

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ПАРФЕНЮК БОГДАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.02.03:633.03.01

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ
ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Б. М. Парфенюк

Керівник роботи

Заєць М. Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Парфенюк Богдан Миколайович. Дослідження ефективності застосування комбінованих ґрунтообробних машин. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У роботі представлено результати дослідження ефективності застосування комбінованих ґрунтообробних машин у сучасних технологіях обробітку ґрунту.

Проаналізовано конструктивні особливості найпоширеніших типів комбінованих ґрунтообробних машин, вивчено вплив їхньої роботи на якість підготовки посівного шару, рівномірність кришення ґрунту, глибину обробітку та ступінь подрібнення післяжнивних решток. Проведено порівняння продуктивності та енергоспоживання комбінованих агрегатів із традиційними одноопераційними машинами.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що комбіновані ґрунтообробні агрегати забезпечують підвищення продуктивності до 20...35 %, зниження витрат пального на 12...25 % та покращення агрофізичних властивостей ґрунту завдяки оптимальному поєднанню робочих органів. Застосування таких машин сприяє скороченню кількості проходів техніки полем, зменшенню ущільнення ґрунту та підвищенню ефективності використання технічних ресурсів у рослинництві. Отримані результати можуть бути використані для вибору раціональних технологічних схем обробітку ґрунту та оптимізації машинно-тракторного парку сільськогосподарських підприємств.

Ключові слова: *комбіновані машини і агрегати; якість обробітку; робочі органи; технологічний процес; ущільнення ґрунту; паливна економічність; глибина обробітку.*

ABSTRACT

Bohdan Parfeniuk. Investigation of the Efficiency of Using Combined Soil-Tillage Machines. – *Qualification thesis, manuscript.*

Qualification thesis for obtaining the Master's degree in specialty 208 Agroengineering. – *Polissia National University, Zhytomyr, 2025.*

The thesis presents the results of a study on the efficiency of using combined soil-tillage machines in modern soil cultivation technologies.

The design features of the most common types of combined tillage machines are analyzed, and the influence of their operation on the quality of seedbed preparation, soil crumbling uniformity, tillage depth, and the degree of crop residue fragmentation is examined. A comparison of the productivity and energy consumption of combined units with traditional single-operation machines is carried out.

Based on the experimental results, it was established that combined tillage units ensure an increase in productivity by 20–35%, a reduction in fuel consumption by 12–25%, and an improvement in the agrophysical properties of the soil due to the optimal combination of working tools.

The use of such machines reduces the number of machinery passes across the field, decreases soil compaction, and increases the efficiency of technical resource use in crop production. The obtained results can be used to select rational technological schemes of soil tillage and to optimize the machinery fleets of agricultural enterprises.

Keywords: *combined machines and units; tillage quality; working tools; technological process; soil compaction; fuel efficiency; tillage depth.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОМБІНОВАНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН	
1.1. Аналіз операційних технологій.....	7
1.2. Огляд технологічно-конструкційних особливостей комбінованих машин.....	8
Висновки до розділу 1.....	15
2. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ	
2.1. Моделювання багатофункціонального комбінованого агрегату.....	17
2.1.1. Розрахунок потужності на робочий процес.....	19
2.2. Обґрунтування параметрів та моделювання робочих органів КГМ...	20
2.3. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів зубчастого ножа лапи.....	25
Висновки до розділу 2.....	28
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ҐРУНООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ	
3.1. Результати ефективності застосування прийнятих рішень.....	30
Висновки до розділу 3.....	35
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективний обробіток ґрунту є одним із ключових чинників підвищення продуктивності рослинництва та раціонального використання енергоресурсів. Сучасні комбіновані ґрунтообробні машини дозволяють поєднувати кілька операцій за один прохід, що значно скорочує витрати часу, пального та трудових ресурсів. Це особливо важливо в умовах зростання вартості енергоносіїв та необхідності зменшення техногенного ущільнення ґрунту. Застосування таких машин забезпечує якісну підготовку посівного шару і сприяє збереженню вологи, що актуально за умов кліматичних змін. Різноманіття конструкцій комбінованих агрегатів потребує дослідження їхньої ефективності для різних ґрунтово-кліматичних умов. Тому вивчення їхніх агротехнічних та енергетичних показників є важливим для вдосконалення технологій обробітку ґрунту та підвищення ефективності аграрного виробництва.

Метою роботи є: комплексне дослідження агротехнічної, енергетичної та експлуатаційної ефективності комбінованих ґрунтообробних машин шляхом обґрунтування доцільності їх застосування в сучасних технологіях обробітку ґрунту.

Завдання дослідження:

- проаналізувати конструктивні особливості та класифікацію сучасних комбінованих ґрунтообробних машин;
- вивчити вплив роботи комбінованих агрегатів на якість обробітку ґрунту, рівномірність кришення та глибину обробітку;
- оцінити експлуатаційну ефективність різних типів комбінованих ґрунтообробних машин у порівнянні з традиційними одноопераційними агрегатами;
- визначити оптимальні режими роботи комбінованих агрегатів для підвищення ефективності технологічного процесу обробітку ґрунту, розробити рекомендації щодо застосування.

Об’єкт дослідження – технологічний процес ґрунтообробітку в системі застосування комбінованих ґрунтообробних машин, та вплив їх роботи на продуктивність, енергетичні витрати та якість обробітку ґрунту.

Предмет дослідження - є ефективність роботи комбінованих ґрунтообробних машин, вплив взаємозв’язку конструктивних, технологічних та енергетичних показників, на якість обробітку ґрунту.

Методи дослідження: Теоретичне моделювання оцінки впливу конструктивних параметрів машин на якість обробітку та енергетичні показники. Експериментальні методи дослідження комбінованих агрегатів для визначення експлуатаційно-технічних параметрів. Аналіз та обробка стохастичних даних з використанням статистичних методів. Методи землеробської та теоретично механіки.

Перелік публікацій автора:

1. Заєць М. Л., Парфенюк Б. М. Результати досліджень оптимальних параметрів робочих органів машин. Зб. праць XI Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: ЖТФК, 2025. С. 159-161.

2.. Заєць М. Л., Парфенюк Б. М. Дослідження ефективності застосування комбінованих ґрунтообробних машин для вертикального обробітку: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 167-171.

3. Заєць М. Л., Парфенюк Б. М. Результати досліджень робочих органів машин для вертикального обробітку ґрунту. Зб. тез доп. XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" НУБіПУ. Київ. 2025. С. 171-174.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 19 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 39 сторінок комп’ютерного тексту, 24 рисунків та 1 таблиці.

1.ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОМБІНОВАНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

1.1. Аналіз операційних технологій

Комбіновані ґрунтообробні машини (КГМ) у сучасному землеробстві посідають провідне місце як технічні засоби, здатні поєднувати кілька операцій за один прохід агрегату. Їх застосування зумовлене необхідністю зменшення енерговитрат, оптимізації технологічних процесів та підвищення продуктивності польових робіт. Сучасні дослідження підтверджують, що комбіновані системи обробітку ґрунту забезпечують збереження структури ґрунту, покращують умови для проростання насіння та сприяють раціональному використанню паливно-енергетичних ресурсів.[1,3]

Основою ефективності КГМ є використання операційних технологій, що забезпечують одночасне виконання таких процесів, як розпушування, вирівнювання, ущільнення, підрізання бур'янів та формування посівного ложа. До найбільш поширених технологічних рішень належать: поєднання стоякових лап із дисковими секціями, встановлення кільчасто-шпорових або гумових котків, застосування гвинтових чи стрілчастих робочих органів, що оптимізують рух ґрунтового потоку. [8,9] Такі конструкції дозволяють адаптувати машину до різних ґрунтово-кліматичних умов і технологій землеробства (традиційної, мінімальної чи елементів no-till). [2,4]

Важливою складовою впровадження КГМ є їх здатність зменшувати кількість технологічних проходів до мінімуму, що суттєво знижує ущільнення ґрунту ходовими системами тракторів. За даними польових досліджень, заміна трьох-чотирьох окремих знарядь одним комбінованим агрегатом дозволяє скоротити загальні витрати часу до 40%, а витрати пального – до 25...30%.[10] Це безпосередньо впливає на економічну ефективність та ресурсозбереження у виробництві. [5,6]

У конструкціях сучасних КГМ особливу увагу приділяють геометрії та кінематиці робочих органів. Інженерні рішення щодо форми лез, кутів установки та параметрів обертання дискових модулів спрямовані на мінімізацію забивання, покращення подрібнення рослинних решток і забезпечення рівномірності глибини обробітку. Впровадження елементів регульованого тиску, плаваючих секцій і адаптивних систем налаштування підвищує точність роботи агрегату на різних фонах поля. [7]

Разом із тим, аналіз показує, що ефективність КГМ значною мірою залежить від правильного підбору технологічних параметрів – швидкості руху, глибини залягання робочих органів, кутів атаки та режимів навантаження. Неправильні налаштування можуть нівелювати переваги комбінування операцій, призвести до надмірного енергоспоживання або погіршення якості посівного ложа.

Отже, впровадження операційних технологій комбінованих ґрунтообробних машин є одним із ключових напрямів модернізації агротехнологій. Вони забезпечують комплексний обробіток ґрунту, економію ресурсів та покращення агрофізичних показників ґрунту. Подальший розвиток КГМ пов'язаний із удосконаленням конструктивних рішень, цифровим моніторингом параметрів роботи та інтеграцією машин у системи точного землеробства.

1.2. Огляд технологічно-конструкційних особливостей комбінованих машин

Комбінована структура робочих органів. Однією з ключових особливостей КГМ є поєднання різних типів робочих органів – наприклад, дискових секцій, лап (стрілчастих, долотоподібних) і котків — у межах одного агрегата (рис. 1.1). Це дозволяє здійснювати декілька операцій за один прохід: розпушення, подрібнення рослинних решток, вирівнювання ґрунту та ущільнення. [12]

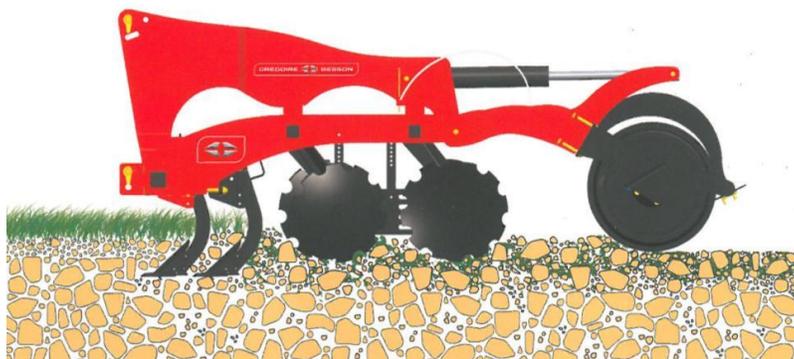
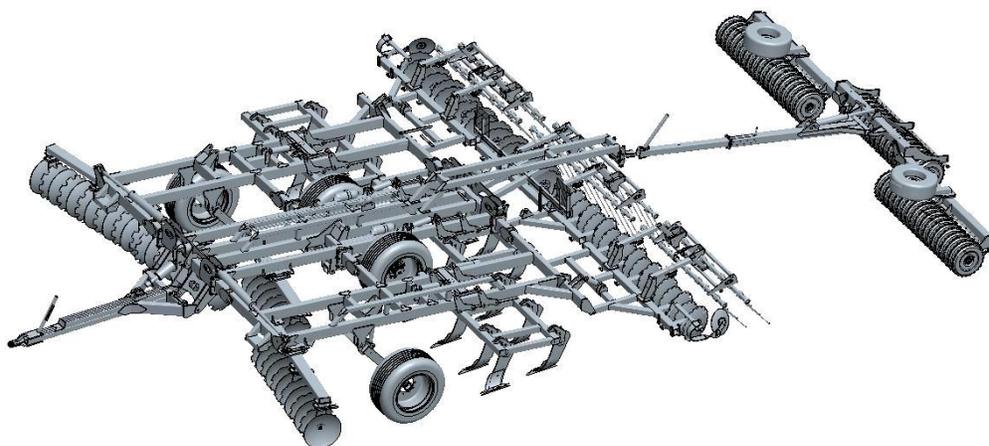
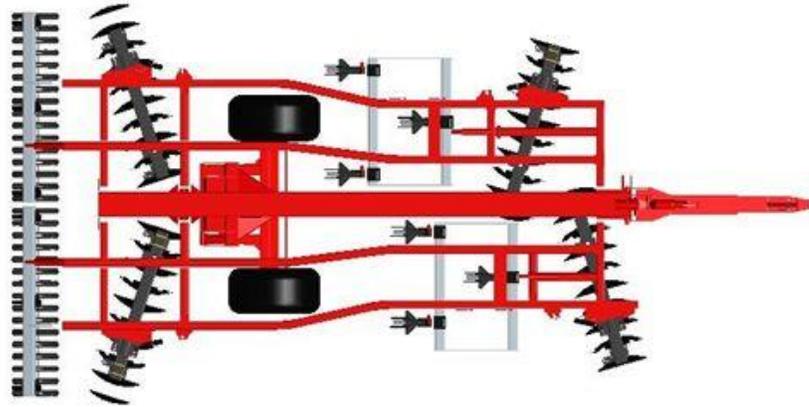


Рис. 1.1. COMBIMIX – навісне дисколапове знаряддя[11]

Ешелоноване розміщення елементів.

У конструкції КГМ часто реалізується ешелонована схема: передній ряд — диски або лапи, середній — вирівнювачі, а задній — котки або борінки. Така багаторівнева структурна схема гарантує високий ступінь обробітку: передні робочі органи руйнують структуру ґрунту, середні вирівнюють, а задні котки ущільнюють поверхню, формуючи посівне ложе (рис. 1.2).





Р

Центрально розташовані колеса дають змогу регулювати робочу глибину, що дозволяє працювати без котка, який у вологих ґрунтових умовах уповільнює роботу.

Геометрія та механіка робочих органів. Лапи (стрілчасті, долотоподібні): широко використовуються пружні лапи, які встановлюють із певними кутами атаки, щоб забезпечити глибоке розпушення без надмірного зусилля (рис. 1.3.,1.4.). [11,12]

2

ГАММА DXR RC при



Рис. 1.3. Лапи типу Мішель, Дискодан виробника ГРЕГОРІ БЕССОН[11]



Рис. 1.4. Лапові робочі органи долотоподібні: прямообернене долото, стрілочаста лапа, дефлекторна (з ліва на право) [11]

Диски: технологія виготовлення дискових секцій передбачає оптимізацію форми, матеріалів та міцності, щоб забезпечити ефективне подрібнення і резистентність до зносу (рис. 1.5.) [11,12]

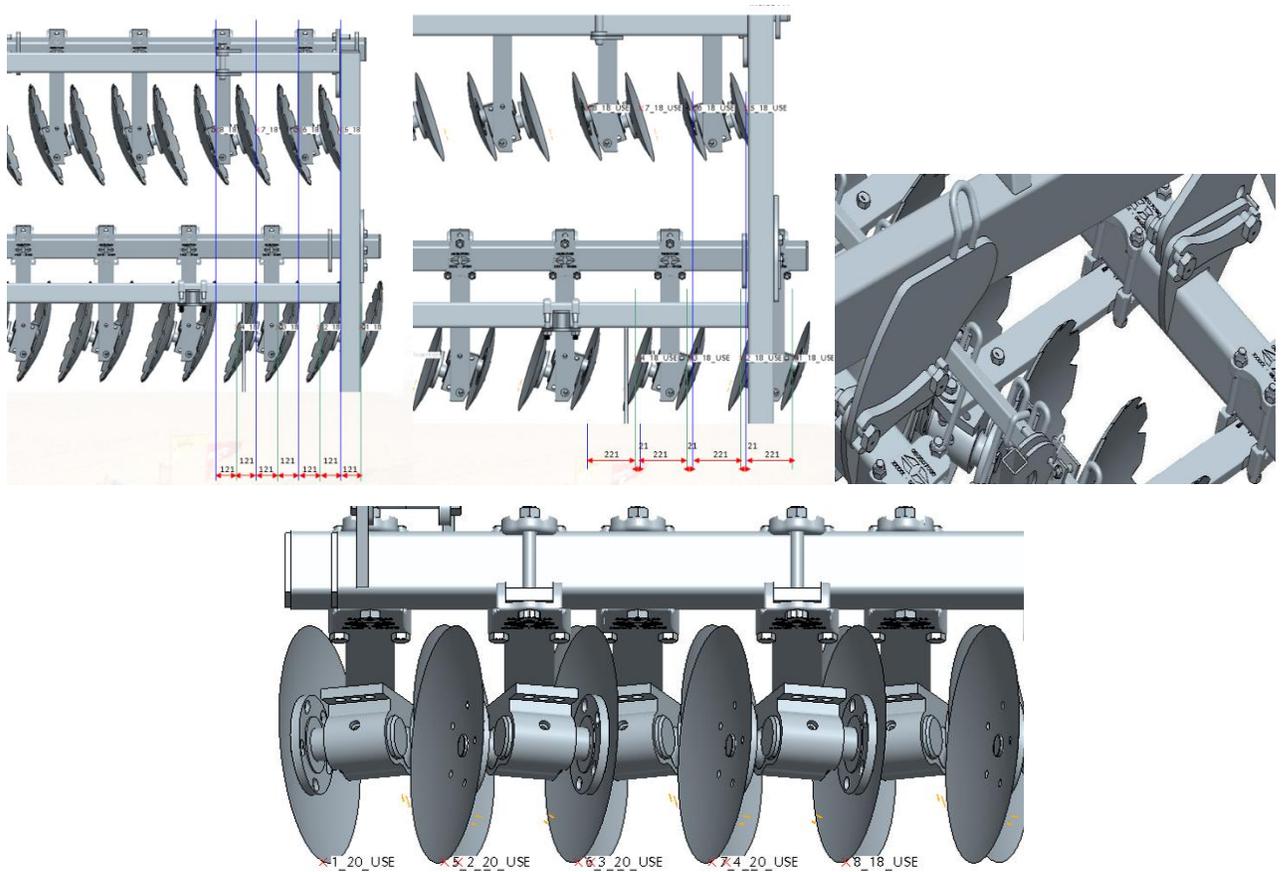


Рис. 1.5. Диски DISCOFLEX Ø 620 мм нові під час заглиблення в ґрунт[11]

Котки: конструкція котків може варіюватися — пруткові, кільчасто-шпорові тощо. Наприклад, у моделі «ЕМОРАК» для комбінованої борони та для більш важких ґрунтів фірми Грегуар Бессон застосовуються кільчасто-шпорові котки, що забезпечує рівномірне ущільнення ґрунту (рис. 1.6.). [11]



Рис. 1.6. Котки «ЕМОРАК» для комбінованої борони та для більш важких ґрунтів фірми Грегуар Бессон[11]

Застосовуються також, причіпні котки, в модульних чи класичних комбінація машин (рис. 1.7).

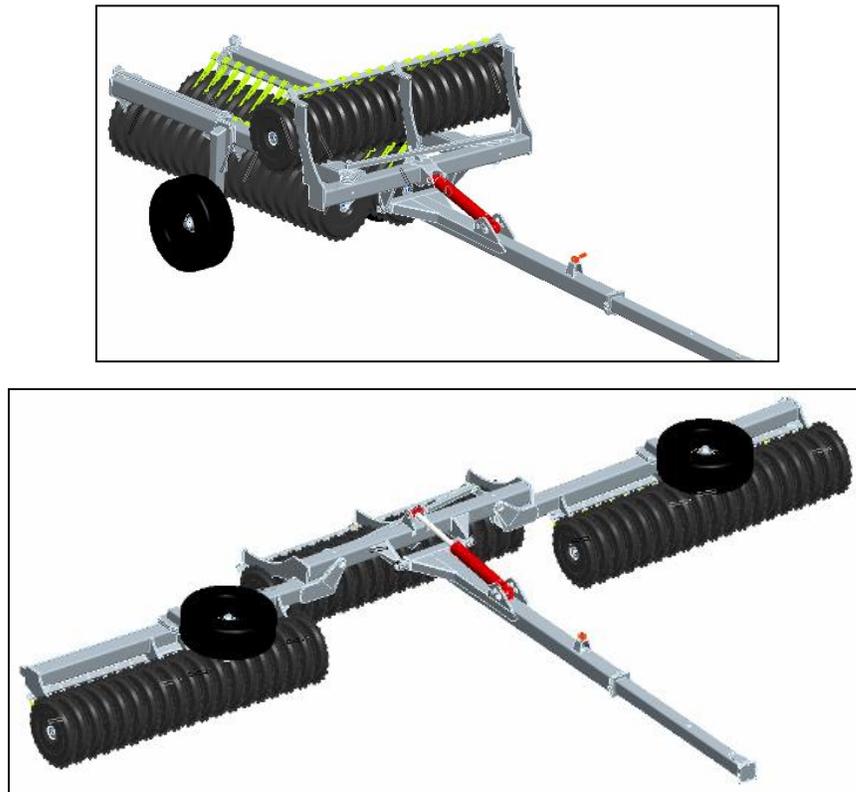


Рис. 1.7. Причіпний коток SEED PACK фірми Грегуар Бессон [11]

Модульність конструкції. Деякі сучасні комбіновані машини створюють за модульним принципом: окремі блоки (лапи, котки, вирівнювачі) можна комбінувати відповідно до потреб поля, ґрунту або операції. Так, модульний підхід дозволяє адаптувати агрегат під різні агротехнологічні умови (рис. 1.8., 1.9). [11]

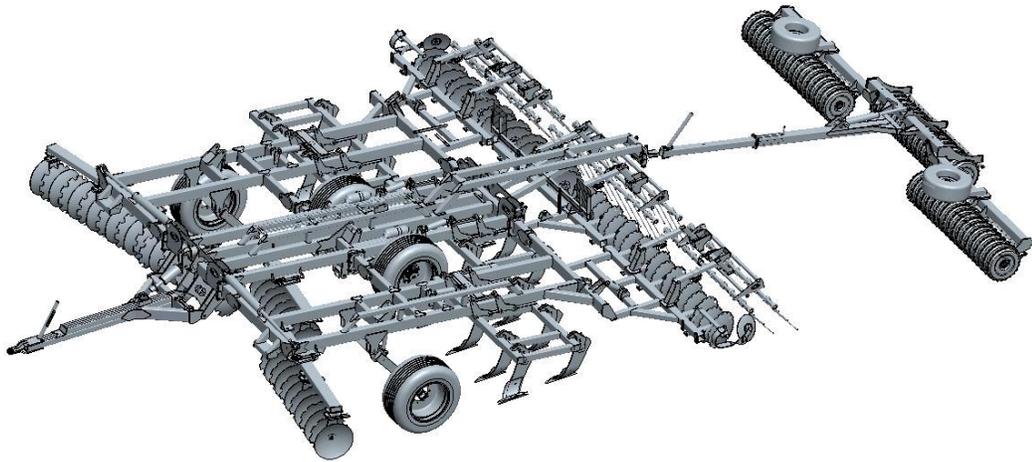


Рис. 1.8. комбінована дисково-лапова машина **HELIFLEX** + коток **SEEDPACK** [11]

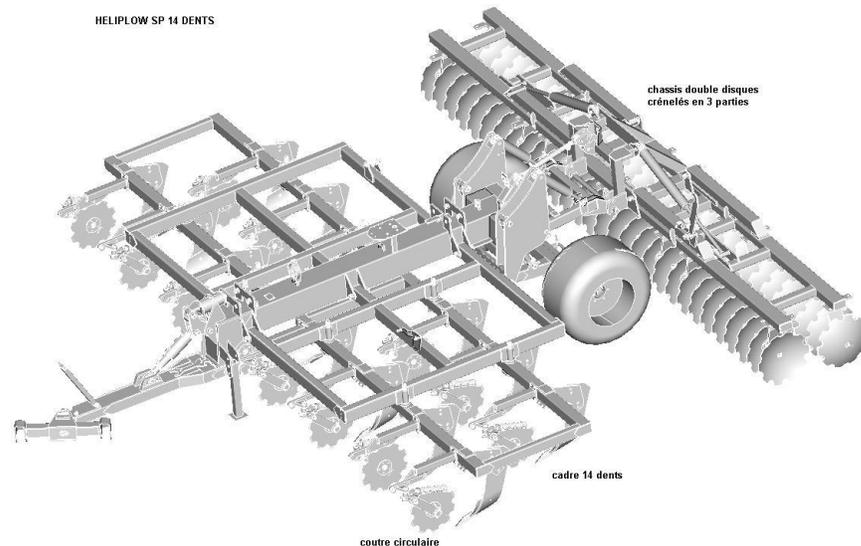


Рис. 1.9. Схема комбінування лапового агрегату з дисковим [11]

Таке поєднання дозволяє знизити витрати на виконання технологічного процесу та час на експлуатації агрегатів.

Енергетичні й екологічні особливості

При проектуванні КГМ враховуються агротехнологічні й екологічні вимоги: конструкція робочих органів має мінімізувати ущільнення ґрунту і його руйнацію. [6] В цьому випадку теж застосовуються глибокорозпушувачі Helios HD SP 6–7 м, посиленій (рис. 1.10). Ця модель створена для роботи в умовах дуже твердих і сухих ґрунтів, із робочою глибиною до 40 см і більше. [11]

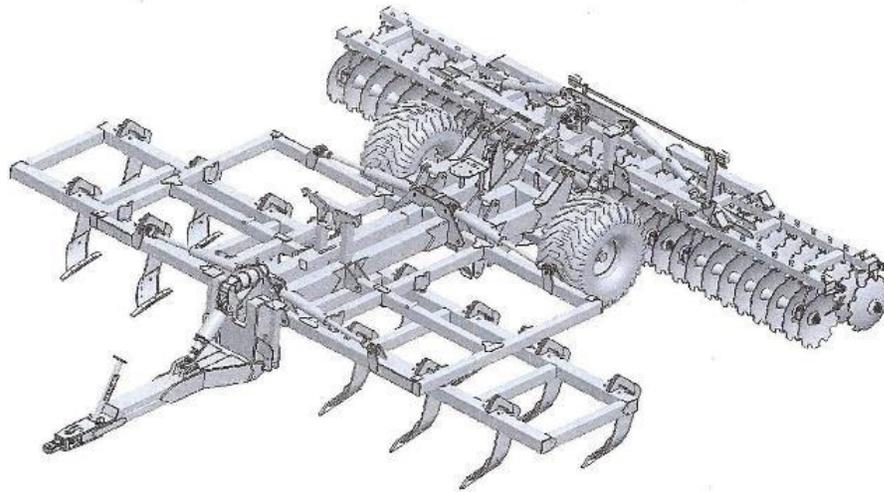


Рис. 1.10. Глибокорозпушувач Helios HD SP з дисковими робочими органами

Також важливим є зниження тягового опору агрегату: сучасні розробки передбачають оптимізацію геометрії, зменшення тертя або використання вібраційних елементів для більш економного застосування (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Глибокорозпушувач HELIRIPPER, з гідросистемою захисту та гасіння коливань та вібрацій

Конструкційна надійність та адаптивність

Комбіновані агрегати є складнішими за прості машини, і тому особлива увага приділяється надійності: з'єднання модулів, кріплення робочих органів, регулювання глибини.

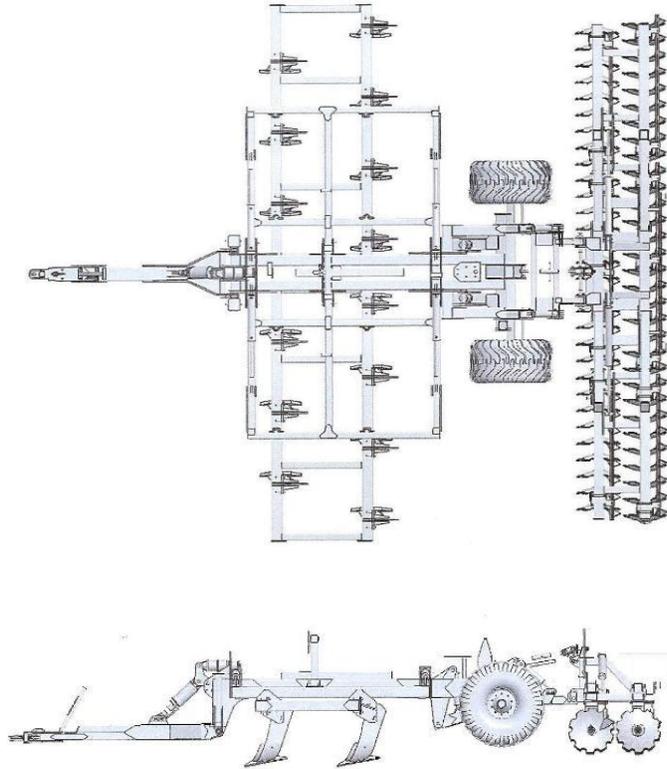


Рис. 1.12. Розпушувач комбінований HELIOS HD SP з адаптивною системою з'єднання модулів

Агрегати повинні бути адаптивними до різних ґрунтово-кліматичних умов, тому в конструкціях передбачено регульовані кути атаки лап, змінні амплітуди пружинних стійок та змінні характеристики котків для оптимальної роботи.

Висновки до розділу 1.

Раціональні конструкції робочих органів важлива частина досліджень присвячена пошуку раціональних конструкцій робочих органів для комбінованих агрегатів, щоб збалансувати міцність, вагу, ефективність обробітку та

зносостійкість. Аналізуючи конфігурації робочих органів, які дають оптимальні результати, для різних технологічних схем, та ефективність комбінованих ґрунтообробних машин, значною мірою визначається коректним вибором технологічних параметрів: робочої швидкості, глибини ходу робочих органів, кутів їх атаки та режимів навантаження.

Некоректні налаштування можуть звести нанівець переваги поєднання операцій, спричинити підвищене енергоспоживання або погіршити якість формування посівного ложа.

Таким чином, застосування операційних технологій у комбінованих ґрунтообробних машинах є важливим напрямом удосконалення сучасних агротехнологій. Такі машини дають змогу виконувати комплексний обробіток, раціонально використовувати ресурси та поліпшувати агрофізичні властивості ґрунту. Подальше вдосконалення КГМ пов'язане з оптимізацією конструкцій, цифровим контролем робочих параметрів і їх інтеграцією в системи точного землеробства.

2. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ГРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ

2.1. Моделювання багатофункціонального комбінованого агрегату

Моделювання багатофункціональних комбінованих ґрунтообробних агрегатів є ключовим інструментом для визначення їх функціональної ефективності, оптимізації конструкційних рішень та прогнозування поведінки за різних ґрунтово-кліматичних умов. На відміну від традиційних однопрохідних машин, комбіновані агрегати поєднують у собі декілька виконуваних технологічних операцій — глибоке або поверхнєве рихлення, інтенсивне та формувальне дискування, вирівнювання поверхні, подрібнення грудок і коткування. У зв'язку з цим зростає складність їх конструкції, взаємодії робочих органів між собою та із середовищем, що потребує застосування комплексних методів моделювання.

Багатофункціональний комбінований агрегат, як правило, складається з таких основних технологічних модулів:

- Передні розпушувальні робочі органи (жорсткі лапи, стрілчасті лапи, чизельні робочі органи), призначені для руйнування ущільнених горизонтів і покращення інфільтраційних властивостей ґрунту.
- Дискові секції (однорядні або дворядні), які забезпечують інтенсивне перемішування рослинних решток і ґрунту, подрібнення грудок та вирівнювання поверхні.
- Вирівнювальні планки, пружинні борони та зубові граблі, які розподіляють ґрунт по поверхні, забезпечуючи формування рівного посівного ложа.
- Котки (трубчасті, кільчасті, спіральні, клиновидні) для додаткового подрібнення та ущільнення поверхневого шару.

Рама та кінематичні вузли, що забезпечують жорсткість конструкції, рівномірність передачі навантажень і можливість регулювання глибини.

Для моделювання агрегату всі ці елементи розглядаються як окремі підсистеми з відповідними параметрами — геометричними, силовими, інерційними та функціональними. Комп'ютерна модель інтегрує їх у єдину структуру та дозволяє передбачити їхню спільну роботу при різних режимах експлуатації.

Нами запропоновано компоновочну схему моделі ґрунтообробного агрегату (рис. 2.1.) , де поєднано основні компоненти комбінованої машини, а саме рихлячої лапи з індивідуальними прорізними зубчастими дисками на системі підвіски з компенсаторами перевантаження, та модуль секцій дискових сферичних робочих органів.

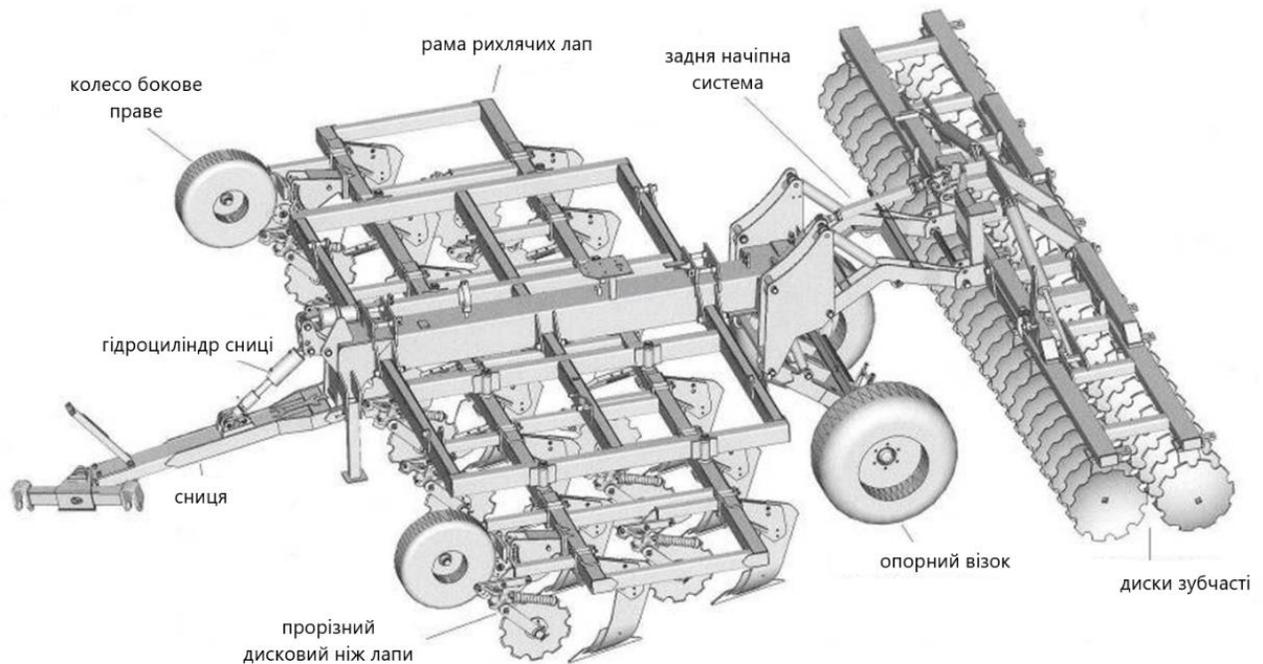


Рис. 2.1. Загальний вигляд компоновочної схеми напівначіпної КГМ

Побудова математичної та комп'ютерної моделі дозволяє визначити величину тягового опору, потужність, необхідну для приводу агрегату, ступінь коливань рами та робочих органів, ефективність взаємодії ґрунту з окремими елементами конструкції, а також спрогнозувати якість формування посівного ложа. Це, у свою чергу, дозволяє мінімізувати кількість польових випробувань і прискорити процес конструювання.

Основою моделювання є розрахунок тягового опору кожного робочого органа, який визначається як функція форми елемента, швидкості руху, глибини обробітку та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Сумарний опір агрегату запишемо у вигляді:[13]

$$F_{заг} = \sum_{i=1}^n F_i + F_{дод}, \quad (2.1)$$

де

F_i - опір i -го робочого органа; кН

$F_{дод}$ - додаткові втрати на тертя, деформацію рами, буксування, кН.

Для лапових робочих органів опір описується залежністю: [13]

$$F_{лап} = b \cdot h \cdot A \cdot f(\alpha), \quad (2.2)$$

де

b - ширина леза, м

h - глибина, м

A - коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту,

$f(\alpha)$ — функція кута атаки.

Опір дискового робочого органа: [14]

$$F_{диск} = k_1 \cdot D \cdot h + k_2 \cdot V^2, \quad (2.3)$$

де

D - діаметр диска, м;

V - швидкість агрегату,

k_1, k_2 - емпіричні коефіцієнти.

2.1.1. Розрахунок потужності на робочий процес

Необхідна потужність тягового агрегату визначається за класичною формулою:

$$P_{привод} = F_{заг} \cdot V_p, \quad (2.4)$$

де V_p - робоча швидкість руху, м/с

Цей показник дозволяє визначити відповідність конструкції агрегату потужності трактора, а також вибрати оптимальний режим руху.

2.2. Обґрунтування параметрів та моделювання робочих органів КГМ

Під час моделювання технологічного процесу руху рихлячої лапи та її взаємодії з ґрунтовим середовищем за умов змінних тягово-швидкісних режимів приймемо такі припущення: швидкість руху агрегату є сталою та перебуває в допустимих межах; ґрунтовий масив, що зазнає руйнування, вважається нестисливим; деформація ґрунту проявляється в зоні від площини різання до максимально допустимої глибини обробітку; переміщення ґрунту в зоні стискання відбувається у формі конусоподібного тіла обертання; об'єм ґрунту, витіснений долотом та стійкою, прямо пропорційний об'єму конуса зони деформації, сформованої лапою.

Об'єм витіснення ґрунту має форму, близьку до конічної. Зону деформації масиву доцільно подати у вигляді дзеркальної піраміди, що включає конус з основою площі S_k та піраміду з основою площі S_p , зрізану площиною вершини, площа якої дорівнює робочій ширині леза долота $b_{лез}$ зображено на (рис. 2.2).

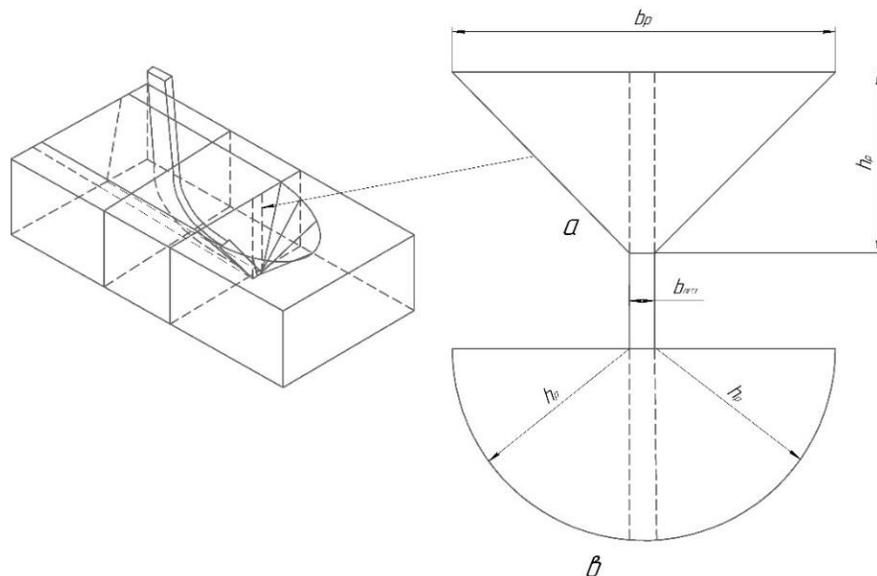


Рис. 2.2. Графічна модель деформації масиву ґрунту лапою

а) переріз конуса деформації масиву ґрунту; б) переріз повздовжньої зони деформації ґрунту.

Встановимо об'єм ґрунту витісненого лопом у формі конуса та піраміди:[17]

$$V_k = \frac{1}{3} h_p \cdot S_k, \quad (2.5)$$

$$V_n = \frac{1}{2} h_p S_n. \quad (2.6)$$

Загальний об'єм сформованої зони деформації можна подати у такому вигляді:[15]

$$V_{kd} = \frac{1}{6} h_p (2S_k + 3S_{II}). \quad (2.7)$$

Подавши площу верхнього зрізу S_k через радіус, що дорівнює теоретичній глибині занурення лапи h_p (рис. 2.2), одержимо:

$$S_k = \frac{\pi \cdot h_p^2}{2}. \quad (2.8)$$

Оскільки площа S_{II} основи пірамідального-конічного масиву є прямокутною та визначається параметрами: шириною леза долота та довжиною сторони, що відповідає глибині обробітку h_p

Тоді запишемо

$$S_{II} = b \cdot h_p. \quad (2.9)$$

Підставивши параметри з 2.8 та 2.9 у залежність 2.7, розрахуємо об'єм:

$$V_{kd} = \frac{1}{6} h_p (\pi \cdot h_p^2 + b \cdot h_p). \quad (2.10)$$

Після проведення математичних перетворень одержано вираз для визначення об'єму масиву ґрунту, деформованого долотом:

$$V_{kd} = \frac{1}{6} h_p^2 (\pi \cdot h_p + 3b_p) \quad (2.11)$$

З урахуванням сформульованих припущень значення додатково витісненого об'єму ґрунту можна визначити за формулою:

$$V_{PG} = V_{K_d} \cdot K - V_{K_d} = V_{K_d} (K - 1), \quad (2.12)$$

де K – щільність масиву ґрунту до (K_d) та після обробки (K_n),

$$\text{де} \quad K = \frac{K_d}{K_n}.$$

Під створеною деформацією розпушений ґрунт утворює масив конічної форми, площу його основи розрахуємо з (2.8) і (2.9):

$$\text{звідки} \quad S_{PP} = S_{K_d} = \frac{\pi \cdot h_p^2}{2} + bh_p. \quad (2.13)$$

Створений додатковий об'єм ґрунту під час роботи долотом лапи, з урахуванням висоти циліндра $h_{ц}$ площі основи конуса верхнього шару ґрунту (рис. 2.3.), з достатньою точністю можна визначити за формулою:

$$V_{PG} = h_B \cdot S_{PP}, \quad (2.14)$$

Підставивши значення величини площі з (2.13) в 2.14, отримаємо залежність для визначення об'єму ґрунту:

$$V_{PG} = h_B \frac{h_p (\pi h_p + 2b)}{2}, \quad (2.15)$$

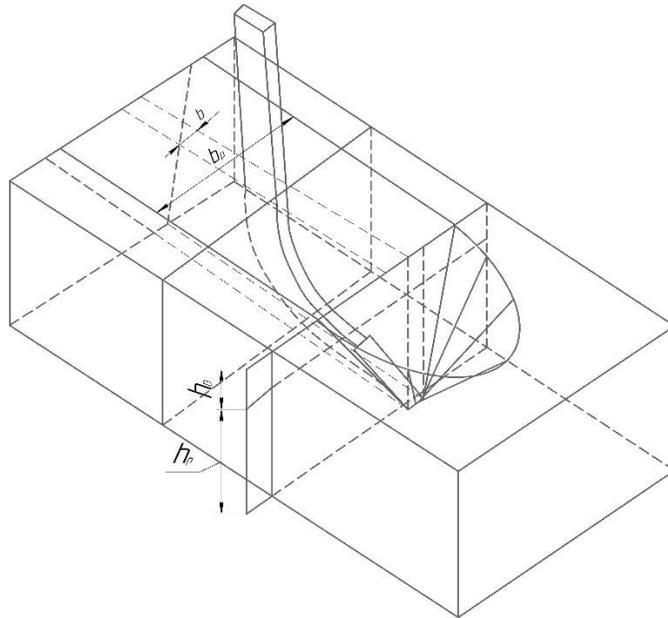


Рис. 2.3. Схема до визначення величини розпушення ґрунтового масиву під час обробітку долотом лапи

З урахуванням виразів (2.11), (2.12) і (2.15) математична модель для визначення робочої глибини обробітку ґрунту h_p для долотоподібної розпушувальної лапи можна записати у вигляді:

$$h_{p2} = \frac{1}{3} h_p (K - 1) \cdot \frac{\pi h_p + 3b}{\pi h_p + 2b} \quad (2.16)$$

Провівши аналіз залежності (2.16), можна побачити, що величина коефіцієнта рихлення масиву ґрунту залежить від зміни його об'ємної маси, глибини обробітку та робочої ширини долота. На рис. 2.4 представлено графічну залежність зміни глибини обробленого ґрунтового масиву при зміні робочої глибини h_p , робочої ширини лапи b та якісних показників обробітку, що характеризує коефіцієнт K , який враховує щільності маси ґрунту.

Оцінка ефективності застосування робочої долотоподібної лапи слід враховувати зворотню дію сусідньої лапи (рис. 2.5), яка зменшує об'єм ґрунтового масиву рівно на площу сектора розпушування. Значення цього об'єму можна визначити за наступною формулою: [15]

$$V_c = \frac{1}{3} h_c \cdot S_c, \quad (2.17)$$

де h_c – величина висоти зрізу ґрунтового сектора;

S_c – площа сектора масиву ґрунту.

Висоту сектора деформації h_c при куті розкриття ґрунту 45° та за умови, що стійки лап розташовані з інтервалом B_p , який обмежує смугу ширини деформаційного масиву від дії долота розміром b , розраховують за формулою: [15]

$$h_c = \frac{b - B_p}{2}. \quad (2.18)$$

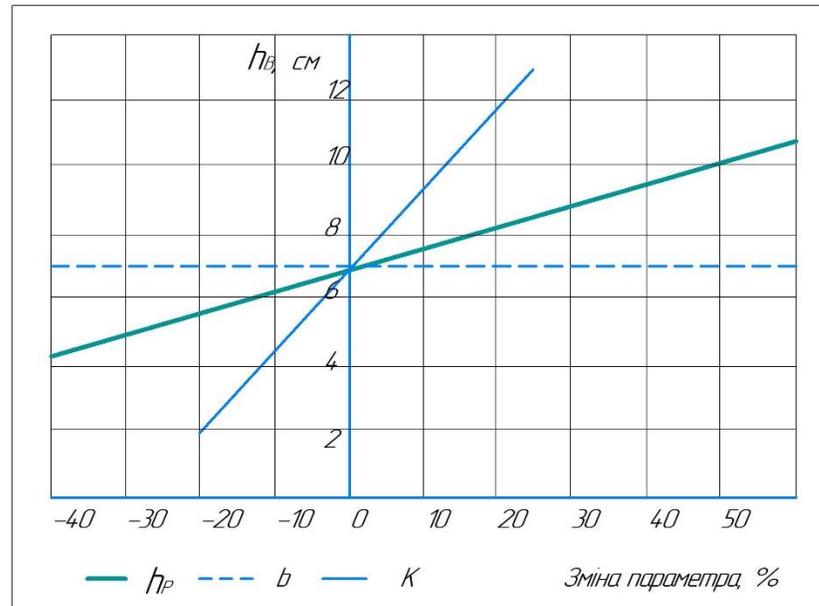


Рис. 2.4. Залежність висоти обробленого масиву ґрунту від робочої глибини занурення та ширини долота лапи і коефіцієнта зміни об'ємної маси ґрунту (при $h_p = 12$ см., $b_{\text{лез}} = 80$ мм. і $K = 1,3$)

На рис. 2.5 наведено аналітичні криві залежності глибини обробітку лап h , які розпушують ґрунт у вертикальній площині, та висоти деформованого масиву h_b обробленого ґрунту для комбінованого розпушувача.

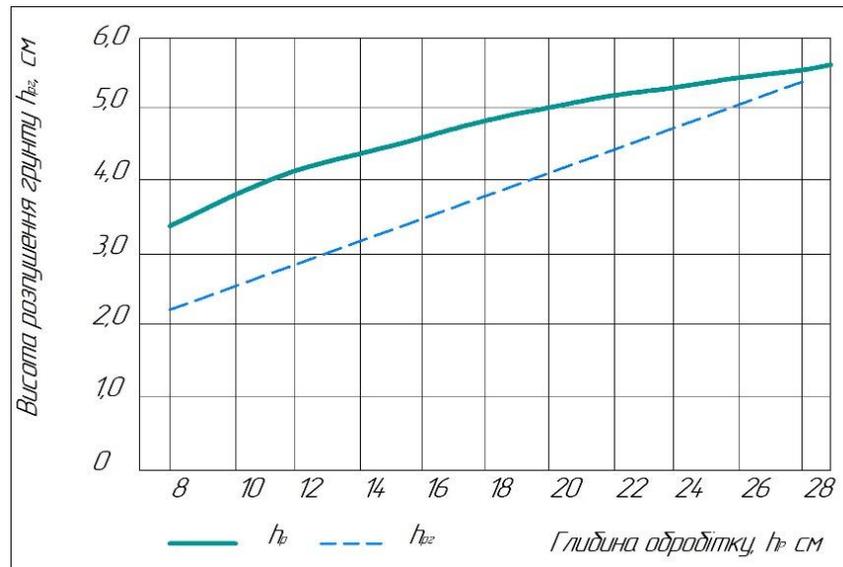


Рис. 2.5. Залежність значення висоти витісненого ґрунту від глибини занурення лап h_p та аналогічного по Strip-Till h_{ps} (при $h_p=12..28$ см, і $B_{pr}=36$ см).

Графічна залежність представлена на рис. (2.6.) показує збільшення параметра висоти на Δh_s підняття маси ґрунту у співвідношенні з робочою глибиною h_p при виконанні операції рихлення КГМ.

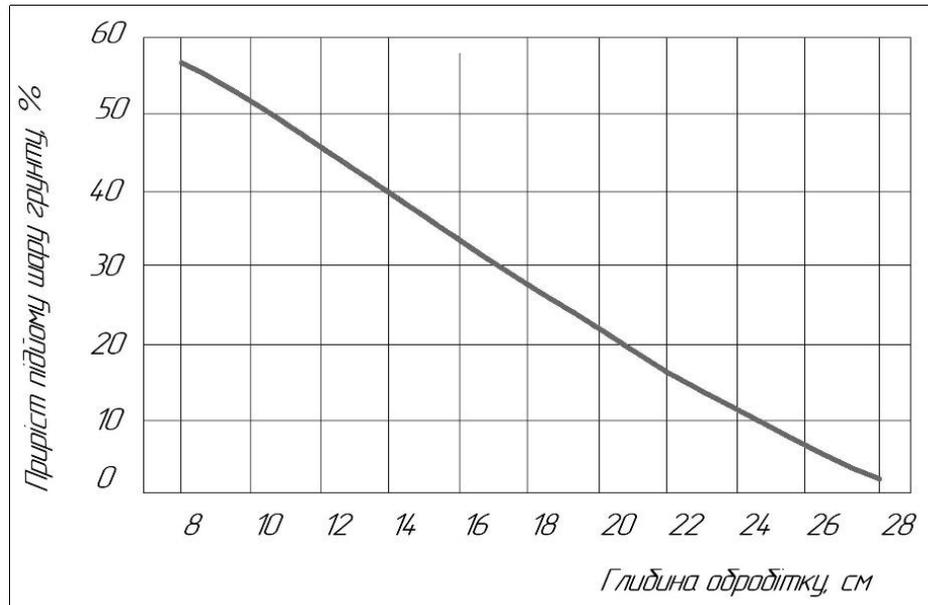


Рис. 2.6. Залежність збільшення підйому об'єму ґрунту до робочої глибини руху лап

Аналіз графіків (рис. 2.5, 2.6) свідчить, що рихляча лапа з розширенням по долоту при глибикому рихленні, призводить до зростання рівня розпушення ґрунту, сприяючи ефективній заробці рослинних решток та поліпшенню перемішування поживних решток

2.3. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів зубчастого ножа лапи

Дисковий ніж рухається попереду стійки під дією сили, прикладеної до центру диска. Крім цього, ведений диск зазнає дії прикладеного моменту опору коченню (рис. 2.7).

прорізний
дисковий ніж лапи

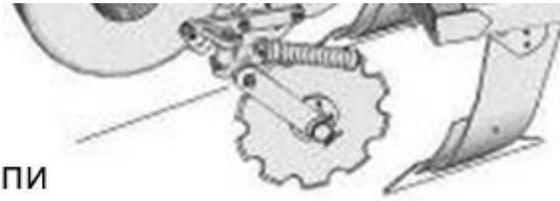


Рис. 2.7. Дисковий ніж прорізний

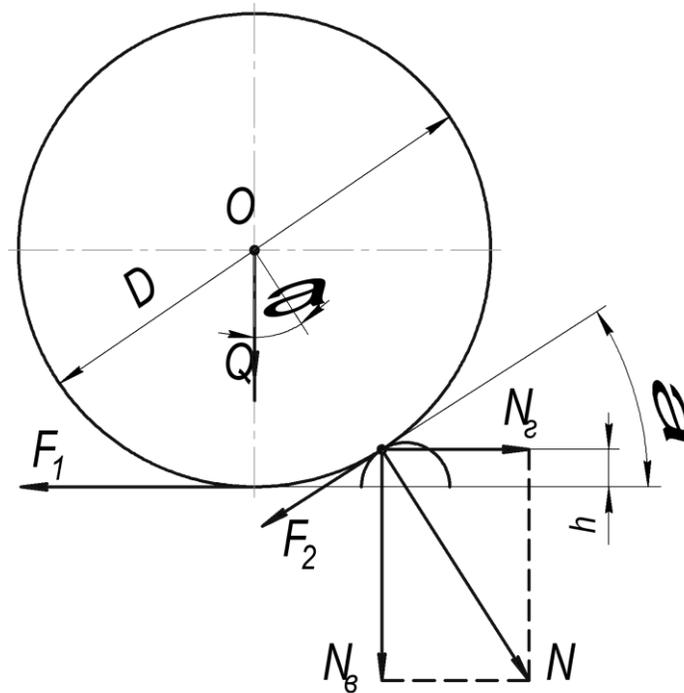


Рис. 2.8. Схема дії прорізного диска з рослинними рештками на поверхні поля

Нормальне зусилля притискання N утворює силу тертя між різальною крайкою і умовним стеблом та ґрунтом F_2 і поверхнею поля F_1 . З метою зниження опору різання диска, необхідно, щоб створились такі умови його роботи: він має затиснути матеріал, щоб відбулось прорізання.

За наступної умови: [16]

$$F_1 + F_2 \cos \alpha \geq N_{\bar{a}}, \quad (2.19)$$

де

$N_{\bar{a}} = N \sin \alpha$, $F_2 = N \operatorname{tg} \varphi_2$, $F_1 = N \operatorname{tg} \varphi_1$, де φ_2 і φ_1 - кут тертя матеріалу дискового ножа та об'єктом різання; [16]

Q - зусилля, що передається на ніж, від ваги машини.

де

$$Q = N_{\bar{a}} + F_2 \cdot \sin \alpha = N \cdot \cos \alpha + N \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \sin \alpha.$$

звідки

$$(N \cdot \cos \alpha + N \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \sin \alpha) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + N \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \cos \alpha \geq N \cdot \sin \alpha$$

тоді

$$\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi_2 \geq \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2 \geq \operatorname{tg} \alpha (1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2),$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2}{1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2},$$

Умова прорізання

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} (\varphi_1 + \varphi_2),$$

За цієї умови стеблові матеріали та рештки будуть защемленні та відбудеться процес їх перерізання:

$$\alpha \leq \varphi_1 + \varphi_2, \quad (2.20)$$

де

$$\cos \alpha = \frac{r - h}{r} = \frac{D - 2h}{D} = 1 - \frac{2h}{D},$$

тоді

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha} = \frac{D \sqrt{1 - \left(1 - \frac{4h}{D} + \frac{4h^2}{D^2}\right)}}{D - 2h} = \frac{D \sqrt{\frac{4h}{D} - \frac{4h^2}{D^2}}}{D - 2h} = \\ &= \frac{D \sqrt{\frac{4hD - 4h^2}{D^2}}}{D - 2h} = \frac{2\sqrt{hD - h^2}}{D - 2h}. \end{aligned}$$

Перетворивши вираз, отримали

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{2\sqrt{hD - h^2}}{D - 2h}, \quad (2.21)$$

Встановивши висоту шару пожнивних решток на поверхні поля та значення кутів φ_1 і φ_2 , що дозволить визначити величину діаметра дискового ножа D . З метою уникнення переміщення ковзання стебел, кут обхвату диска α повинен бути в межах $\alpha = 15 \dots 20^\circ$. [18]

Тоді значення діаметра дискового ножа отримаємо з виразу:

$$D = \frac{2h}{1 - \cos \alpha}. \quad (2.22)$$

Висновки до розділу 2.

У результаті виконаного моделювання багатофункціональних комбінованих ґрунтообробних агрегатів встановлено, що їх конструкційно-технологічні характеристики істотно впливають на якість обробітку ґрунту, енерговитрати та рівень взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем. Побудована компоновочна схема агрегату та математична модель дозволили інтегрувати роботу рихлячих лап, прорізних дискових ножів і дискових секцій у єдину систему та проаналізувати їхню спільну дію при різних режимах роботи.

Визначено, що основним параметром, що формує тяговий опір агрегату, є геометрія лапи та характер її взаємодії з ґрунтом. Запропонована модель деформації масиву ґрунту у вигляді поєднання конічної та пірамідальної зон дає змогу аналітично описати об'єм витісненого та розпушеного ґрунту, а також визначити вплив робочої ширини долота, глибини обробітку та щільності ґрунту на формування зони обробітку.

Аналіз отриманих залежностей (рис. 2.4–2.6) показав, що збільшення робочої ширини долота та глибини рихлення сприяє підвищенню висоти зони деформації, покращенню розпушення та ефективнішому зароблянню рослинних решток. Водночас враховано взаємний вплив сусідніх лап, який зменшує

корисний об'єм розпушеного масиву, що важливо при оптимізації міжрядного розміщення робочих органів.

Окремо обґрунтовано конструкційні параметри прорізного зубчастого дискового ножа. Встановлено умови, за яких забезпечується надійне прорізання рослинних решток без ковзання та їх затискання між диском і ґрунтом. Отримані розрахункові вирази дозволяють визначити діаметр диска, кут обхвату та нормальне притискне зусилля, необхідне для якісного різання.

Таким чином, проведене моделювання підтвердило ефективність застосування комбінованих ґрунтообробних агрегатів із долотоподібними лапами та прорізними дисками, а також дозволило встановити раціональні параметри їх роботи. Результати можуть бути використані для оптимізації конструкційних рішень, прогнозування енерговитрат і зменшення кількості польових випробувань при створенні нових моделей комбінованих машин.

3.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ГРУНООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ

3.1. Результати ефективності застосування прийнятих рішень

Комінований обробіток ґрунту є відносно новим технологічним напрямом у сучасному землеробстві, проте його впровадження стрімко набуває поширення завдяки відповідності вимогам консерваційних та мінімальних технологій. Знаряддя комбінованої дії розробляються з метою задоволення потреб цього сегмента та забезпечення ефективного розпушення ґрунтового профілю без порушення природної структури ґрунту.

Аналіз особливостей функціонування машин комбінованої обробки засвідчує, що такі знаряддя суттєво відрізняються за конструктивно-технологічними параметрами, що визначають характер їх взаємодії з ґрунтовим середовищем. Інструменти VT належать до категорії агресивних дискових агрегатів, що зумовлює їхні відмінності від лапових глибокорозпушувачів і впливає на параметри продуктивності, енергоспоживання та якість формування обробленого шару.

Визначальним конструктивним параметром є груповий кут розташування робочих органів, який задає режим роботи — від дрібнолапового поверхневого рихлення до інтенсивного вертикального проникнення. Конфігурація долота і леза безпосередньо впливає на формування зони деформації ґрунту, розміри вертикального розпушеного профілю та інтенсивність руйнування ущільнених прошарків.

Не менш важливим компонентом є система фінішної обробки, яка забезпечує вирівнювання поверхні поля та стабілізацію структури ґрунту після проходження основних робочих органів. Вона визначає підсумкову якість профілю, однорідність грудкуватості та підготовленість ґрунту до сівби.

Таким чином, ефективність машин вертикального обробітку ґрунту визначається комплексною взаємодією конструктивних параметрів робочих органів, кінематичних режимів та засобів фінішної обробки, що у сукупності забезпечує цільовий агротехнічний результат.



Рис. 3.1. Результати роботи комбінованого знаряддя

Для агрегатів комбінованого обробітку ґрунту (КГМ) доцільно застосовувати дискові передні леза підвищеної міцності з хвилястим або прямим профілем різальної крайки (рис. 3.2). Конструкція цих дискових ножів розроблена таким чином, щоб забезпечити їх взаємодоповнюваність у процесі обробітку. Оскільки до 60% подрібнення рослинних решток виконується саме передніми лезами, використання суцільних дисків дає змогу підвищити

ефективність подрібнення бур'янової рослинності та корневих систем, що покращує якість подальшої обробки.

З огляду на те, що комбінування видів обробітку передбачає переважно вертикальне переміщення ґрунту, конструкція лез оптимізована для роботи в такому режимі. У разі застосування агрегатів для подрібнення стеблових решток, зокрема соломи або стебел кукурудзи, використання дисків із хвилястими зубчастими лезами забезпечує покращене різання та інтенсивніше перемішування рослинних залишків із ґрунтом, сприяючи їх якісному загортанню та рівномірному розподілу в орному шарі.

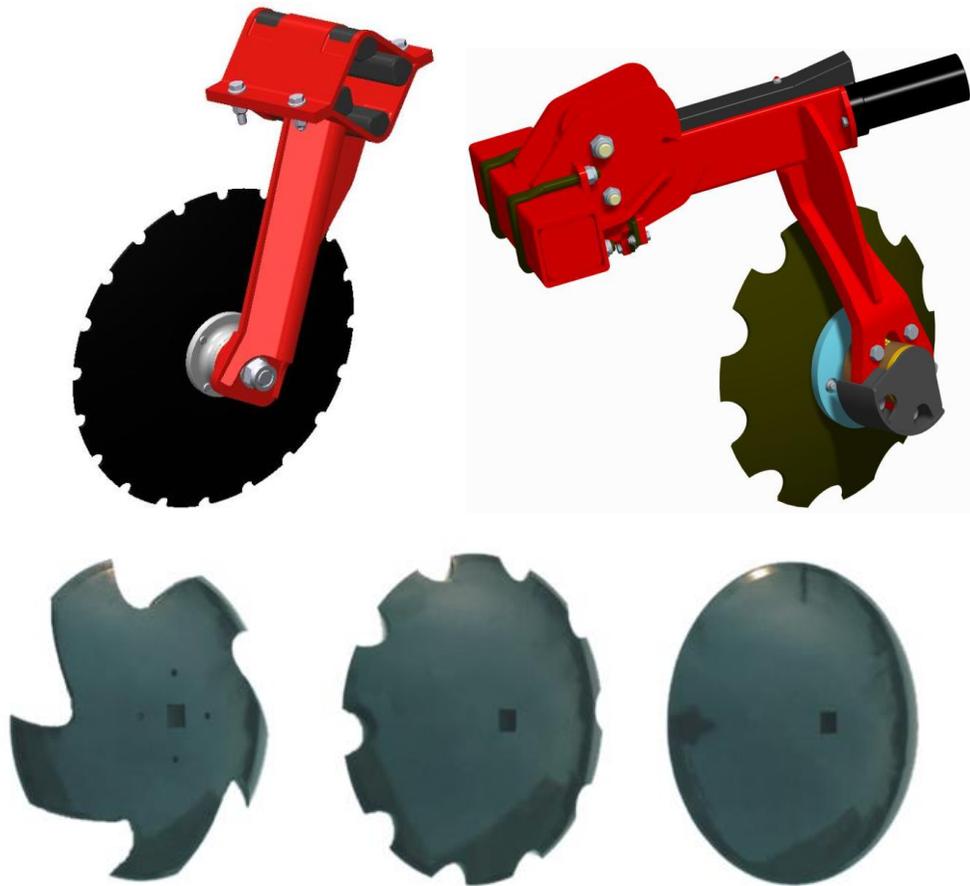


Рис. 3.2. Типи прорізних дисків

Робоча швидкість агрегату, у поєднанні з промисловими активними гідравлічними котками, які можуть встановлюватися додатково, істотно підвищує ефективність технологічного процесу обробітку ґрунту. Конструктивне

виконання котків із круглою або плоскою планкою забезпечує їх адаптивність до різних ґрунтово-кліматичних умов. У важких, перезволожених або болотистих умовах оператор має можливість оперативного піднімати котки, що запобігає налипанню та перевантаженню агрегату. Режим плаваючого положення («поплавця») забезпечує стабільне копіювання мікрорельєфу та формує оптимальну інтенсивність поверхневого розпушування.

Система самоналагоджуваного регулювання тиску дає змогу варіювати навантаження на котки та дискові робочі органи, забезпечуючи сталість контакту з ґрунтом незалежно від його щільності та структурного стану. Така конструктивно-функціональна схема сприяє формуванню якісного насінневого ложа, ефективному руйнуванню ґрунтових агрегатів підвищеної міцності та рівномірному подрібненню грудок (рис. 3.3).

Гідравлічні роликові котки доступні у виконанні з круглою та плоскою робочою планкою. Плоска планка не рекомендується для кам'янистих або надважких за механічним складом ґрунтів через підвищений ризик ударного навантаження. Для забезпечення надійної роботи рухомих котків застосовано литу раму підвищеної жорсткості, у конструкцію якої інтегровано підшипникові вузли з полімерними вкладишами високої щільності. Це забезпечує необхідну амортизацію, стійкість до абразивного зношування та відсутність потреби у технічному обслуговуванні.

Аналогічно до інших агрегатів для вертикального обробітку ґрунту, активні гідравлічні котки оснащуються необслуговуваними підшипниками, що мінімізує експлуатаційні витрати та підвищує загальну надійність і довговічність машини.

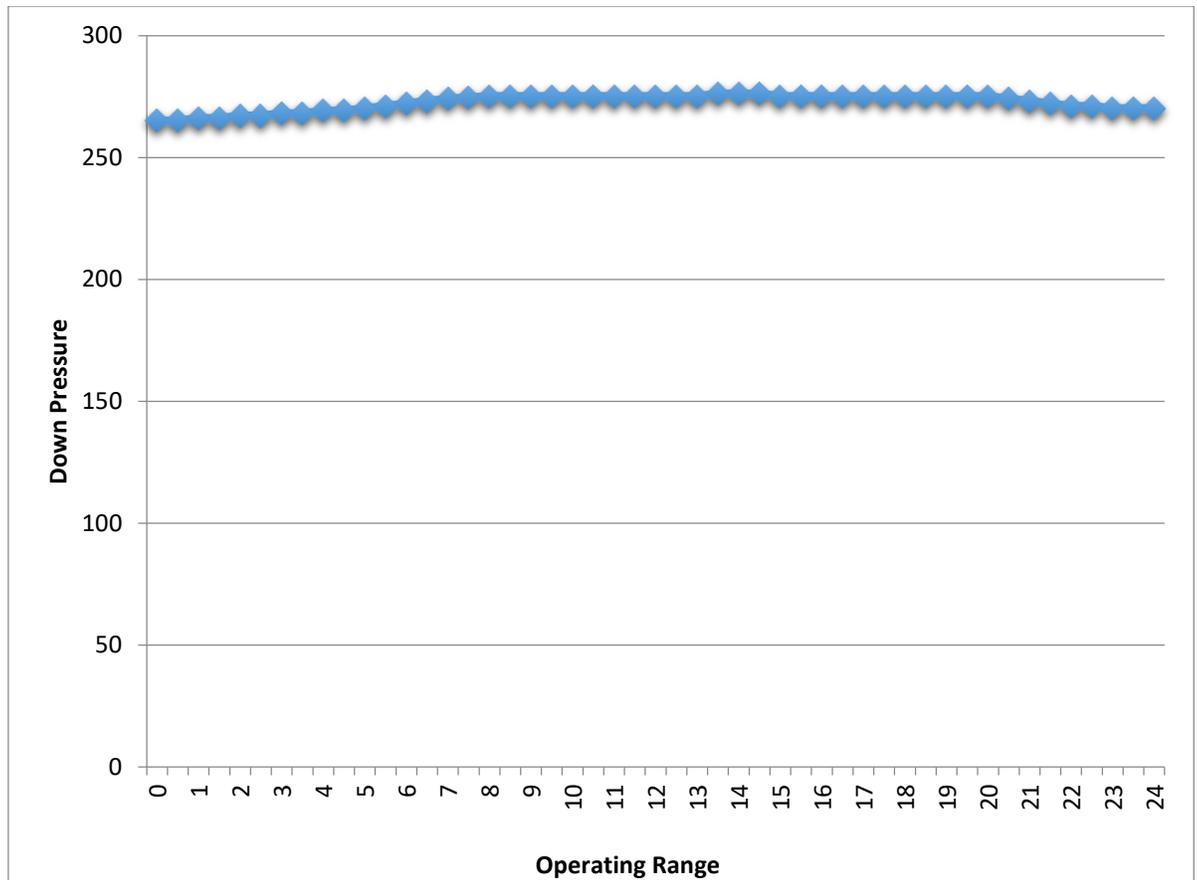


Рис. 3.3. Графічна залежність величини зусилля прорізання до робочої швидкості

Представлений графік демонструє, що незалежно від рельєфу місцевості, у якій виконується технологічна операція (рух уперед по схилу, проти схилу чи на рівній поверхні), у всьому робочому діапазоні глибини від 0 до 24 см відхилення тиску на ґрунт становить менш ніж 10%. Така стабільність навантаження забезпечує постійний контакт робочих органів із поверхнею та сприяє формуванню вирівняного і гладкого профілю ґрунту.

Аналіз отриманих експериментальних даних показує (рис. 3.4), що верхня червона крива відповідає роботі агрегату без механічного прорізання, тоді як нижня зелена крива характеризує роботу з активними дисковими ножами. Різниця між кривими підтверджує ефективність застосування дискових ножів з агресивним профілем різальної крайки та підвищення рівномірності розподілу притискного зусилля та якості обробітку.

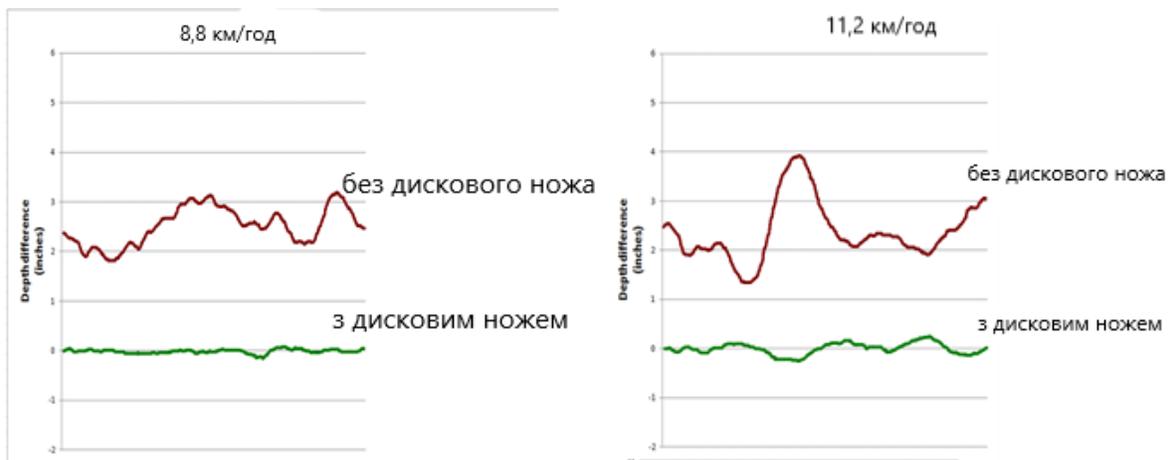


Рис. 3.4. Графіки залежності глибини обробки ґрунту без та з встановленими дисковими ножами

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.4) показує, що у всіх досліджуваних режимах роботи з використанням дисків для прорізання решток спостерігається істотна різниця фактичної глибини обробки. За відсутності дискових ножів на секціях ця різниця може досягати 8 см. Це свідчить про те, що за номінальної глибини обробки 15 см реальна глибина становитиме лише приблизно 8 см. За таких умов ефективність зароблення рослинних решток суттєво знижується та не може вважатися належною.

Висновки до розділу 3.

Комбінований обробіток ґрунту є одним із найбільш перспективних технологічних напрямів сучасного землеробства, оскільки він поєднує високу якість формування ґрунтового профілю з мінімальним порушенням природної структури орного шару. Проведений аналіз конструктивно-функціональних особливостей та експериментальних досліджень роботи комбінованих ґрунтообробних агрегатів (КГМ) дозволяє зробити такі узагальнення:

Робота гідравлічних котків та системи самоналаштування тиску забезпечує стабільність технологічного процесу, утримуючи навантаження на рівні, що відхиляється менш ніж на 10% у всьому діапазоні глибин 0–24 см. Це дозволяє

формувати вирівняний посівний шар незалежно від рельєфу та ущільненості ґрунту.

Аналіз графічних залежностей свідчить про істотний вплив прорізних дискових ножів на якість обробітку. За відсутності дисків реальна глибина рихлення може бути на 6–8 см меншою за номінальну, що суттєво знижує ефективність зароблення рослинних решток і якість розпушування профілю.

Використання дискових ножів з агресивною крайкою підвищує рівномірність розподілу притискного зусилля та стабільність глибини обробітку, що підтверджено відмінністю між фактичними значеннями глибини на відповідних графіках.

Поєднання функцій вертикального різання, глибокого рихлення, перемішування та коткування в єдиному агрегаті забезпечує високу енергоефективність, зменшує кількість проходів техніки та сприяє збереженню природної структури ґрунту.

Отже, комбіновані агрегати з прорізними дисковими ножами, оптимізованими лапами та активними гідравлічними котками демонструють значне підвищення якості та стабільності обробітку ґрунту, що робить їх ефективним інструментом для систем мінімального обробітку ґрунту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Застосування операційних технологій у комбінованих ґрунтообробних машинах є важливим напрямом удосконалення сучасних агротехнологій. Такі машини дають змогу виконувати комплексний обробіток, раціонально використовувати ресурси та поліпшувати агрофізичні властивості ґрунту. Подальше вдосконалення КГМ пов'язане з оптимізацією конструкцій, цифровим контролем робочих параметрів і їх інтеграцією в системи точного землеробства.

2. У результаті виконаного моделювання багатофункціональних комбінованих ґрунтообробних агрегатів встановлено, що їх конструкційно-технологічні характеристики істотно впливають на якість обробітку ґрунту, енерговитрати та рівень взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем. Побудована компоновочна схема агрегату та математична модель дозволили інтегрувати роботу рихлячих лап, прорізних дискових ножів і дискових секцій у єдину систему та проаналізувати їхню спільну дію при різних режимах роботи.

3. Визначено, що основним параметром, що формує тяговий опір агрегату, є геометрія лапи та характер її взаємодії з ґрунтом. Запропонована модель деформації масиву ґрунту у вигляді поєднання конічної та пірамідальної зон дає змогу аналітично описати об'єм витісненого та розпушеного ґрунту, а також визначити вплив робочої ширини долота, глибини обробітку та щільності ґрунту на формування зони обробітку.

Використання дискових ножів з агресивною крайкою підвищує рівномірність розподілу притискного зусилля та стабільність глибини обробітку, що підтверджено відмінністю між фактичними значеннями глибини на відповідних графіках.

Комбіновані агрегати з прорізними дисковими ножами, оптимізованими лапами та активними гідравлічними котками демонструють значне підвищення якості та стабільності обробітку ґрунту, що робить їх ефективним інструментом для систем мінімального обробітку ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN ISO 4254-5:2019 «Сільськогосподарські машини. Вимоги щодо безпеки. Частина 5. Устаткування ґрунтообробне з механічним приводом».
2. ДСТУ ISO 4254-5:2007 «Сільськогосподарські машини. Вимоги безпеки. Частина 5. Ґрунтообробне обладнання з механічним приводом».
3. Сиромятніков, П. С., Синельніков, А. О. «Підвищення стійкості руху секції комбінованої машини для підготовки ґрунту та висіву» — тези конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки», 2024. dglib.nubip.edu.ua
4. Мартишко, В. М. «Комбінований агрегат для догляду за ґрунтом в садах» — тези XII Міжнародної науково-технічної конференції (Крамаровські читання), 2025. dglibtest.nubip.edu.ua
5. Ярошенко, П. М. «Використання комбінованих навісних агрегатів у малих фермерських господарствах» — стаття / доповідь Сумського національного аграрного університету. repo.snau.edu.ua
6. Беседа, О. О., Маслійов, С. В. Сільськогосподарські машини — навчальний посібник; розділ про ґрунтообробні машини. ДСТУ, 2014. dspace.luguniv.edu.ua
7. «Конструкції комбінованих ґрунтообробних агрегатів» — стаття на Agronomy.com.ua, яка описує сучасні схеми конструкції комбінованих машин. agronomy.com.ua
8. «Ґрунтообробні агрегати на основі тракторів ХТЗ» — стаття в журналі «Пропозиція», огляд технологій комбінованих агрегатів. propozitsiya.com
9. Міністерство освіти і науки України, збірник тез — матеріали, що містять опис технології комбінованих машин, енерговитрат, економії палива. pdau.edu.ua+2zhatk.zt.ua+2
10. Кривошипко, Т. STRiP-TiLL – технологія майбутнього — розгляд технології strip-till, яка часто поєднується з комбінованим обробітком. Інженерно-технологічний факультет СНАУ
11. <https://www.gregoire-besson.com/ua>

12. agro-business.com.ua
13. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д. Г. Войтюк, В.О. Дубровін, та ін.; За ред. Д. Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.
14. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин: навч. посібник // Т. 1 : Машини для захисту рослин від шкідників і хвороб, ч. 4. Х. : ОКО, 2002. 272 с.
15. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін. – К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
16. Сисолін П.В., Рибак Т.І., Сало В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Книга 2. К.: Урожай, 2002. 364 с.
17. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. К.: Урожай, 2001. 384 с.
18. Горбатенко І. Ю. Основи наукових досліджень / І. Ю. Горбатенко. К. : Вища школа, 2001. 92 с.
19. Василенко П. М. Теорія руху частинки по шорстких поверхнях сільськогосподарських машин / П. М. Василенко. К.: УАХСН, 1960. 283 с. 19. Заїка П. М. Вибрані завдання землеробської механіки / П. М. Заїка. К.: УСХА, 1992. 510 с.