,91	1003,23	+ 137,32
Відрахування на поточний ремонт та ТО, грн./га.	375,23	434,73	+ 59,50
Сумарні прямі експлуатаційні витрати, грн./га	3480,20	2099,57	- 1380,63
Річний економічний ефект, грн	143695,49		
Термін окупності капіталовкладень, років	1		

Застосування удосконаленого агрегата John Deere 6R 110 + удосконалена сівалка забезпечує економію коштів в порівнянні з базовим варіантом 1380,63 грн./га.

Річний економічний ефект від застосування удосконаленої сівалки в порівнянні з існуючим варіантом – 143695,49 грн/рік при обсязі роботи 100 га.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що більш перспективним способом підвищення родючості ґрунтів і урожайності сільськогосподарських культур є локальне внесення гранульованих мінеральних добрив, суміщене з поверхневим обробітком ґрунту та сівбою. Тому розробка агрегату, який зможе працювати за сучасними технологіями землеробства, такими як no-till, з локальним внесенням мінеральних добрив в різні шари ґрунту для забезпечення живлення рослин на різних етапах їхнього розвитку є актуальною.

2. Розроблено сошник-глибокорозпушувач, який може вносити мінеральні добрива в різні шари ґрунту, забезпечуючи таким чином живлення рослин на різних етапах їх розвитку. Глибокорозпушувач може глибоко розпушувати нижній шар ґрунту перед сівбою рослин за технологією no-till, допомагаючи зменшити ерозію ґрунту, збільшити здатність ґрунту зберігати воду, покращити середовище росту кореневої системи рослин та сприяти та повному поглинанню поживних речовин добрива.

3. Теоретичним аналізом було встановлено, що робочу швидкість агрегату в необхідно вибрати в межах 1–4 км/год, що відповідає швидкості висівної котушки для внесення добрив 6,67–20 об/хв, початковий кут заповнення добривом був меншим або дорівнював природному куту спокою добрив $\alpha = 35^\circ$, а кут конусності θ паза був в межах $\theta = 8,02\text{--}50,42^\circ$.

4. В результаті моделювання проведення однофакторного експерименту для отримання оптимального кута встановлення тукопроводу з поступальною швидкістю руху 4 км/год і кутом сходу добрив 60° , було визначено, що кут встановлення тукопроводу повинен бути рівним $30\text{--}40^\circ$.

5. Безпечне виконання операції сівби з одночасним внесенням мінеральних добрив досягається добре організованою службою охорони праці на підприємстві. Моделювання небезпечних ситуацій при виконанні даної операції дозволило розробити заходи охорони праці при її виконанні. Ці заходи сприятимуть зниженню травматизму на виробництві та підвищать рівень безпеки задіяних працівників.

6. Застосування удосконаленого агрегата John Deere 6R 110 + удосконалена сівалка забезпечує економію коштів в порівнянні з базовим варіантом 1380,63 грн./га.

Річний економічний ефект від застосування удосконаленої сівалки в порівнянні з існуючим варіантом – 143695,49 грн/рік при обсязі роботи 100 га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія неорганічних речовин. Ч 3. Мінеральні добрива: навч. посібник / М.Д. Волошин, Я.М. Черненко, А.В. Іванченко, М.А. Олійник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. – 354 с.
2. Курлов В.І., Фесенко Г.В., Поляков А.М. Підвищення ефективності технічних засобів локального внесення мінеральних добрив при вирощуванні сільськогосподарських культур. *Інженерія природокористування*, 2020, №1(15), с. 53 – 58.
3. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин / [Бойко А.І., Свіренєв М.О., Шмат С.І., Ножнов М.М.]. – К., 2003. – 206 с.
4. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2004. – 544 с.
5. Дейкун, В.А.; Жук, Д.Г.; Мачок, Ю.В. Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2022, вип. 52. С. 41-47.
6. А. В. Рудь, Ю. Ф. Павельчук, І. О. Мошенко Теоретичні дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтового-розкидного способу сівби . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* 2009. Вип. 39. С. 250-256.
7. Рудь А. В. Мошенко І. О., Павельчук Ю. Ф Робочий орган сівалки для сівби зернових культур розкидним способом: короткий нарис до 60-річчя. Кам'янець-Подільський: ПДАУ, 2007. С.112.
8. Робочий орган для локального внесення мінеральних добрив чи посіву : пат 129713 МПК А01В 49/06. №u201804789; заявл. 02.05.2018; опубл. 12.11.2018. Бюл. №21.
9. Ґрунтообробний робочий орган: пат. 25169 Україна :МПК А01В 13/08 № u200703541; заявл. 30.03.2007; опубл. 25.07.2007, бюл. №11..
10. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. / Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. – Х.: Мачулін, 2016. – 244 с.: іл.
11. Wang, W.; Song, J.; Zhou, G.; Quan, L.; Zhang, C.; Chen, L. Development and Numerical Simulation of a Precision Strip-Hole Layered Fertilization Subsoiler While Sowing Maize. *Agriculture* 2022, 12, 938.
12. Теоретична механіка, [текст] підручник / В. М. Булгаков, В. В. Яременко, О.М. Черниш, М.Г. Березовий. – К. : «Центр учбової літератури», 2017. – 640 с.

13.

https://community.altair.com/community?id=community_blog&sys_id=5e7dc459979de950e3b0361e6253afae.

14. Wang, X.; Zhang, S.; Pan, H.; Zheng, Z.; Huang, Y.; Zhu, R. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations. *Biosyst. Eng.* 2019, 182, 138–150.

15. Wang, W.W.; Bai, Z.W.; Li, Z.Q.; Xie, D.B.; Chen, L.Q.; Wang, H. Straw/Spring Teeth Interaction Analysis of Baler Picker in Smart Agriculture via an ADAMS-DEM Coupled Simulation Method. *Machines* 2021, 9, 296.

16. Fang, L.F.; Cao, C.M.; Li, Q.; Qi, K.; Sun, X.D.; Ge, J. Fracture Analysis of Compacted Clay Soil Beams with Offset Notches Based on Three-Point Bending Test: Experimental Characterization and Numerical Simulation. *Adv. Civ. Eng.* 2022, 2022, 3699196.

17. Wang, Y.X.; Liang, Z.J.; Cui, T.; Zhang, D.X.; Qu, Z.; Yang, L. Structural design and experiment of maize layered fertilizer applicator. *J. Agric. Mach.* 2016, 47, 163–169.

18. Лехман С. Д., Рублев В. І., Рябцев Б. І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві. К.: Урожай, 1993. 267 с

19. Працехоронні засади у схемах, таблицях і графіках: Посібник / Укл. Войналович О.В. – К.: Основа, 2009. – 88 с.

20. Мельник І.І. Проектування технологічних процесів у рослинництві: Навчальний посібник / І.І. Мельник, В.Д. Гречкосій, С.М. Бондар; За ред. І.І. Мельника. – Ніжин: ТОВ “Видавництво Аспект-Поліграф”, 2005. – 192 с.