

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« _____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Модернізація та обґрунтування параметрів загортальної системи
секції просапної сівалки»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Коломієць Іван Денисович

« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро АРТЕМЕНКО

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Іван СКРИННІК

« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Анотація

В роботі представлено результати аналізу конструкцій робочих органів просапних сівалок та обґрунтовано напрями їх вдосконалення з метою підвищення ефективності посівного процесу. Запропоновано нову конструкцію загортача коткового типу комбінованої форми, яка забезпечує формування необхідних умов для швидкого проростання насіння просапних культур. Це сприяє дружним сходам і підвищенню врожайності просапних культур. Загортач сівалки інтегровано в секцію сівалки Venza-8 без значного ускладнення конструкції. Обґрунтовані раціональні геометричні параметри удосконаленого загортача для якісного загортання насіння просапних культур. Отримані результати підтверджують доцільність застосування вдосконалених загортачів коткового типу з комбінованою поверхнею в конструкціях сучасних просапних сівалок.

Abstract

The paper presents the results of the analysis of the designs of the working bodies of row-type seed drills and substantiates the directions of their improvement in order to increase the efficiency of the sowing process. A new design of a roller-type wrapper of a combined form is proposed, which provides the necessary conditions for the rapid germination of seeds of row-type crops. This contributes to friendly germination and an increase in the yield of row-type crops. The seeder wrapper is integrated into the Venza-8 seeder section without significantly complicating the design. Rational geometric parameters of the improved wrapper for high-quality wrapping of seeds of row-type crops are substantiated. The obtained results confirm the feasibility of using improved roller-type wrappers with a combined surface in the designs of modern row-type seed drills.

Зміст

1. Вступ.....	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень	6
3. Наукова частина.....	21
4. Практична реалізація результатів досліджень.....	41
5. Охорона праці.....	49
Висновки.....	52
Список використаної літератури.....	53

1. Вступ

Сучасне сільськогосподарське виробництво вимагає максимальної ефективності на кожному етапі польових робіт, де якість сівби просапних культур є визначальним фактором майбутньої врожайності. Актуальність модернізації робочих органів сівалки зумовлена необхідністю дотримання суворих агротехнічних вимог щодо рівномірності загортання насіння на задану глибину та створення оптимального його контакту з ґрунтом. В умовах зміни клімату та дефіциту води, здатність загортальної системи забезпечити збереження капілярної вологи та запобігти утворенню ґрунтової кірки стає стратегічним завданням для забезпечення швидких і дружніх сходів таких культур як кукурудза, соняшник та цукрові буряки.

Проте аналіз експлуатації існуючих загортальних систем виявляє низку суттєвих проблем, які заважають досягненню ідеальних результатів. Традиційні конструкції часто не мають достатньої адаптивності до мінливих фізико-механічних властивостей ґрунту, що призводить до нерівномірного ущільнення або, навпаки, надмірного розпушування зони посіву. Типові недоліки, такі як недостатня притискна сила на важких ґрунтах або забивання робочих органів рослинними рештками, спричиняють порушення структури посівної борозни, що негативно впливає на польову схожість насіння та енергію його проростання.

Напрямок покращення ситуації є наукове обґрунтування параметрів модернізованої загортальної системи, яка б поєднувала в собі ефективне закриття борозни та точне регулювання ступеня ущільнення ґрунту навколо насіння. Це передбачає впровадження нових геометричних форм елементів загортальних робочих органів, а також використання додаткових механізмів з можливістю оперативного налаштування під конкретні умови поля. Обґрунтування оптимальних кутів атаки, діаметрів коткових робочих органів та зусиль тиску дозволить створити конструкцію, що мінімізує випаровування вологи та гарантує стабільний температурно-повітряний режим в зоні розміщення насіння.

2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень

2.1 Опис машини, що підлягає модернізації

Пневматична сівалка точного висіву VENZA-8 від українського виробника АК «ФАВОРИТ» [1], є аналогом відомої італійської сівалки Gaspardo SP, але адаптований до наших умов експлуатації (рис. 2.1).



Рис. 2.1 Сівалка VENZA-8

Сівалка VENZA-8 призначена для точного висіву каліброваного насіння наступних культур: кукурудзи, соняшника, сорго, сої, кормових бобів, квасолі, люпину. Одночасно з посівом агрегат дозволяє вносити гранульовані мінеральні добрива (або рідкі, в залежності від комплектації) безпосередньо в рядки.

Основною робочою одиницею сівалки є секція робочих органів (рис. 2.2), яка безпосередньо відповідає за посів і загортання висіяного насіння та має багато конструкційних особливостей. Головною особливістю секцій серії VENZA є відмова від ланцюгових передач. Привод секції здійснюється карданним валом. Це виключає такі проблеми ланцюгового приводу, як прослизання, розтягування, спадання ланцюгів та ривки під час роботи. Карданний привод гарантує максимально точну і рівномірну передачу крутного моменту на висівний диск, що критично важливо для дотримання заданої відстані між насінинами.



Рис. 2.2 Секція VENZA-8

На секції встановлюється висівний апарат пневматичного типу. Насіння м'яко утримується на отворах висівного диска за рахунок вакууму, що мінімізує пошкодження посівного матеріалу та забезпечує високу точність (відсутність «двійників» або пропусків).

У базовій версії VENZA-8 використовується анкерний сошник (призначений для традиційної технології обробітку ґрунту). Існує також модифікація VENZA-8 Pro, де встановлено дводисковий сошник зі зміщеними дисками (для технологій Mini-Till).

Процес закриття борозни є надзвичайно важливим для отримання рівномірних сходів тому у VENZA-8 ця система розбита на два етапи: загортачі та прикочуючі котки.

Загортачі розміщені одразу за сошником і місцем скидання насіння і мають вигляд металевих направляючих пластини з лопатками на кінці. Їх задача згорнути розпушений і вологий ґрунт з країв борозни назад у рядок. Така конструкція дозволяє закрити насіння саме вологим ґрунтом з нижніх шарів, а не сухою землею з поверхні. Загортачі також відкидають великі грудки, запобігаючи їх потраплянню безпосередньо на насіннєве ложе, що покращує контакт насінини з дрібнофракційним ґрунтом.

Після загортачів встановлені V-подібні прикочувальні колеса (котки). V-подібна конструкція чинить основний тиск не зверху на насіння, а на кромки борозни (з боків під кутом). Перевагами такого підходу є те, що ґрунт щільно обтискає насінину з обох боків, ліквідуючи повітряні кишені та підтягуючи капілярну вологу. Безпосередньо над насінниною залишається невеликий гребінь пухкого ґрунту. Завдяки цьому після дощу не утворюється тверда кірка прямо над паростком, і йому набагато легше пробитися на поверхню. Гумові ободи котка запобігають налипанню вологого ґрунту на колесо.

Таблиця 2.1

Технологічні характеристики VENZA-8

Параметр	Характеристика
Тип сівалки	Навісна, пневматична
Ширина захвату	5,6 м
Кількість рядків	8
Ширина міжряддя	70 см
Глибина посіву	40 – 120 мм
Тип сошника (база)	Анкерний (у версії Pro — дисковий)
Привод висівного апарату	Карданний вал
Робоча швидкість	від 3,6 до 9 (макс. 10) км/год
Продуктивність	2,0 – 5,04 га/год
Об'єм бункерів для насіння / добрив	Залежить від комплектації (в середньому ~ 30-40 л на секцію / туки 440 л)
Маса	~ 1700 кг

Перевагами VENZA-8 можна вважати:

високу точність висіву насіння завдяки карданному приводу секцій (повна відсутність похибок ланцюгової передачі);

ефективна система контролю висіву в базі (показує норму висіву, пропуски, двійники, швидкість);

правильна архітектура загортальної системи (V-подібний коток + загортач), що зберігає вологу і запобігає утворенню кірки;

висока ремонтпридатність і доступність запчастин (українське виробництво, сумісність з італійськими аналогами).

Недоліками VENZA-8 можна вважати:

базова модель з анкерним сошником жорстко прив'язана до класичної (традиційної) технології обробітку ґрунту. За наявності великої кількості пожнивних решток анкер забивається (для таких полів необхідна версія PRO з дисковими сошниками);

анкерний сошник зношується швидше, ніж дисковий, особливо на абразивних та пересушених ґрунтах;

велика вага секцій та наявність тукових баків вимагають надійної навіски трактора (необхідний трактор від 80-100 к.с. зі справною гідравлікою).

Вимоги агротехніки до показників якості виконання операції посів просапними сівалками [2 - 6]:

глибина загортання насіння, це критичний параметр для дружних сходів, насіння має лежати на щільному вологому насіннєвому ложі та бути прикриті пухким шаром ґрунту;

відхилення від заданої глибини не повинно перевищувати ± 1 см (для дрібнонасінних культур, таких як цукрові буряки $\pm 0,5$ см);

рівномірність розміщення - не менше 95% насіння має бути розміщено на заданій глибині висіву;

просапні сівалки працюють за принципом пунктирного висіву, кожна насінина має своє чітке місце, відхилення фактичної кількості насіння на метр погонний від заданої не більше $\pm 2-3\%$;

сумарна кількість двійників та пропусків не має перевищувати 3 - 5% (залежно від культури та швидкості агрегату);

рівномірність розподілу в рядку оцінюється за коефіцієнтом варіації інтервалів між насінинами;

стабільність міжрядь - це запорука того, що під час міжрядного обробітку не буде пошкоджено половину посіву, відхилення середньої ширини міжрядь не більше ± 1 см;

при проході суміжних агрегатів відхилення має бути в межах ± 5 см;

прямолінійність рядків, важливий показник для подальшої механізації (збирання, культивування), допустиме відхилення не більше ± 5 см на кожні 50 метрів довжини гону (за використання GPS-навігації цей показник зазвичай близький до ідеалу).

Таблиця 2.2

Допустимі норми якості посіву просапними сівалками (усереднені)

Показник	Допустиме відхилення / Значення
Глибина загортання	$\pm 0,5 \dots \pm 1,0$ см
Норма висіву (шт/м)	$\pm 3\%$
Механічне пошкодження насіння	не більше 0,5% (для кукурудзи), 1% (для соняшнику)
Ширина основного міжряддя	± 1 см
Повнота загортання насіння	100% (насіння не повинно залишатися на поверхні)

Також необхідно враховувати, що ґрунт має бути щільно притиснутий до насінини, щоб забезпечити капілярний підйом вологи, але зверху не повинно бути кірки.

Якщо сівалка обладнана туковою системою, добрива мають розміщуватися зазвичай на 2 - 5 см вбік та на 2 - 3 см глибше рівня насіння.

2.2 Порівняльний аналіз конструкцій овочевих сівалок які представлені в Україні

Проведемо порівняльний аналіз просапних сівалок які представлені в Україні і які працюють при традиційному обробітку ґрунту.

Українська компанія «ФАВОРИТ» спеціалізується на розробці та адаптації передових європейських рішень до вітчизняних ґрунтово-

кліматичних умов. Сівалки цього бренду, зокрема лінійка VENZA, орієнтовані на фермерські господарства, що потребують високого рівня точності висіву за розумну ціну. Конструкція цих агрегатів впроваджує преміальні технічні рішення (такі як повністю карданний привід секцій) у середній ціновий сегмент, що значно підвищує надійність машини та розширює технологічні можливості традиційного землеробства без переплат за імпортований бренд [1].

На сівалці використовується класичний анкерний сошник та вакуумний висівний апарат з карданним приводом (повна відсутність похибок та ривків ланцюгової передачі).



Рис. 2.3 АК «ФАВОРИТ» - VENZA-8

Загортальна система складається з регульованих металевих загортачів та гумових V-подібних котків.

Перевагою сівалки є ідеальне співвідношення ціни та якості висіву насіння просапних культур. Проте недоліком є те, що анкер зношується швидше за важкі башмаки преміальних брендів, і сівалка не терпить погано очищених від рослинних решток полів.

Італійська корпорація Maschio Gaspardo є визнаним світовим гігантом, який виробляє надзвичайно широкий асортимент ґрунтообробної та посівної техніки. Їхні просапні сівалки Maschio Gaspardo - SP 8, вакуумного типу,

вважаються своєрідним галузевим стандартом (еталоном) для традиційної технології (рис. 2.4). Моделі цього бренду відзначаються феноменальною надійністю, модульністю та ювелірною точністю лиття робочих вузлів. Конструкція висівних секцій Gaspardo стала базою для багатьох світових аналогів, оскільки дозволяє безвідмовно працювати з найширшим спектром просапних культур у різних кліматичних зонах [7].



Рис. 2.4 Maschio Gaspardo - SP 8

Секція робочих органів сівалки оснащується анкерним сошником еталонної форми, який при гарній підготовці ґрунту здатний формувати ідеальне насіннєве ложе. Привод секції висівних апаратів виконується через карданний вал (це їх фірмове рішення).

Загортачі секції робочих органів мають вигляд пластин з плоскою лопаткою на кінці і працюють за методом зсуву шару ґрунту з боків рядка в борозну. Додатково до загортальної системи є можливість встановлення V-подібних котків або широких котків Farmflex для піщаних ґрунтів.

Перевагами сівалки є еталонна надійність вакуумної системи та довговічність сплавів. Недоліками - висока вартість оригінальних запчастин в кінцева вартість сівалки.

Завод Elvorti, спеціалізується на створенні масивної, витривалої сільськогосподарської техніки, що історично розроблялася для специфічних, часто важких умов експлуатації на пострадянському просторі. Пропонує перевірений часом асортимент вакуумних сівалок, орієнтованих на базові потреби середніх та великих агрогосподарств. Сівалки Vesta 8 (рис. 2.5) цього бренду відзначаються підвищеним запасом міцності металоконструкцій та здатністю працювати навіть на недостатньо якісно підготовлених фонах. Конструкція сошників дозволяє агрегату агресивно прорізати ущільнений ґрунт, що робить його універсальним знаряддям для класичної технології [8].



Рис. 2.5 Сівалки Vesta 8

Секція робочих органів має наральниковий сошник (має ширший і товщий ніж, ніж звичайний анкер). Привод висівного апарату здійснюється на кожній секції за допомогою ланцюгової передачі.

Загортальна система сівалки представлена двовідвальними масивними крильцями загортачами та також комплектується V-подібними або одинарним атмосферним котками.

Переваги / недоліки - наральниковий сошник чудово тримає глибину на твердому ґрунті але програє конкурентам через застарілий ланцюговий привід, який потребує постійного змащування та натяжки.

Французька компанія Monosem спеціалізується майже виключно на розробці та виробництві високоточних сівалок вакуумного типу та культиваторів. Пропонує вузькоспеціалізований, але глибоко пропрацьований асортимент моделей, орієнтованих на безкомпромісну точність. Сівалки Monosem NC Classic (рис. 2.6) цього бренду відзначаються високим експертним рівнем зносостійкості робочих органів навіть на кам'янистих або піщаних ґрунтах. Конструкція секцій та їхньої загортальної системи має запатентовані архітектурні рішення, що значно розширює можливості роботи сівалки у складних умовах перезволоження без втрати якості сингуляції [9].



Рис. 2.6 Сівалка Monosem NC Classic

Сіввалка оснащується масивним наральниковим сошником із тупим кутом входження в ґрунт. Загортальна система замість простих пластин використовує унікальні складні загортаючі блоки Monosem. Прикочувальні котки V-подібні, зі спеціальним профілем гуми, що самоочищується.

Сівалка добре показує себе при роботі на вологих ґрунтах (налипання ґрунту на робочі поверхні мінімальне). Ресурс башмака в рази вищий за тонкі анкери. Головним недоліком є дуже висока ціна агрегату та його значна вага.

Корпорація Kuhn (Франція) є одним з лідерів у виробництві преміальної сільгосптехніки, і її напрямок просапних сівалок пропонує моделі, орієнтовані на максимальну технологічність та продуктивність. Сівалки серії Planter 3 (рис. 2.7) відзначаються дуже високим рівнем точності висіву, який досягається за рахунок мінімізації висоти скидання насіння. Конструкція висівного модуля розроблена спеціально для ідеально підготовленого посівного ложа, що дозволяє отримувати ідеально рівномірні сходи і максимально розкривати генетичний потенціал дорогих гібридів насіння [10].



Рис. 2.7 Сівалка Kuhn серії Planter 3

Секція Kuhn оснащується анкерним сошником особливої геометрії, який забезпечує висоту падіння насіння всього 10 см. В якості загортальної системи використовуються бокові лемеші особливої форми та V-подібні котки. Кожен елемент має якісне високоточне незалежне регулювання тиску.

Секція робочих органів забезпечує еталонну точність розміщення (насіння не відскакує в борозні завдяки низькому падінню). Недоліком сівалки

є вкрай висока вимога до підготовки ґрунту; найменші нерівності або грудки порушують роботу низько посадженого анкера.

Провівши огляд найпоширеніших просапних сівалок, що представлені в Україні нами були зведені в таблицю їх головні технологічні і конструкційні особливості.

Таблиця 2.3

Порівняльні характеристики просапних сівалок

Характеристика	VENZA-8	Gaspardo SP 8	Vesta 8	Monosem NC Classic	Kuhn Planter 3
Тип сошника	Анкерний	Анкерний	Наральниковий	Наральниковий	Анкерний (низького скидання)
Привод секції	Карданний	Карданний	Ланцюговий	Ланцюговий / Карданний	Ланцюговий
Загортачі	Металеві пластини	Металеві пластини	Двовідвальні крильця	Направляючі блоки	Бокові лемеші
Прикочувальний коток	V-подібний	V-подібний / Farmflex	V-подібний / одинарний	V-подібний (самоочищений)	V-подібний
Вимоги до фону	Добре підготовлений	Добре підготовлений	Допускає грудки/ ущільнення	Кам'янисті/вологі ґрунти	Ідеально підготовлений

У підсумку проведеного аналізу сучасних сівалок можна сказати наступне:

Вимогливість до підготовки ґрунту - головний критерій вибору, аналіз показує, що сівалки для класичної технології чітко діляться за своєю здатністю працювати на недосконалих фонах.

Анкерні сошники (VENZA-8, Gaspardo SP 8, Kuhn Planter 3), забезпечують високу точність розкладки насіння завдяки тонкому прорізанню ложа, але є надзвичайно чутливими до якості передпосівної культивації. Наявність великих грудок або нерівностей призводить до стрибання секції, порушення глибини висіву та забивання загортачів.

Наральникові сошники (Vesta 8, Monosem NC Classic), масивніші та важчі. Вони краще розсувають грудки, стабільніше тримають глибину на ущільнених або кам'янистих ділянках, але сама борозна може виходити трохи ширшою, що вимагає більших зусиль від загортальної системи.

Еволюція приводів висівних апаратів - ринок впевнено відходить від ланцюгових передач на користь карданних валів. Ланцюговий привід (Vesta 8, базові комплектації інших брендів), потребує постійного обслуговування. Розтягування ланцюга, вібрації та ривки під час руху неминуче призводять до нерівномірного обертання висівного диска, а отже і до похибок у відстані між насінинами в рядку (пропуски або двійники).

Карданний вал (VENZA-8, Gaspardo SP 8), забезпечує ідеально плавну і синхронну передачу крутного моменту. Це критично важлива перевага, яка напругу впливає на якість сходів і кінцеву врожайність. Те, що VENZA-8 використовує кардан у базовій комплектації, є її найсильнішим технологічним козирем у своєму ціновому сегменті.

Для традиційного обробітку ґрунту галузевим стандартом стала комбінація направляючі пластини і V-подібні прикочувальні котки. Пластини-загортачі ефективно повертають вологий ґрунт у борозну, відсікаючи суху кірку. V-подібні котки ідеально закривають питання капілярного підняття вологи, стискаючи насінину з боків, але залишаючи пухкий шар ґрунту зверху, що полегшує проростання паростка.

Різниця між брендами полягає переважно в матеріалах (здатність гуми до самоочищення від бруду, як у Monosem) та можливостях точного налаштування тиску, як у Kuhn. Проте базова фізика процесу у VENZA-8 налаштована цілком правильно і відповідає європейським стандартам.

Преміальні європейці (Monosem, Kuhn): Вибір для великих агрохолдингів або господарств з ідеальною культурою землеробства, які сіють дорогі елітні гібриди і потребують 100% реалізації їхнього потенціалу за рахунок ювелірної розкладки, або ж потребують надвисокого ресурсу робочих органів на специфічних ґрунтах.

Бюджетна класика (Vesta 8), вибір для господарств, які не мають можливості ідеально готувати поля і згодні миритися з певними похибками висіву через ланцюгові передачі та простішу конструкцію загортачів.

Золота середина (VENZA-8, Gaspardo SP 8), оптимальний вибір для більшості фермерів. VENZA-8 фактично пропонує архітектуру та якість висіву італійського Gaspardo (вакуум, кардан, правильна загортальна система), але за українською ціною та з високою ремонтпридатністю. Її головна вимога, якісна передпосівна підготовка ґрунту.

2.3 Аналіз особливостей робочих органів просапних сівалок

Якість і рівномірність висіву просапних культур значною мірою залежать від ефективності роботи елементів посівної секції, які безпосередньо забезпечують розміщення насіння в ґрунті. До таких робочих органів належать сошники, ущільнювачі дна борозни, борозні котки, загортачі та задні прикочуючі котки. Саме їх узгоджена взаємодія формує насіннєве ложе, визначає стабільність глибини загортання та створює умови для подальшого проростання насіння.

Сошник є основним елементом, що забезпечує утворення борозни заданої глибини та ширини. У конструкціях просапних сівалок застосовуються різні типи сошників, кожен з яких має специфічні експлуатаційні властивості.

Анкерний (наральниковий) сошник являє собою клиноподібний нерухомий робочий орган, який розсуває ґрунт і формує дно борозни за допомогою нижньої частини, п'яти. Зазвичай такі сошники виготовляють із литого чавуну або сталі. Їх перевагами є конструктивна простота, невисока вартість та задовільна ефективність роботи на легких, добре підготовлених ґрунтах без значної кількості пожнивних решток. Вони забезпечують достатнє ущільнення дна борозни, що позитивно впливає на контакт насіння з ґрунтом. Водночас до недоліків анкерних сошників належать схильність до забивання рослинними рештками, нестабільність роботи на важких і перезволожених ґрунтах, а також можливе налипання вологого ґрунту. За зміни щільності ґрунту глибина загортання може коливатися, що знижує точність висіву [11 - 13].

Однодисковий сошник конструктивно виконаний у вигляді одного плоского або сферичного диска, встановленого під певним кутом до напрямку руху агрегату. Порівняно з анкерним типом він краще прорізає рослинні рештки та менш інтенсивно переміщує ґрунт. Однак його робота часто супроводжується відхиленням ґрунту в один бік, що призводить до формування асиметричної борозни. З цієї причини однодискові сошники застосовуються обмежено і поступаються за поширеністю дводисковим конструкціям [11 - 13].

Дводисковий сошник складається з двох дисків, розташованих під кутом один до одного, які в нижній точці сходяться, формуючи V-подібну борозну. Такий тип є найбільш поширеним на сучасних сівалках точного висіву провідних виробників. Його основними перевагами є ефективне прорізання рослинних решток і ущільненого ґрунту, формування чіткої симетричної борозни, стабільність глибини загортання (особливо за наявності бічних коліс контролю глибини) та мінімальне порушення структури ґрунту поза межами борозни. Разом з тим конструкція є складнішою, дорожчою та потребує точного регулювання [11 - 13].

З метою покращення умов укладання насіння застосовують ущільнювачі дна борозни та борозні котки. Їх функція полягає в попередньому ущільненні ґрунту перед потраплянням насіння, вирівнюванні його положення за глибиною та забезпеченні надійного контакту з вологим шаром ґрунту. Це сприяє стабільності глибини загортання та підвищенню польової схожості. У конструктивному відношенні такі елементи можуть бути інтегрованими або окремими. В анкерних сошниках ущільнення часто забезпечується самою п'ятою наральника. Окремі борозні котки виконуються у вигляді невеликих металевих, гумових або полімерних коліс, які встановлюються за сошником або навіть у зоні розрізу дводискового сошника. Додатково можуть використовуватися елементи для притискання насіння до дна борозни у вигляді гнучких пластин чи малих коліс, що особливо актуально на пухких або пересушених ґрунтах.

Закриття борозни та остаточне формування ґрунтового шару над насінням здійснюється задніми прикочуючими котками. Вони переміщують ґрунт із боків до центру рядка та забезпечують необхідний ступінь ущільнення. Конструктивні варіанти таких котків надзвичайно різноманітні. Одинарні котки застосовуються рідше; частіше використовуються парні V-подібні котки, які можуть бути симетричними або зміщеними відносно рядка. Гладкі гумові котки забезпечують рівномірне ущільнення за оптимальної вологості ґрунту. Варіанти з протектором покращують зчеплення та самоочищення. Чавунні котки відзначаються підвищеною зносостійкістю та інтенсивністю ущільнення. Зубчасті або шиповані конструкції руйнують бічні стінки борозни та запобігають утворенню кірки, що є важливим на важких або вологих ґрунтах. Також використовуються дископодібні, пальцеві або сітчасті елементи, які закривають борозну без надмірного ущільнення [14 - 18].

Загортачі просапних сівалок виконують завершальний етап формування поверхні рядка. Вони вирівнюють ґрунт над борозною, створюють пухкий мульчуючий шар та сприяють руйнуванню ґрунтової кірки. За конструкцією це можуть бути волокуші, пальцеві борони або пружинні елементи різних типів. У багатьох випадках вони є опціональними, однак їх застосування істотно покращує умови проростання, особливо на ґрунтах, схильних до заплівання [11 - 13].

Таким чином, робочі органи посівної секції просапної сівалки функціонують як єдиний технологічний комплекс. Ефективність посіву визначається не лише конструкцією кожного окремого елемента, але і правильністю їх взаємного налаштування та відповідністю конкретним ґрунтово-кліматичним умовам і біологічним особливостям культури. Незважаючи на широкий вибір конструктивних рішень, актуальним залишається підвищення універсальності робочих органів, що дозволить знизити вартість машин, підвищити їх технологічну ефективність та забезпечити якісний висів широкого спектра просапних культур.

3. Наукова частина

Актуальність теми. Сучасне сільськогосподарське виробництво в Україні функціонує в умовах кліматичних змін та гострого дефіциту ґрунтової вологи. За таких обставин отримання дружних і рівномірних сходів просапних культур є критично важливим для забезпечення високої врожайності. Одним із найвразливіших етапів посівної кампанії є процес якісного закриття насіннєвої борозни після висіву. Традиційні загортальні системи часто не здатні адаптуватися до мінливої фізико-механічної структури ґрунту та наявності пожнивних решток. Це нерідко призводить до утворення повітряних кишень навколо насінини, втрати вологи або формування щільної ґрунтової кірки. Тому існуючі конструкції просапних сівалок, зокрема вітчизняного виробництва, потребують удосконалення робочих органів загортальної групи. Особливої уваги вимагає точне наукове обґрунтування кінематичних і конструктивних параметрів цих робочих органів. Впровадження таких інновацій дозволить оптимізувати процес ущільнення насіннєвого ложа без ризику його надмірного переущільнення зверху. Крім того, правильна архітектура загортальної системи ефективно запобігатиме швидкому випаровуванню вологи з нижніх горизонтів. В умовах постійного подорожчання елітного посівного матеріалу ціна кожної втраченої через погане загортання насінини стає надто високою. З огляду на це, тема модернізації та обґрунтування параметрів загортальної системи просапної сівалки є надзвичайно своєчасною та важливою. Практична реалізація результатів цієї роботи дозволить гарантовано підвищити експлуатаційну ефективність посівних комплексів в реальних польових умовах.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є підвищення ефективності роботи секції просапної сівалки шляхом розробки удосконаленої конструкції загортача та обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

Для досягнення мети поставлено такі **задачі:**

провести аналіз конструкцій сівалок для посіву просапних культур та їх загортальних систем, визначити недоліки та обґрунтувати напрями їх усунення;

дослідити процес роботи удосконаленого загортача просапної сівалки, обґрунтувати його конструктивні особливості та визначити їх вплив на технологічний процес загортання насіння;

обґрунтувати кількісні характеристики параметрів конструкції нового робочого органу.

Об’єкт дослідження: технологічний процес роботи загортача просапної сівалки та його робочих елементів.

Предмет дослідження: конструктивно-технологічні параметри загортача просапної сівалки та технологічні властивості ґрунту, які впливають на його роботу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

визначено закономірності впливу робочих поверхонь удосконаленого загортача просапної сівалки на процес загортання насіння, а також обґрунтовані раціональні значення цих параметрів;

досліджено зміну фізичних властивостей ґрунту під час загортання насіння та встановлено, як конструктивні особливості загортача впливають на якість виконання технологічного процесу;

аналітичним шляхом визначено раціональні параметри робочих елементів загортача просапної сівалки, які сприяють покращенню якості загортання насіння в борозні та підвищенню ефективності виконання процесу посіву насіння в цілому.

3.1 Аналіз конструкцій загортачів просапних сівалок

Якщо проаналізувати конструкції загортачів самих розповсюджених в Україні просапних сівалок то можна відокремити наступні їх типи: пластинчасті, дискові, пруткові (пальцеві) та коткові [7-13].

Так пластинчасті загортачі (рис. 3.1) працюють за принципом зсуву. Дві металеві пластини встановлюються за сошником під певним кутом атаки до напрямку руху та під нахилом до вертикалі. Можуть бути плоскими або вигнутими. Під час руху сівалки пластини підрізають верхній шар ґрунту з країв борозни. Завдяки куту нахилу, вони зміщують цей ґрунт до центру, загортаючи його всередину борозни поверх насіння. Оскільки це пасивний робочий орган, він просто переміщує масу ґрунту, не ущільнюючи її активно.

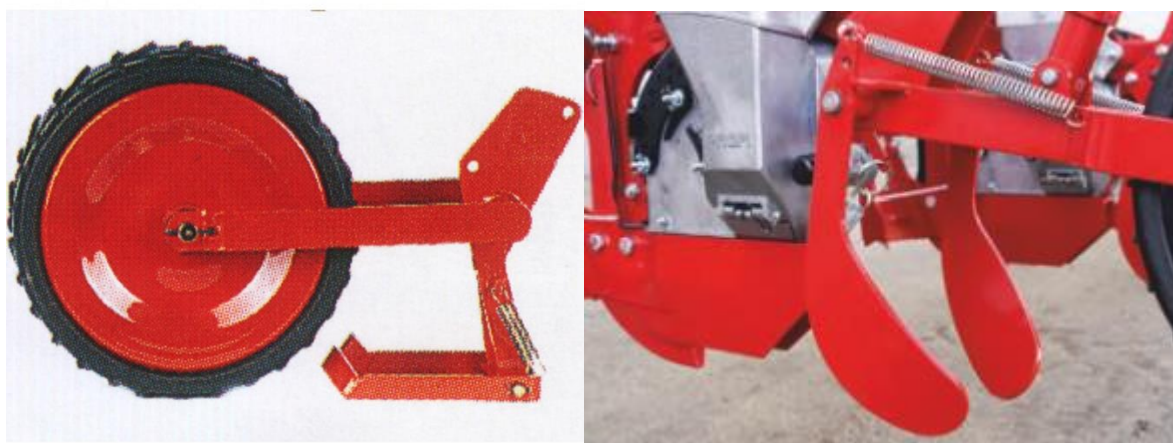


Рис. 3.1 Пластинчасті загортачі Kuhn, Elvorti

Найпростіша та найстаріша конструкція, часто мають регулювання кута атаки та притисного зусилля. Низька вартість, простота обслуговування, мала вага. Але в той же час схильні до забивання рослинними рештками та вологим ґрунтом. Не забезпечують активного ущільнення ґрунту над насінням.

Дискові загортачі (рис. 3.2) працюють за принципом обертового різання та відкидання. Складаються з двох сферичних або зубчастих дисків, встановлених під кутом один до одного (формою «V»). При контакті з ґрунтом диски обертаються за рахунок тертя. Вони активно підхоплюють ґрунт з обох боків відкритої борозни і спрямовують його в зону посіву. Обертання дозволяє краще подрібнювати грудки та ефективно працювати на полях з великою кількістю пожнивних решток (кукурудза, соняшник), оскільки диски просто перерізають перешкоди, а не тягнуть їх за собою.

Ефективно працюють на високих швидкостях, важких, засмічених рештками та вологих ґрунтах. Рідше забиваються порівняно з пластинчастими.

Забезпечують краще подрібнення ґрунту. Але мають складнішу конструкцію (наявність підшипникових вузлів, що потребують догляду), вищу ціну.

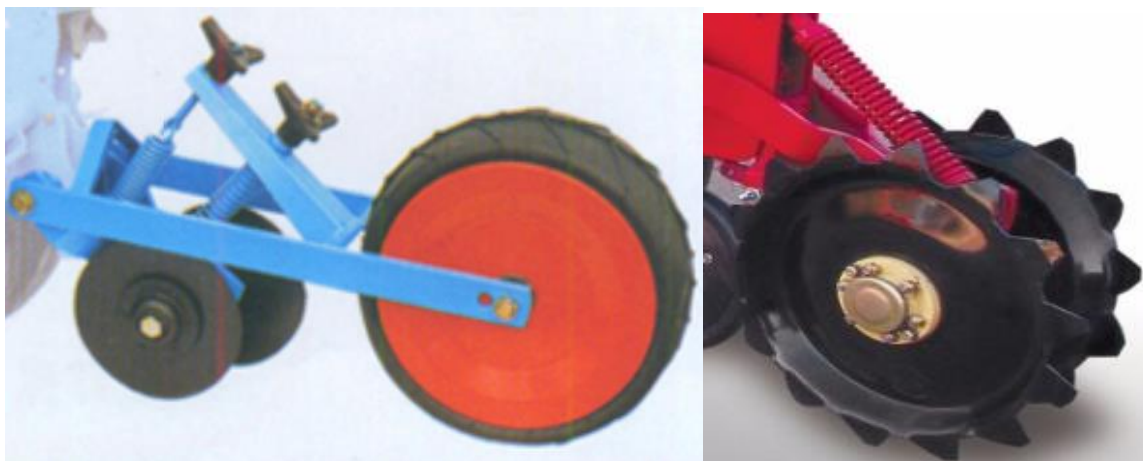


Рис. 3.2 Дисккові загортачі Monosem, Gherardi

Загортачі пруткові (пальцеві) (рис. 3.3) працюють за принципом поверхневого вирівнювання та мульчування. Це гнучкі сталеві стрижні, що мають пружинні властивості. Прутки тягнуться по поверхні ґрунту, зачіпаючи лише верхній шар. Вони не стільки засипають глибоку борозну, скільки розрівнюють гребені ґрунту, залишені сошником або попередніми робочими органами.

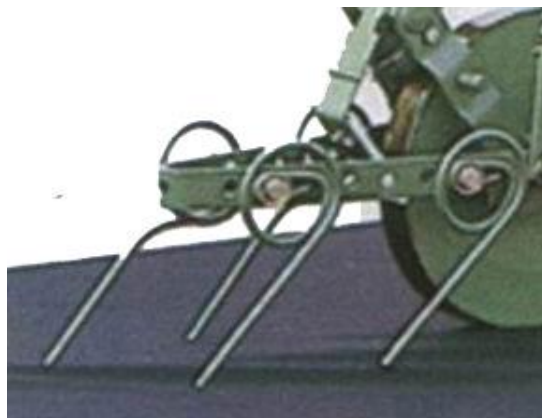


Рис. 3.3 Пальцеві пружинні загортачі

За рахунок вібрації прутків під час руху відбувається сепарація часток ґрунту: дрібніші фракції осідають нижче, а більші виходять на поверхню, створюючи пухкий захисний шар (мульчу), який запобігає випаровуванню вологи та утворенню кірки. Часто використовуються як додатковий елемент

після основних загортачів або котків. Дуже прості та надійні, сприяють кращому газообміну. Не здатні закрити глибоку борозну на важких ґрунтах самостійно. Не забезпечують контакту насіння з ґрунтом (притискання).

Коткові загортачі (рис. 3.4) працюють за принципом вертикального або діагонального тиску. На рисунку наведено два підтипи: прутковий і сітчастий коток. Прутковий і сітчастий котки, тиснуть безпосередньо зверху на загорнуту борозну. Їхня структура дозволяє ущільнити зону насіння, але залишити саму поверхню без ґрунтової кірки, злегка розпушеною, що полегшує проростання паростків.

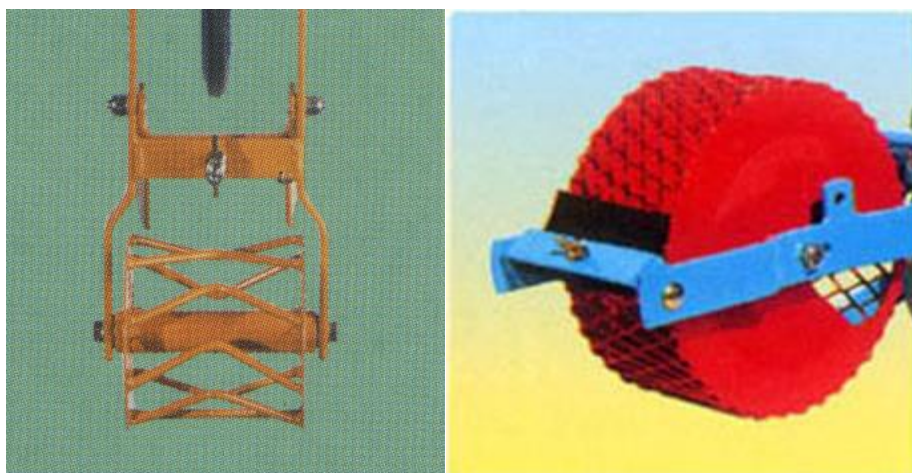


Рис. 3.4 Коткові загортачі

Головним недоліком таких загортачів є перемішування шарів ґрунту над насінням та неможливість ущільнення шарів навколо насіння.

Провівши аналіз існуючих конструкцій загортачів можна сказати, що перспективним напрямом їх удосконалення є поєднання декількох операцій які виконує загортач під час виконання технологічного процесу, а саме суміщення процесів загортання і ущільнення борозни при одному проході. Також важливим є врахування, що спочатку повинні бути зміщені на насіння вологі шари ґрунту, а потім більш сухі. Тому пропонується розробити новий загортач просапної сівалки на основі загортачів котково-дискового типу із робочими елементами для якісного загортання борозни.

3.2 Обґрунтування удосконаленої конструкції загортача просапної сівалки

Провівши аналіз існуючих загортачів просапних сівалок можна сказати, що для підвищення ефективності їх роботи доцільно розділити процес загортання насіння на два послідовні етапи: спочатку слід сформувати навколо насіння шар вологого ґрунту, а вже потім засипати сухішими верхніми шарами. В результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш перспективним напрямом є використання загортачів коткового типу з вертикальним впливом на ґрунт. Така конструкція має низку переваг, які безпосередньо усувають більшість недоліків, властивих існуючим рішенням.

На основі проведеного аналізу конструкцій загортаючих систем нами був розроблений удосконалений комбінований загортач просапної сівалки коткового типу (рис. 3.5) який має двокомпонентну структуру, його зовнішня частина виконана у вигляді вертикального однобічно загостреного в середину диска, а в внутрішній частині розташовано котковий загортальний елемент, який складається з металевого каркасу диска на якому змонтована шина атмосферного тиску конічно-циліндричного профілю. Шина атмосферного тиску має внутрішню конструкцію змінної товщини, в верхній частини конічного профілю шини товщина стінки менша в нижній більша.

Запропонована конструкція забезпечує ефективну взаємодію робочих елементів з ґрунтом. Вертикальний однобічно загострений диск розрізає ґрунт з обох боків від рядка на задану глибину, відокремлюючи шар ґрунту в міждисковому просторі полегшуючи роботу внутрішнього коткового елемента. Завдяки своїй конічно-циліндричній формі в горизонтальній і вертикальній площинах цей елемент створює вертикальний тиск на відокремлений шар ґрунту, переміщуючи його до центру борозни, де розташоване насіння. Симетричне розташування обох частин загортача забезпечує рівномірне переміщення ґрунту з двох боків рядка, завдяки чому насіння не тільки покривається шаром ґрунту, а і притискається з обох боків

вологими шарами ґрунту нижніх горизонтів, що істотно покращує умови його проростання.

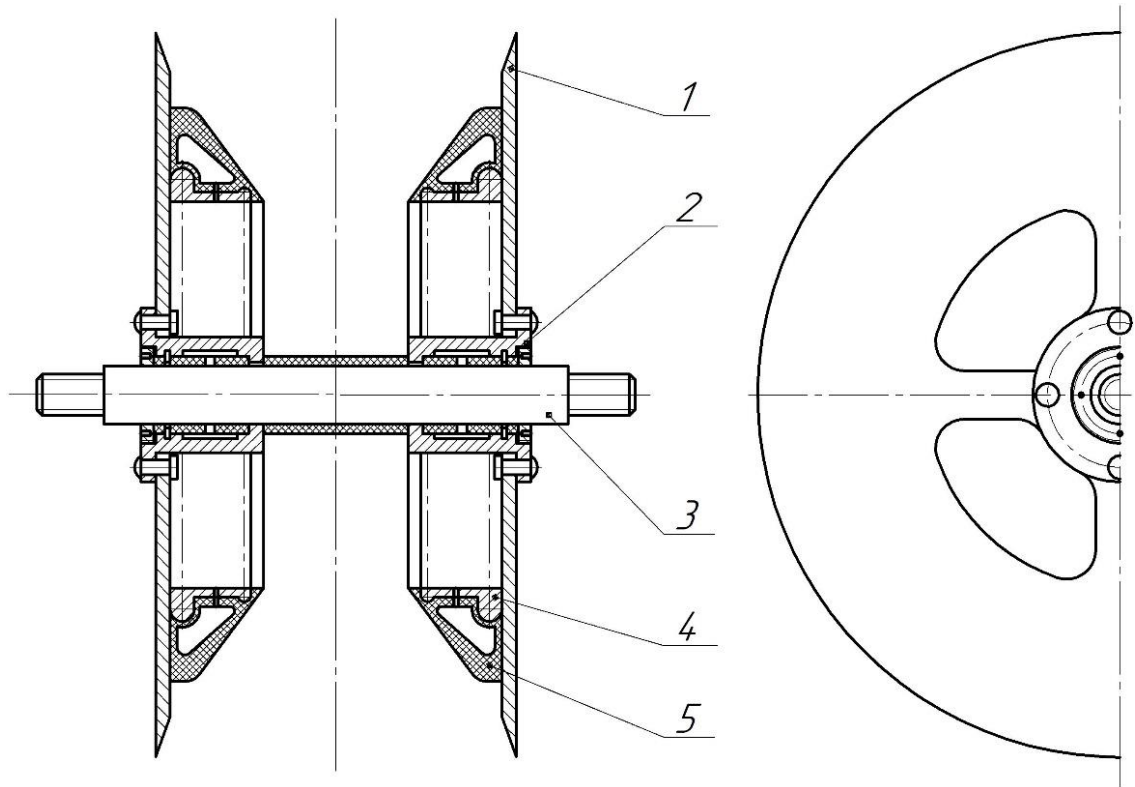


Рис. 3.5 Запропонований загортач коткового типу

1 – диск; 2 – ступиця; 3 – вісь; 4 – каркас; 5 – шина

За рахунок внутрішньої будови шини атмосферного тиску коткової частини загортача навантаження в ґрунті розподіляється плавно з низу доверху, причому максимальні значення формуються в нижній частині профілю шини за рахунок більшої товщини стінки і максимального занурення в шар ґрунту, а менші в верхній частині за рахунок меншої товщини стінки та меншого занурення в шар ґрунту, при підвищенні навантаження чи збільшені реакції ґрунту на дію коткової частини за рахунок різниці товщин стінок відбувається ефект демпфування шини, що також сприяє її самоочищенню.

Принцип дії загортача коткового типу полягає в тому, що під час руху агрегату диски загортача 1 розміщуються безпосередньо за щокми сошника, запобігаючи потраплянню сухого верхнього шару ґрунту в борозну. Одночасно диск 1 здійснює підрізання шарів ґрунту в міждисковому просторі

і, обертаючись, спрямовує їх під робочу поверхню шини атмосферного тиску 5. Завдяки конічно-циліндричному профілю шини ґрунт переміщується від дії конічної частини в бік до центру борозни в зону знаходження насіння і закриває її, а від дії циліндричної частини вниз для уникнення пристінного ефекту в місці прилягання шини і диска. Відстань між внутрішніми елементами загортача підібрано так, щоб забезпечити підвищене ущільнення ґрунту з обох боків насінини, але менший тиск безпосередньо над нею, що створює оптимальні умови для проростання. Шина атмосферного тиску 5 за рахунок різних товщин профілю має властивість деформуватися при перевищенні навантаження, створюючи ефект демпфування. Це сприяє більш плавному розподілу тиску по поверхні ґрунту, зменшує прилипання вологих частинок і покращує самоочищення робочої поверхні. Загортач кріпиться до секції робочих органів через підвіску, на яку діє важільний кронштейн, що натягується пружиною тиску. Під час роботи пружина стабілізує рух загортача, підтримує постійне навантаження і забезпечує його самоочищення від налиплого ґрунту та рослинних решток.

Переваги запропонованого загортача полягають у наступному:

диски загортача встановлені безпосередньо за сошником, що унеможливорює потрапляння сухого поверхневого більш сухого шару ґрунту в борозну. Завдяки цьому нижні, більш вологі шари спрямовуються під робочу поверхню загортача, забезпечуючи якісне укриття насіння вологим шарами ґрунту;

геометрія шини атмосферного тиску кокової частини загортача розрахована таким чином, щоб створювати підвищене ущільнення ґрунту з боків насінини при одночасному зменшенні тиску над нею. Це сприяє оптимальному мікроклімату для проростання та утриманню вологи в зоні розміщення насіння;

шина атмосферного тиску з внутрішньою порожниною змінної товщини стінок має здатність деформуватися під дією надмірного навантаження, створюючи ефект демпфування. Така особливість забезпечує рівномірний

розподіл тиску від поверхні шини, зменшує налипання вологих частинок і покращує її самоочищення;

пружинна підвіска забезпечує постійний контакт загортача з поверхнею ґрунту, стабілізує його рух і сприяє ефективному очищенню від налиплого ґрунту та рослинних решток під час роботи.

3.3 Розробка математичної моделі взаємодії загортача з ґрунтом

Для початку розгляду взаємодії загортача з ґрунтом визначаємо основні геометричні параметри елементів конструкції які здійснюють вплив на процес роботи (рис. 3.6).

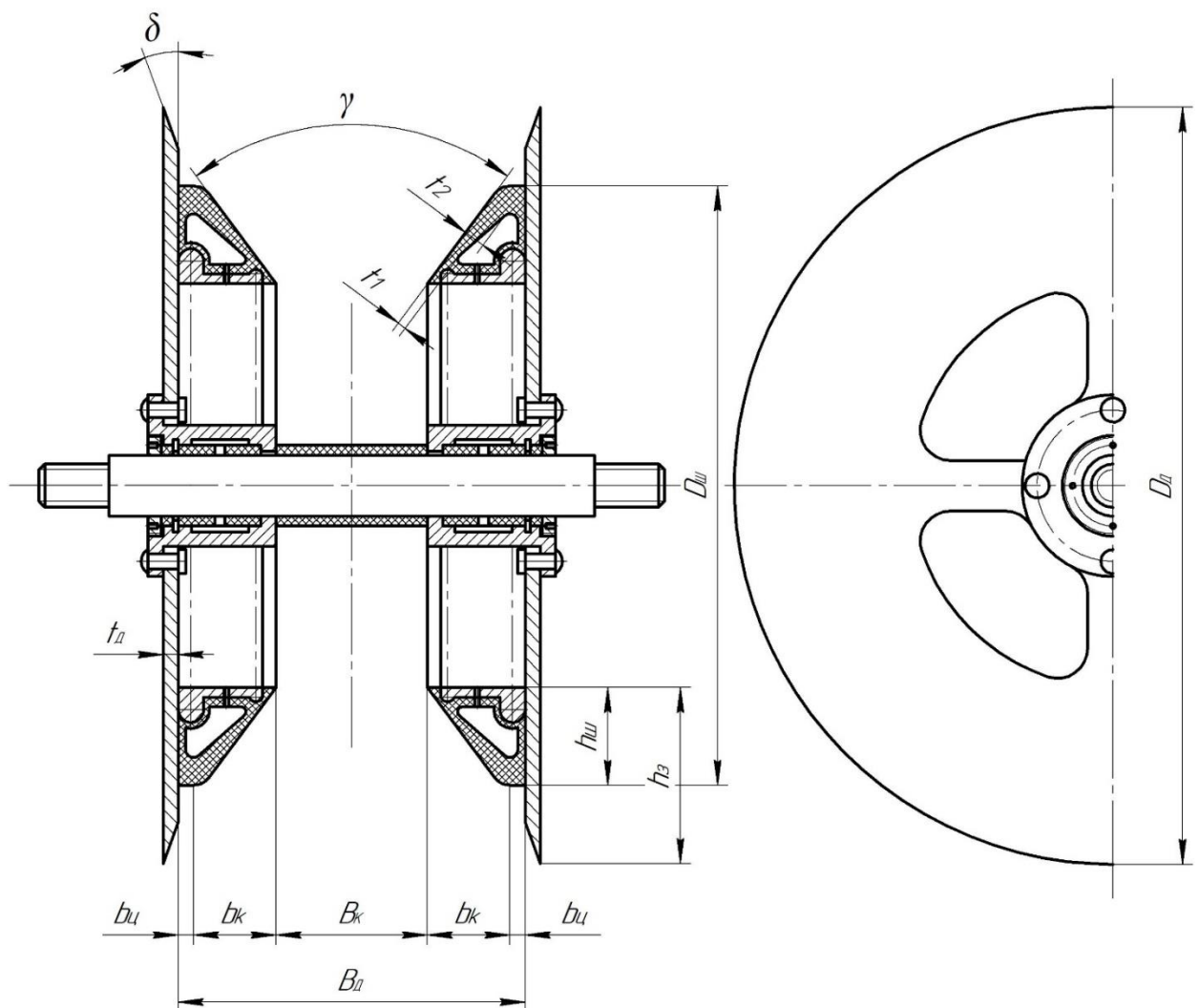


Рис. 3.6 Геометричні параметри розробленого загортача які можуть впливати на якість виконання технологічного процесу

D_{III} - діаметр шини атмосферного тиску, мм;

D_D - діаметр диску загортача, мм;

t_D - товщина диска загортача, мм;

t_1 - товщина тоншої стінки шини при вершині конічної поверхні, мм;

t_2 - товщина товщої стінки шини при основі конічної поверхні, мм;

γ - кут розхилу конічних поверхонь шини, мм;

$\alpha = \gamma / 2$ - кут нахилу твірної конуса до вертикалі;

B_D - ширина між дисками загортача, мм;

δ - кут загострення диска загортача, мм;

B_K - ширина між котковими елементами загортача, мм;

b_K - ширина конічної частини шини атмосферного тиску, мм;

$b_{\text{ц}}$ - ширина циліндричної частини шини атмосферного тиску, мм;

h_e - глибина ходу загортача (загальна);

$h_{\text{ш}}$ - глибина занурення в ґрунт шини атмосферного тиску, мм;

h_3 - глибина занурення в ґрунт робочої частини загортача, мм.

В процесі роботи загортача на його конструктивні поверхні діють наступні сили (рис. 3.7):

Q - навантаження на загортач (сумарне - власна вага і натискна сила пружини);

F_K - сила, яка виникає від дії конічної частини шини на ґрунт, Н;

$F_{\text{ц}}$ - сила, яка виникає від дії циліндричної частини шини на ґрунт, Н;

F_D - сила, яка виникає від дії диску загортача на ґрунт, Н;

$R_{\text{ш}}$ - реакція шини на ґрунт, Н;

R_D - реакція диска загортача на ґрунт, Н;

V_c - швидкість руху сівалки, м/с.

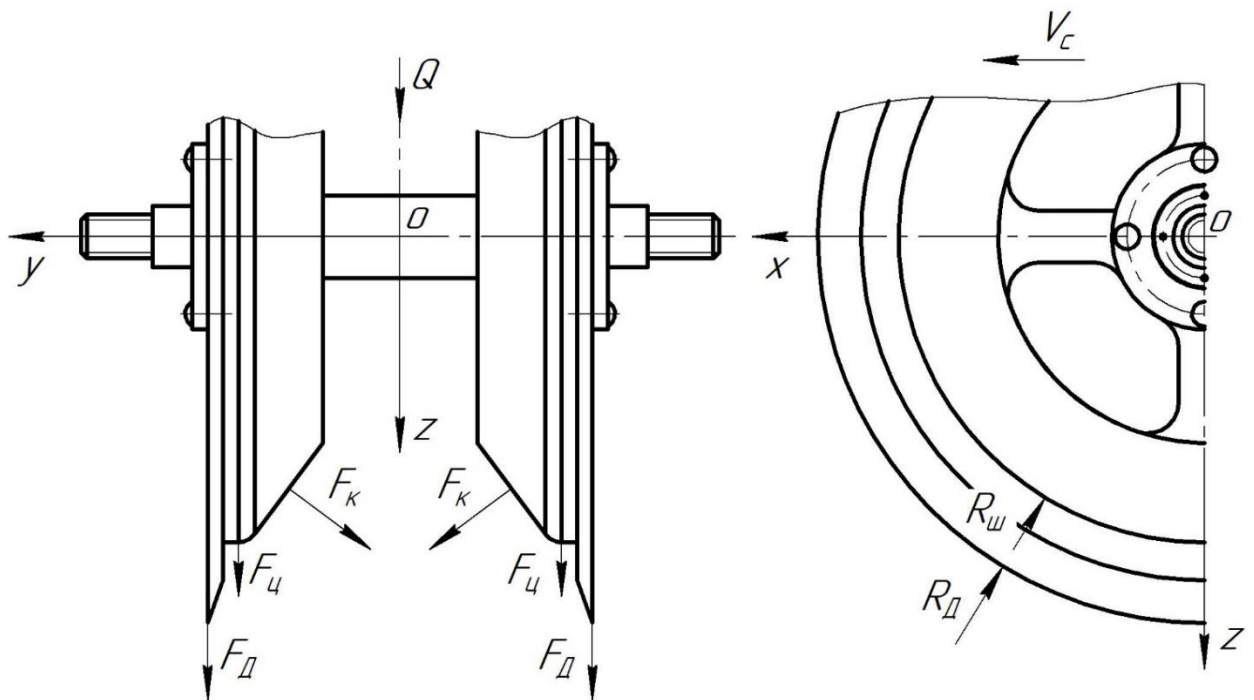


Рис. 3.7 Схема сил, що діють на загортач в процесі роботи

Математична модель взаємодії комбінованого коткового загортача з ґрунтом повинна описувати фізико-механічні процеси, що відбуваються при роботі загортача, який складається з вертикального диска та еластичної шини атмосферного тиску конічно-циліндричної форми.

Прийmemo систему координат $Oxyz$, де вісь Ox збігається з напрямком руху сівалки (V_c), вісь Oz спрямована вертикально вниз (вглиб ґрунту), а вісь Oy перпендикулярно до напрямку руху (вбік від рядка).

Складемо рівняння вертикальної рівноваги сил, що діють на його поверхні. Оскільки, на загортач діють сили реакції на диску $F_{Д}$, на конічній частині шини F_K та циліндричній частині $F_{ц}$ то рівняння вертикальної рівноваги для однієї секції (половини загортача) має вигляд:

$$Q = 2 \cdot F_{z,Д} + F_{z,K} + F_{z,ц}, \quad (3.1)$$

де $F_{z,Д}$ - вертикальна реакція ґрунту на диск;

$F_{z,\kappa}$ - вертикальна реакція на конічну частину шини;

$F_{z,\varphi}$ - вертикальна реакція на циліндричну частину шини.

Щоб математична модель враховувала всі нюанси взаємодії загортача із ґрунтом, кожен з цих реакцій потрібно визначити через геометричні параметри робочих елементів, що приймають участь у процесі та фізико-механічні властивості ґрунту.

Визначаємо вертикальну реакцію ґрунту на диск $F_{z,D}$.

Диск розрізає ґрунт на задану глибину. Реакція виникає через опір ґрунту проникненню (зминанню під лезом) та тертя по бічних поверхнях диска:

$$F_{z,D} = \int_0^{l_\partial} (q_s \cdot t_D + 2\tau_s \cdot h_z(x)) dx, \quad (3.2)$$

де t_D - товщина диска загортача, чим товщий диск, тим більший опір зминанню ґрунту;

q_s - опір зминанню ґрунту;

$h_z(x)$ - поточна глибина занурення робочої частини загортача в кожній точці контакту, максимальне значення якої дорівнює h_3 ;

l_∂ - довжина дуги контакту диска з ґрунтом, яка геометрично визначається через діаметр диска D_D та заглиблення h_3 ;

τ_s - питомий опір тертю ґрунту об сталь. Множник 2 враховує тертя з обох боків диска.

Визначаємо вертикальну реакцію ґрунту на конічну частину шини $F_{z,\kappa}$.

Конічна частина шини створює тиск на ґрунт, переміщуючи його до центру борозни. Вона діє на ґрунт під кутом розхилу γ :

$$F_{z,k} = \int_{S_k} \left(p_k(z) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \tau_k \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right) dS, \quad (3.3)$$

де γ - кут розхилу конічних поверхонь шини, визначає геометрію контакту;

$p_k(z)$ - нормальний тиск, діє перпендикулярно до поверхні, тому його вертикальна проекція містить $\frac{\gamma}{2}$;

τ_k - дотичне напруження тертя ґрунту об шину, перешкоджає ковзанню ґрунту вгору, тому його проекція містить $\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)$;

S_k - площа контакту, залежить від ширини конічної частини b_k та глибини занурення шини h_3 .

Тиск $p_k(z)$ розподіляється нерівномірно. Завдяки внутрішній будові шини атмосферного тиску змінної товщини (тонша стінка t_1 при вершині та товща t_2 при основі), навантаження розподіляється плавно з низу доверху. Максимальне значення формується в нижній частині профілю.

Визначаємо вертикальну реакцію ґрунту на циліндричну частину шини $F_{z,u}$. Ця частина шини створює тиск вниз для уникнення пристінного ефекту в місці прилягання шини і диска:

$$F_{z,u} = \int_{S_c} p_c \cdot dS \approx p_{сep} \cdot b_u \cdot l_c, \quad (3.4)$$

де S_c - площа контакту, яка залежить від ширини циліндричної частини b_u ;

l_c - довжина плями контакту, залежить від діаметра шини $D_{ш}$ та глибини її занурення $h_{ш}$;

$P_{сер}$ - середній тиск.

Оскільки циліндрична частина є горизонтальною в поперечному перерізі, весь її тиск P_c спрямований переважно вертикально вниз. Також діє ефект демпфування, при перевищенні навантаження шина деформується. Це збільшує площу S_c та довжину l_c , що призводить до зменшення середнього тиску $P_{сер}$ і плавного його розподілу.

Отримані рівняння утворюють основу силового аналізу та дозволяють: визначити жорсткість натискної пружини, знаючи необхідне зусилля ущільнення Q для створення оптимального мікроклімату для насіння, можна розрахувати необхідні параметри підвіски та пружини;

оптимізувати кут γ , аналіз рівняння (3.3) показує, як кут розхилу конічних поверхонь шини впливає на співвідношення вертикального втискання і горизонтального зсуву ґрунту в зону знаходження насіння;

математично описати демпфування, шляхом введення функції деформації гуми (залежної від товщин стінок t_1 та t_2) у функції тиску P_k та P_c , модель здатна показати, як саме шина гасить пікові навантаження та самоочищується;

модель пов'язує глибину занурення шини $h_{ш}$ та диска h_z через загальне навантаження Q , дозволяючи знайти оптимальний баланс, при якому диск ефективно відокремлює шар ґрунту, а шина формує потрібну щільність над насінною.

Проведемо силовий аналіз на конічній поверхні загортача з метою обґрунтування раціонального кута розхилу конічних поверхонь шини γ .

Конічна частина коткової частини загортача виконує головну роботу по зміщенню ґрунту до центру рядка (рис. 3.8).

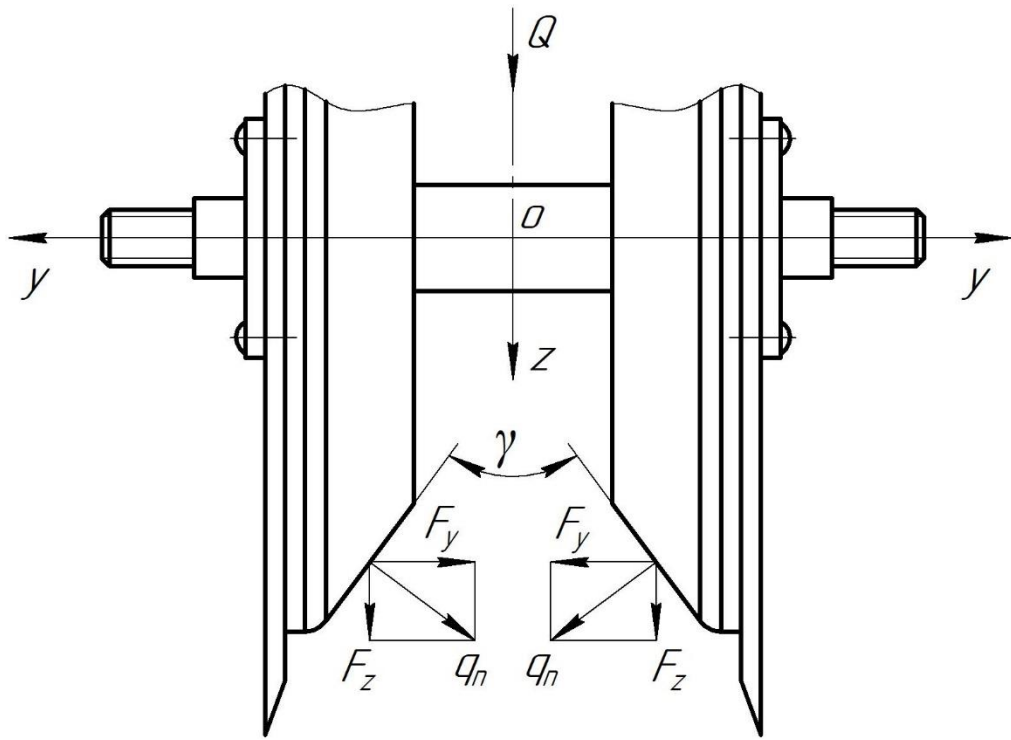


Рис. 3.8 Силевий аналіз на конічній поверхні загортача

Розглянемо елементарну ділянку dS на конічній поверхні. На неї діє нормальний тиск q_n та сила тертя ґрунту об матеріал шини $f \cdot q_n$ (f - коефіцієнт тертя). Тоді проекції сил - вертикальна (ущільнююча) та горизонтальна (зсуваюча до центру) будуть описуватись рівняннями:

$$F_z = \int \left(q_n \cdot \sin \frac{\gamma}{2} + f q_n \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \right) dS, \quad (3.5)$$

$$F_y = \int \left(q_n \cdot \cos \frac{\gamma}{2} + f q_n \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \right) dS. \quad (3.6)$$

Умовою раціонального кута розхилу γ для ефективного закриття борозни, горизонтальна складова F_y повинна бути додатньою і максимальною, щоб перемістити ґрунт, а не просто втиснути його вниз. Якщо $\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} < f$, ґрунт буде налипати і не буде зсуватися. Також необхідно подолати опір ґрунту зсуву τ_z .

Раціональний кут $\alpha = \frac{\gamma}{2}$ визначається з умови ковзання ґрунту по поверхні та забезпечення необхідного бічного тиску:

$$\frac{\gamma}{2} > \arctg(f) + \psi, \quad (3.7)$$

де ψ - кут, що враховує опір ґрунту сколюванню (залежить від вологості та типу ґрунту).

Оптимальне значення γ можна знайти, максимізуючи функцію відношення бічного зусилля до вертикального (ККД загортання):

$$k_3 = \frac{F_y}{F_z} = \frac{\cos \frac{\gamma}{2} + f \cdot \sin \frac{\gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2} + f \cdot \cos \frac{\gamma}{2}} = \operatorname{ctg} \left(\frac{\gamma}{2} + \varphi \right). \quad (3.8)$$

Таким чином, для збільшення бокового зсуву кут при вершині конуса (між твірними) γ повинен бути меншим, але це обмежується конструктивною довжиною маточини тому необхідно обирати γ в межах $90 \dots 120^\circ$.

Розглянемо розподіл тиску в ґрунті від дії робочої поверхні загортача.

Тиск має бути максимальним збоку від насінини і мінімальним над нею, тому спочатку проаналізуємо розподіл тиску по глибині контакту. Тиск шини на ґрунт $q(z)$ не є рівномірним через змінну товщину стінки (t_1, t_2).

Жорсткість шини $C_u(z)$ змінюється лінійно вздовж твірної конуса:

$$C_u(z) = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \frac{z}{h_k}, \quad (3.9)$$

де h_k - висота контакту;

z - поточна глибина занурення.

Тиск на ґрунт $q(z)$ визначається як функція деформації ґрунту Δz та деформації шини Δ_u :

$$q(z) = \frac{C_u(z) \cdot k_z}{C_u(z) + k_z} \cdot z^n, \quad (3.10)$$

де k_z - коефіцієнт об'ємного змину ґрунту;

n - показник ступеня (зазвичай 0,8...1,2).

Розглянемо як діють напруження навколо насінини (рис. 3.9).

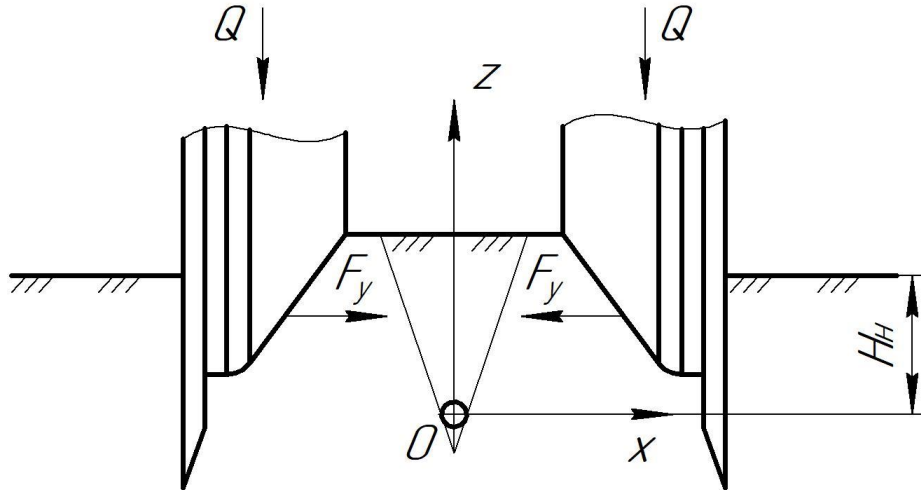


Рис. 3.9 Схема для визначення напружень в зоні залягання насіння

Нехай центр насінини знаходиться в точці $(0, H_n)$. Напруження $\sigma_y(y, z)$ (бокове стиснення), яке створюється загортачем, можна описати модифікованим рівнянням Буссінеска [19,20] для навантаження, розподіленого по смузі (конічній поверхні):

$$\sigma_y(0, H_n) = \frac{2F_y}{\pi} \int \frac{y^2 \cdot z_r}{R_d^4} dy. \quad (3.11)$$

Оскільки шина має ефект демпфування, пікові навантаження згладжуються. Епюра розподілу напружень $\sigma(y)$ в горизонтальній площині на глибині залягання насіння матиме двохпіковий характер:

$$\sigma(y) = \sigma_{\max} \cdot e^{-\frac{\left(y - \frac{B_k}{2}\right)^2}{2\sigma_\omega^{24}}} + \sigma_{\max} \cdot e^{-\frac{\left(y + \frac{B_k}{2}\right)^2}{2\sigma_\omega^{24}}}. \quad (3.12)$$

Максимуми знаходяться в точках контакту шин $(y = \pm \frac{B_k}{2})$.

В центрі ($y = 0$) напруження $\sigma(0) < \sigma_{\max}$, що відповідає конструкції загортача.

Визначення ширини між шинами (B_k) загортача.

Ширина B_k (відстань між внутрішніми кромками котків) визначається із умови неруйнування насіннєвого ложа, але забезпечення контакту ґрунту з насінням:

$$B_k = b_c + 2 \cdot \Delta_z, \quad (3.13)$$

де b_c - ширина борозенки, залишеної сошником;

Δ_z - товщина шару ґрунту, який осипається до моменту проходу загортача (залежить від швидкості V_c).

Якщо B_k занадто мале, то може відбуватись пошкодження насіння вертикальним тиском.

Якщо B_k занадто велике, то може відбуватись недостатнє бокове ущільнення.

Раціональним може бути:

$$B_k = (2 \dots 3) \cdot d_n + b_c, \quad (3.14)$$

де d_n - діаметра насінини.

Проведем аналіз тягового опору загортача.

Повний тяговий опір R_x складається з трьох компонентів:

$$R_x = R_p + R_k + R_T, \quad (3.15)$$

де R_p - опір різанню ґрунту диском;

R_k - опір коченню шини;

R_T - опір тертя ґрунту об бічні поверхні конічної поверхні загортача.

Визначимо опір різанню ґрунту диском (R_p):

$$R_p = 2 \cdot k \cdot h_d \cdot t_d, \quad (3.16)$$

де k - питомий опір ґрунту різанню;

h_o - глибина ходу диска;

t_o - товщина диска.

Опір коченню шини (R_k), визначається роботою на деформацію ґрунту, для колеса радіусом R :

$$R_k = \frac{Q \cdot f}{R} . \quad (3.17)$$

Якщо виразить через глибину колії h_k :

$$R_k = \frac{1}{2} \cdot b_e \cdot h_k^2 , \quad (3.18)$$

де h_k - глибина колії;

b_e - еквівалентна ширина контакту (сума проєкцій конічної та циліндричної частин).

Опір тертя ґрунту об бічні поверхні конічної частини загортача виникає через зсув ґрунту до центру та можна розрахувати:

$$R_T = 2 \cdot N_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right), \quad (3.19)$$

де N_k - нормальне зусилля, що діє на ґрунт від конічної поверхні загортача.

Розрахуємо раціональні діаметри диска (D_d) і шини ($D_{ш}$).

Діаметр диска D_d повинен бути таким щоб забезпечити не тільки занурення і відділення шару ґрунту в між дисковому проміжку, а і повинен перерізати рослинні рештки та стабілізувати хід загортача під час виконання процесу загортання насіння. Умова защемлення рослинних решток (щоб диск їх перерізував, а не штовхав поперед себе):

$$\alpha_p < \varphi_{fp} + \varphi_{fz} . \quad (3.20)$$

Кут входження α_p залежить від глибини h_d :

$$\cos(\alpha_p) = 1 - \frac{2h_d}{D_d}. \quad (3.21)$$

Тоді мінімальний діаметр:

$$D_d \geq \frac{2h_d}{1 - \cos(\varphi_\Sigma)}. \quad (3.22)$$

Діаметр шини $D_{ш}$. Оскільки шина має забезпечувати плавний розподіл тиску, а більший діаметр зменшує тяговий опір (ефект нагортання) то умова кочення без зсуву ґрунту перед собою:

$$D_{ш} \geq \frac{2h_\kappa}{1 - \cos(\tau_{\max})}, \quad (3.23)$$

де $\tau_{\max}$ - кут зчеплення.

Також, щоб диск працював як реборда і захисний екран $D_d > D_{ш}$.

Таким чином, виконано комплексне теоретичне обґрунтування конструкції та параметрів комбінованого коткового загортача просапної сівалки з урахуванням умов формування насінневого ложа, фізико-механічних властивостей ґрунту та енергетичних показників роботи.

Розроблена математична модель враховує геометричні параметри робочих елементів (диск, конічна та циліндрична частини шини), фізико-механічні властивості ґрунту, кінематичні та силові фактори процесу загортання. Модель дозволяє розділити загальний вплив загортача на вертикальне ущільнення ґрунту, бокове переміщення ґрунту до насінини, демпфування пікових навантажень за рахунок еластичної шини. Це дало змогу перейти від емпіричного підбору параметрів до обґрунтованої оптимізації конструкції.

4. Практична реалізація результатів досліджень

На основі розробленої математичної моделі взаємодії загортача з ґрунтом можна оцінити ефективність його роботи. Для можливості отримання кількісних характеристик процесу роботи загортача були використані значення розмірів геометричних параметрів із розробленого креслення робочого органу, а значення фізико-механічних властивостей ґрунту і інших потрібних для розрахунку даних із довідкової літератури [11-16,19,20]. Розглянемо ККД загортання ґрунтом борозни від дії конічної частини загортача (рис. 4.1).

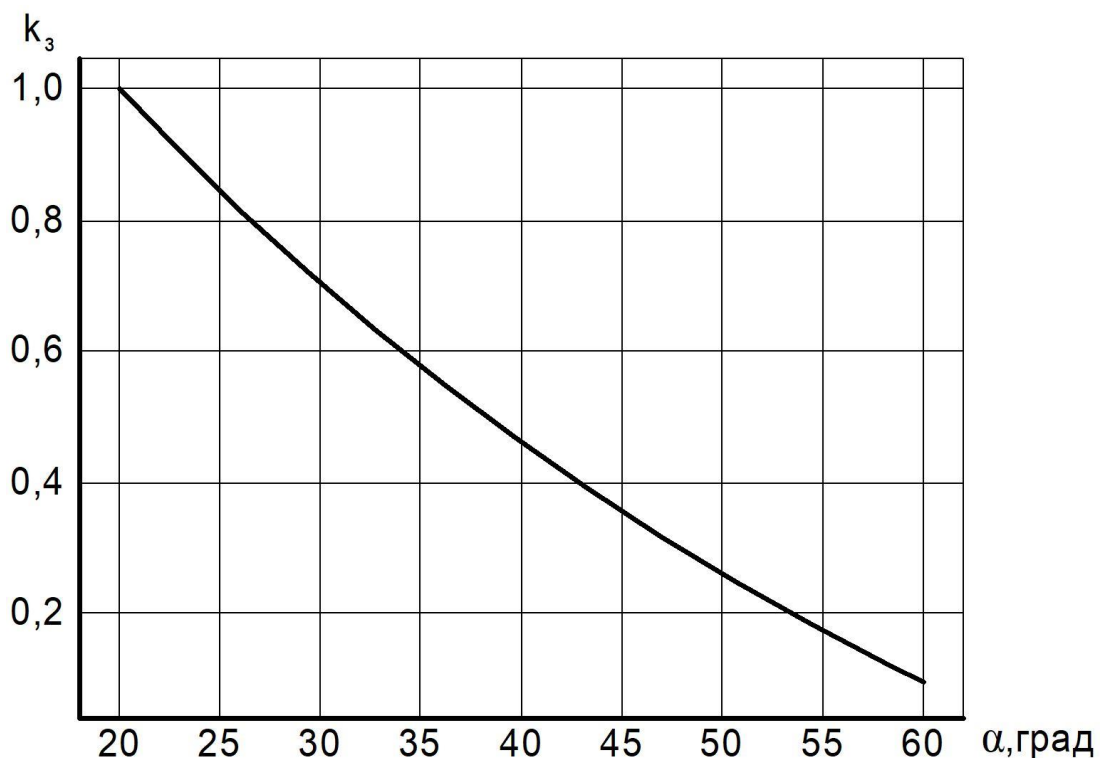


Рис. 4.1 Залежність ефективності роботи загортача

Графік побудований за рівняннями (3.5–3.8) для чорнозему при: вологості 20 %, внутрішньому терті ґрунту $\varphi = 25^\circ$ (типове значення), коефіцієнті тертя ґрунту по гумі $\mu = 0,65$.

Аналізуючи отриману залежність можна бачити чітку спадну залежність, при збільшенні кута α зростає вертикальне втискання, зменшується бокове переміщення ґрунту. При малих кутах (20 - 25°) буде відбуватись максимальний боковий зсув при цьому існує ризик налипання

вологого ґрунту, зростання опору ковзанню, нестабільної робота на важких ґрунтах. При великих кутах ($45 - 60^\circ$) поверхня стабільно тисне вниз, практично втрачається функція руху ґрунту до центру борозни ґрунт просто ущільнюється, але не зсувається.

Раціональна зона $\alpha = 30...40^\circ$, саме в цьому діапазоні горизонтальна складова ще достатня, тертя не блокує рух ґрунту, забезпечується активне закриття борозни. Раціональний кут твірної конуса до вертикалі $\alpha = 35 \pm 5^\circ$, що відповідає куту при вершині конуса $90...110^\circ$, це збігається з теоретичними передумовами розробки конструктивної схеми коткової частини загортача, не потребує подовження маточини, буде стабільно працювати при швидкості 7,2 км/год.

На (рис. 4.2) побудована залежність розподілу жорсткості (тиску) вздовж конічної частини шини коткової частини загортача.

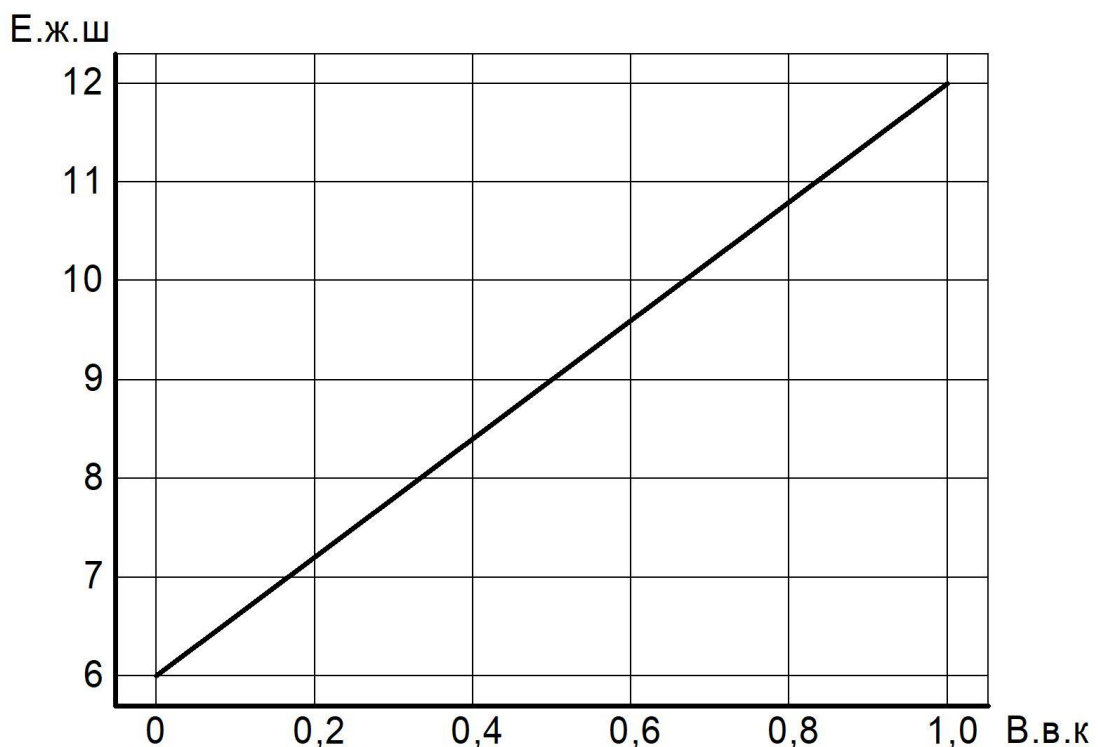


Рис. 4.2 Графік розподілу жорсткості (тиску) вздовж конічної частини

На графіку показана еюра жорсткості шини, яка визначається товщиною стінки, безпосередньо формує розподіл тиску в ґрунті. Графік отриманий в умовних одиницях для можливості аналізу самого процесу, а не

конкретних фізичних значень. Як видно, в процесі виконання технологічного процесу загортання насіння відбувається зростання жорсткості донизу, максимальний тиск формується нижче насінини, саме там відбувається підтягування капілярної вологи. Мінімальний тиск зверху, насіння не ущільнюється зверху, зберігається повітрообмін, проростання відбувається швидше.

Демпфування - при пікових навантаженнях шина деформується, площа контакту зростає, середній тиск зменшується, відбувається самоочищення та покращується стабільність.

Таким чином, можна сказати, що запропонований загортач працює не за принципом просто притиснути, а за принципом керованого перерозподілу напружень у ґрунті: диск відокремлює та захищає вологий шар, конічна частина зсуває ґрунт до насіння, циліндрична стабілізує і демпфує, змінна товщина формує правильну епюру тиску.

Для розуміння чи виконує правильно технологічний процес конструктивна схема загортача необхідно побудувати залежність формування напружень навколо насіння (рис. 4.3).

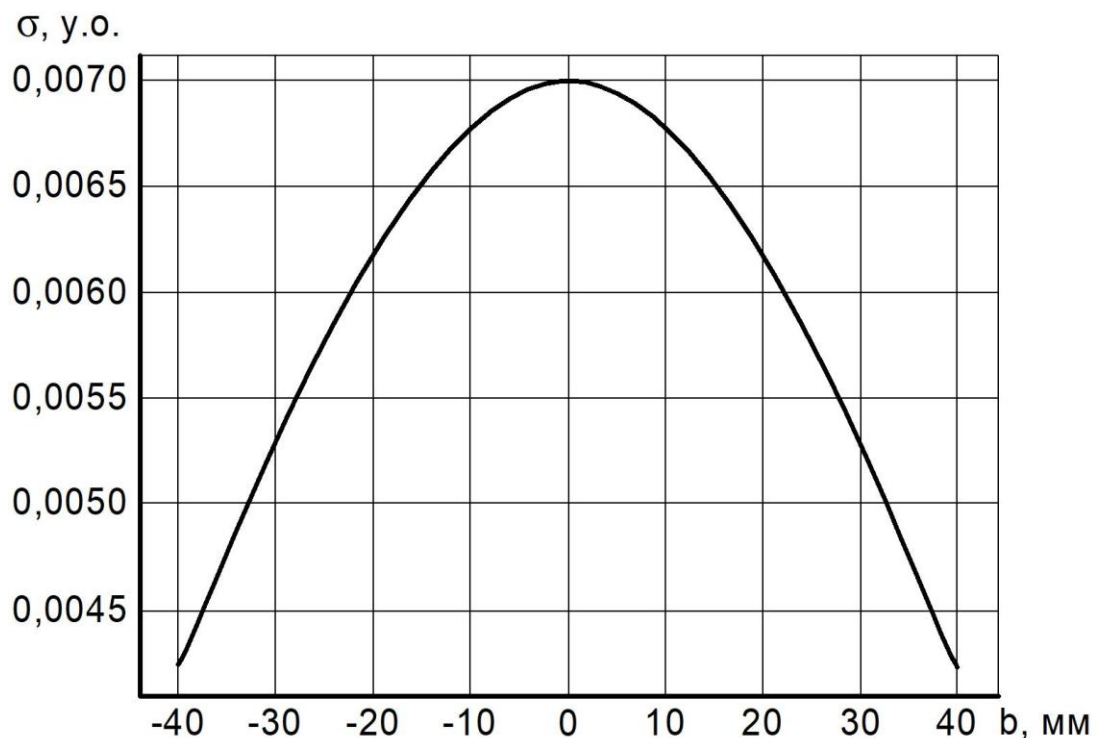


Рис. 4.3 Залежність формування напружень навколо насіння

Нами розглядався горизонтальний переріз на глибині залягання насінини (4 см), де на ґрунт діють два симетричні навантаження від коткових елементів, кожне навантаження передається через еластичну шину з демпфуванням. Для цього була використана класична ідея Буссінеска, але адаптована - не точкове навантаження, а смугово-розподілене, зведене до двох максимумів. Отриманий графік показує двохпікову епюру бокових напружень, максимумами знаходяться в зонах контакту шин, мінімум строго в центрі рядка, де знаходиться насінина.

Головною дією в цьому випадку є бокове, а не вертикальне ущільнення, насіння притискається з обох боків, контакт з вологим ґрунтом максимальний, але зверху немає пікового навантаження. Бокові напруження формують капілярні канали, в результаті волога з нижніх горизонтів може стабільно надходити до насінини. Демпфування шини згладжує піки, у жорсткого котка максимум був би різкішим, в нашій конструкції плавна крива, це зменшує ризик руйнування насіннєвого ложа.

Таким чином можна сказати, що конструкція загортача формує оптимальну напружено-деформовану зону, дві області максимального ущільнення по боках, мінімум напружень у центрі, все це створює умови для швидкого та дружного проростання насіння.

Також, розроблена математична модель дає можливість оцінити вплив тягового опору удосконаленого загортача при виконанні технологічного процесу загортання насіння (рис. 4.4).

Просторова залежність тягового опору загортача від глибини загортання та швидкості руху має характер майже лінійної поверхні без різко виражених нелінійностей. Основний вплив на величину тягового опору здійснює глибина загортання, тоді як швидкість руху в агротехнічно допустимих межах має незначний вплив. Це свідчить про стабільну та енергетично ефективну роботу запропонованого загортача.

Аналіз форми отриманої поверхні показав, що поверхня майже похила площина, що дуже хороший результат, бо означає відсутність нелінійних

стрибків опору та стабільну роботу загортача у всьому робочому діапазоні. У реальних польових умовах саме такі поверхні вважаються ознакою технологічно надійної конструкції.

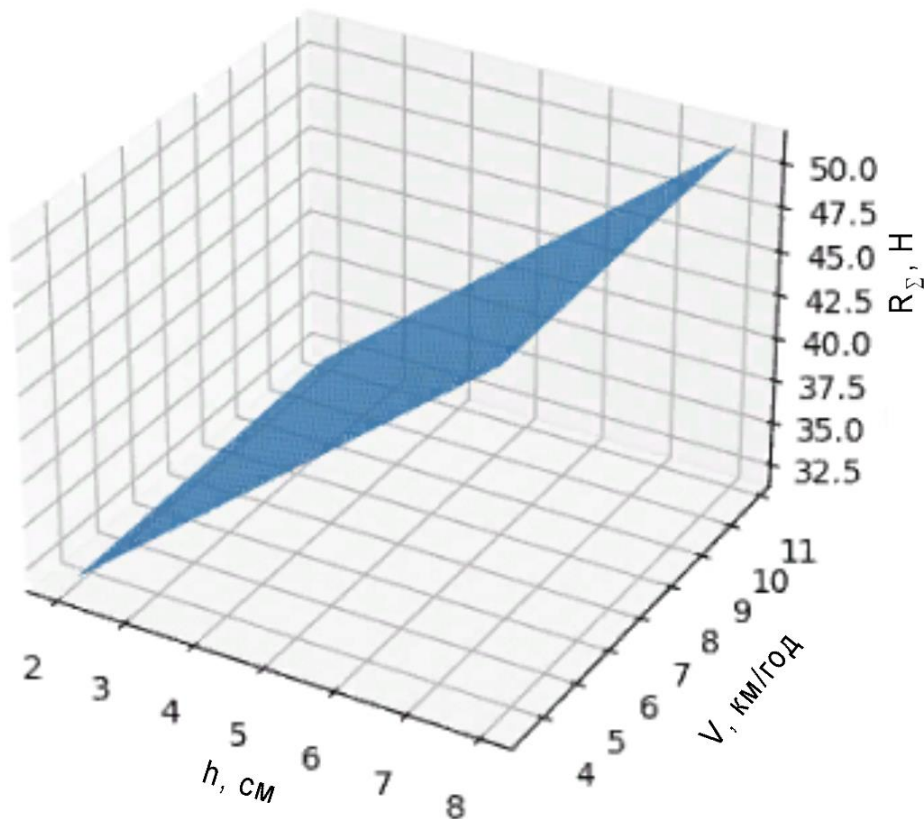


Рис. 4.4 Графік тягового опору загортача, як функції глибини загортання та швидкості руху

Нахил поверхні по осі глибини значно більший, ніж по осі швидкості, а це означає, що основна частина енергії витрачається на різання та деформацію ґрунту, а не на інерційні або швидкісні ефекти.

Також можна спостерігати слабку чутливість загортача до швидкості його руху. При будь-якій фіксованій глибині збільшення швидкості з 4 до 11 км/год дає приріст тягового опору менше 2%. Це напряду підтверджує переважання процесу кочення над зсувом, відсутністю ґрунтового клину перед робочим органом. Якщо перетнути поверхню по робочій глибині 4 - 5 см, то можемо побачити тяговий опір в межах 38 - 41 Н, який практично незалежить від швидкості і є оптимальним з точки зору енергетики та якості загортання.

Раціональна робоча область знаходиться в межах $h = 3...5$ см,
 $V = 6...9$ км / год.

Фізично пояснити отриманий результат можна особливостями конструкції удосконаленого загортача. Вертикальний диск стабілізує хід, локалізує деформацію ґрунту, забезпечує передбачуваний опір. Еластична шина гасить пікові навантаження, збільшує площу контакту без росту тиску, мінімізує швидкісні ефекти. Конічно-циліндрична форма коткової частини робочої поверхні загортача спрямовує ґрунт до центру, не створює ефекту нагортання.

На (рис. 4.5) наведена залежність впливу діаметра шини на тяговий опір загортача.

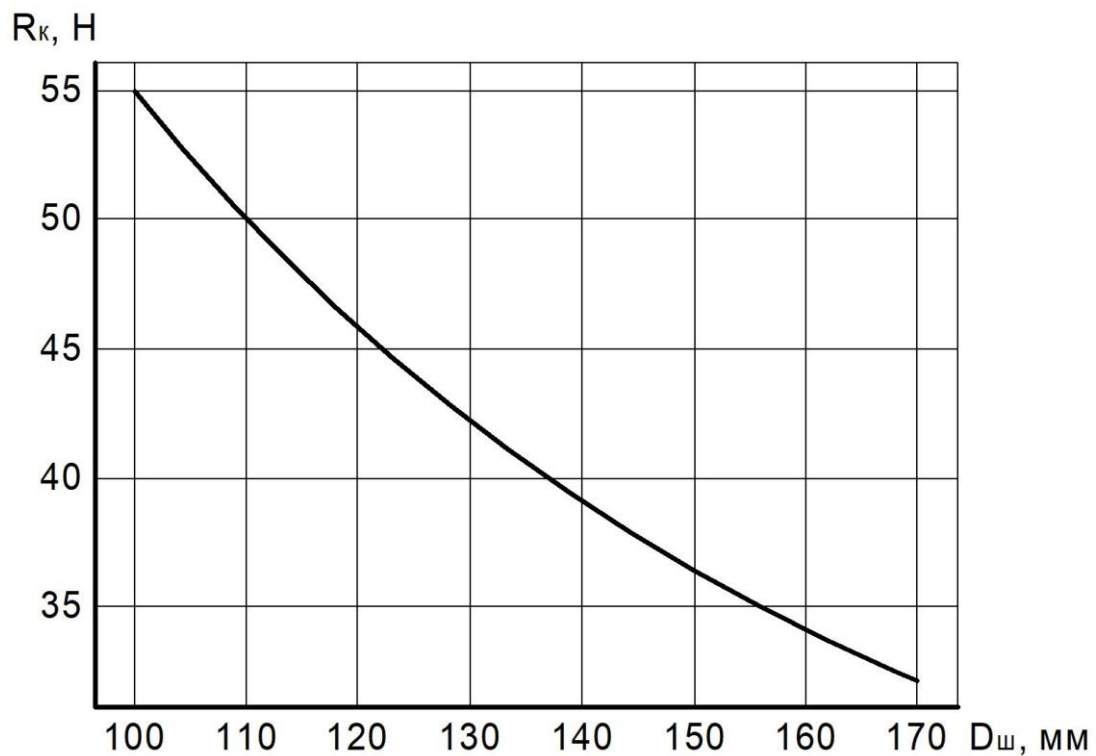


Рис. 4.5 Вплив діаметра шини на тяговий опір загортача

Графік показує чітку нелінійну спадну залежність:

при 100 мм - ≈ 55 Н;

при 130 мм - ≈ 42 Н;

при 150 мм - $\approx 36 - 37$ Н;

при 170 мм - ≈ 32 Н.

Тобто збільшення діаметра на 70 мм зменшує складову опору приблизно на 23Н.

В зоні 100 - 120мм крива дуже крута, це говорить про те, що невелике зменшення діаметра різко підвищує опір. В зоні 140 - 170мм крива вирівнюється, подальше збільшення діаметра дає менший ефект.

При $D < 110$ мм шина працює з підвищеним зануренням, виникає нагортання ґрунту, зростає деформація шару над насінням. Таким чином раціональна зона має діапазон діаметра шини від 135 до 155мм.

Це забезпечує стабільне кочення, мінімізацію тягового опору, достатню жорсткість профілю, нормальну роботу демпфування. Збільшення понад 160мм енергетично малоефективне.

На (рис. 4.6) наведена залежність впливу діаметра диска на процес різання ґрунту.

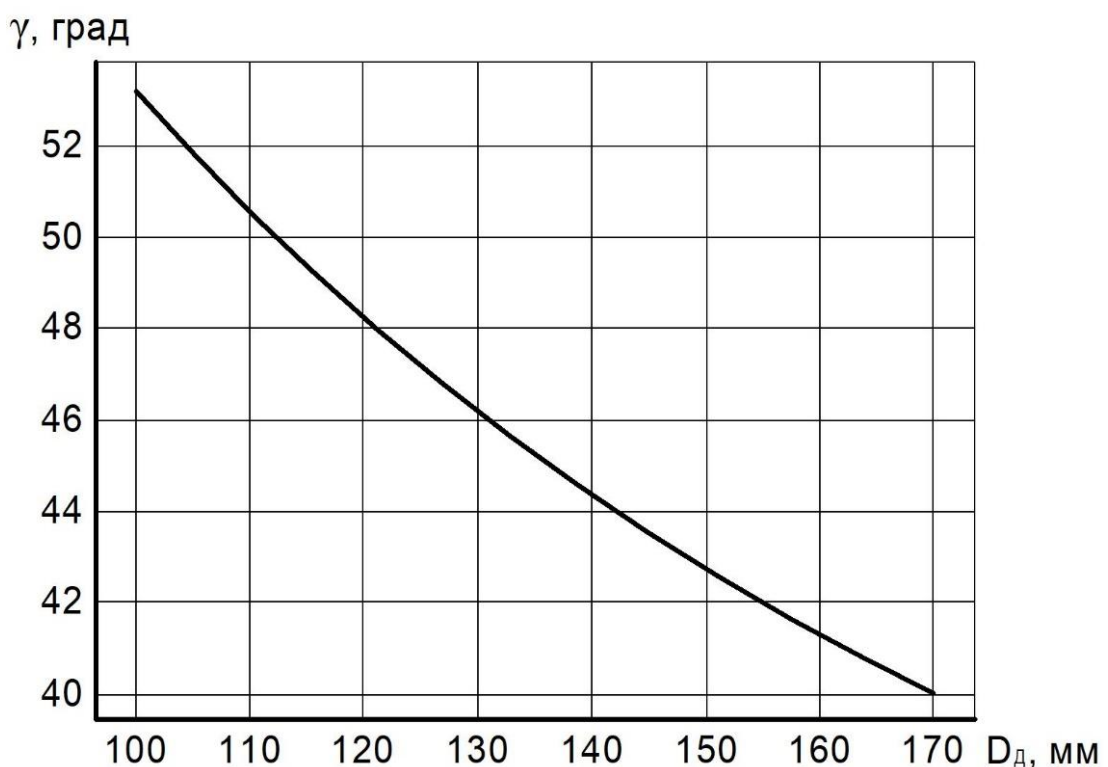


Рис. 4.6 Залежність впливу діаметра диска на процес різання ґрунту

Отримали наступну картину, кут входження диска зменшується зі зростанням діаметра:

100 мм - $\approx 53^\circ$;

120 мм - $\approx 48^\circ$;

140 мм - $\approx 44^\circ$;

170 мм - $\approx 40^\circ$.

Видно, що при $D \approx 100$ мм, різання агресивне, високий ударний характер входження, більший опір зминанню. При $D \approx 130 - 150$ мм, кут $42 - 46^\circ$, різання стає ковзним, зменшується руйнування структури ґрунту, покращується відділення вологого шару. При $D > 160$ мм, зниження кута вже не дає суттєвого технологічного виграшу, зростає маса та інерційність. Рациональний діаметр диска загортача можна приймати в межах від 140 до 160мм. Це забезпечує кут входження $41 - 44^\circ$, стабільне різання без ударного навантаження, ефективно перерізання рослинних решток, мінімізацію зминання ґрунту.

Висновки до розділу:

Аналіз поділу напружень у зоні залягання насіння показав, що запропонований загортач формує двохпіковий розподіл бокових напружень, при якому максимальні значення напружень зосереджені по боках насінини, мінімальні безпосередньо над нею. Такий характер напруженого стану забезпечує надійний контакт насіння з вологими шарами ґрунту, підтягування капілярної вологи з нижніх горизонтів, зниження ризику переущільнення насіннєвого ложа. Отриманий результат підтверджує агротехнічну доцільність застосування коткового загортача з еластичною шиною конічно-циліндричної форми.

На основі силового аналізу та аналізу ефективності бокового зсуву ґрунту встановлено раціональні геометричні параметри загортача: кут нахилу твірної конічної частини шини до вертикалі, що забезпечує максимальне співвідношення бокового зусилля до вертикального ущільнення, співвідношення товщин стінок шини, яке формує плавний розподіл тиску та ефект демпфування, відстань між котковими елементами, що забезпечує достатнє бокове ущільнення без пошкодження насіння. Таким чином, оптимізація параметрів виконана з урахуванням одночасного забезпечення агротехнічних та енергетичних вимог.

Встановлено, що повний тяговий опір загортача при вертикальному навантаженні 4 кг і робочій глибині 4 см становить близько 38 Н.

Аналіз отриманих в математичній моделі залежностей показав, що: тяговий опір лінійно зростає з глибиною загортання, слабо залежить від швидкості руху в діапазоні 4 - 11 км/год.

Побудована просторова залежність має характер майже похилої площини без різко виражених нелінійностей, що свідчить про стабільність роботи загортача, відсутність пікових енергетичних навантажень, можливість роботи на підвищених швидкостях без втрати якості загортання.

Запропонована конструкція комбінованого коткового загортача забезпечує раціональний баланс між якістю загортання насіння та енергетичними витратами за рахунок розділення процесу загортання на етапи бокового зсуву та вертикального ущільнення, використання еластичної шини з демпфуючими властивостями, оптимізації геометричних параметрів робочих елементів.

Отримані теоретичні результати є надійною основою для виготовлення дослідного зразка, проведення експериментальних досліджень, порівняння з серійними загортачами.

5. Охорона праці

Вимоги з охорони праці при посіві просапними сівалками

Робота з просапними сівалками належить до робіт із підвищеною небезпекою, оскільки поєднує експлуатацію важкої техніки, роботу рухомих механізмів та контакт із хімічно обробленим насінням (протруйниками) і добривами.

Нижче наведено основні вимоги з охорони праці, структуровані за етапами робіт [21-27].

Загальні вимоги до персоналу:

до роботи допускаються особи віком від 18 років, які пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктаж з охорони праці;

тракторист та обслуговуючий персонал повинні мати посвідчення відповідної категорії;

на робочому місці обов'язково повинні бути ЗІЗ (Засоби індивідуального захисту). Обов'язкове використання спецодягу, рукавиць, а при роботі з протруєним насінням респіраторів та захисних окулярів.

Вимоги перед початком роботи:

перевірити надійність кріплення сошників, загортачів та маркерів. Усі ланцюгові та зубчасті передачі повинні бути закриті захисними кожухами;

перевірити герметичність шлангів та з'єднань, підтікання мастила неприпустиме;

перевірити справність звукової та світлової сигналізації між трактористом та сівачами (якщо конструкція передбачає їх наявність) на підніжках.

Безпека під час посіву:

категорично забороняється перебувати на рамі сівалки, підніжках або між трактором і сівалкою під час руху;

очищення сошників, висівних апаратів або загортачів від бруду чи рослинних решток слід проводити тільки при повній зупинці агрегату та

вимкненому двигуні трактора, використовуючи спеціальні чистики (лопатки), а не руки.

Заправка насінням та добривами:

використовувати механізовані заправники;

при ручній заправці ставати тільки на спеціальні стійкі платформи;

не розрівнювати насіння в бункері руками під час роботи висівного апарату.

Повороти та маневри - під час розвороту агрегату маркери та робочі органи (сошники, загортачі) мають бути підняті в транспортне положення. Швидкість на поворотах повинна бути мінімальною.

Робота з протруєним насінням та добривами:

під час роботи з протруєним насінням забороняється приймати їжу, пити воду або палити;

засипати насіння в бункери потрібно з навітряного боку, щоб пил від протруйника не потрапляв у дихальні шляхи;

невикористане протруєне насіння після зміни повинно бути здане на склад у закритій тарі.

Транспортування агрегату:

сівалка повинна бути піднята у транспортне положення та зафіксована спеціальними транспортними упорами (замками), щоб запобігти самовільному опусканню при відмові гідравліки;

габарити агрегату мають бути позначені світловідбивачами або сигнальними прапорцями;

категорично забороняється здавати трактором назад, якщо сошники та загортачі сівалки знаходяться в робочому (опущеному) положенні - це призводить до поломки техніки та створює ризик травмування через раптове руйнування металоконструкцій.

Висновки

1. В результаті проведених досліджень було теоретично обґрунтовано та розроблено конструкцію удосконаленого комбінованого загортача просапної сівалки коткового типу. Розроблена математична модель дозволила детально описати силовий баланс та кінематику взаємодії робочого органу з ґрунтом, що дало змогу оптимізувати параметри системи.

2. В конструкції нового загортача реалізовано двоетапний підхід. Завдяки розрахункам та зміні конструкції вдалося розділити процес загортання насіння на два послідовні етапи спочатку сформується навколо насіння шар вологого ґрунту, а вже потім борозна засипається сухішими верхніми шарами.

3. Розроблено математичний апарат та отримані рівняння для визначення раціонального кута розхилу конуса шини, діаметрів диска і шини, а також епюр розподілу напружень, що дозволяє проектувати загортачі під конкретні агротехнічні вимоги.

4. Запропонована конструкція має низку переваг, які безпосередньо усувають більшість недоліків, властивих існуючим рішенням. Диски загортача встановлені безпосередньо за сошником, що унеможливорює потрапляння сухого поверхневого більш сухого шару ґрунту в борозну. Завдяки цьому нижні, більш вологі шари спрямовуються під робочу поверхню загортача, забезпечуючи якісне укриття насіння вологим шаром ґрунту. Геометрія шини загортача створює підвищене ущільнення ґрунту з боків насінини при одночасному зменшенні тиску над нею. Шина атмосферного тиску зі змінною товщиною стінок має здатність деформуватися під дією надмірного навантаження, створюючи ефект демпфування, що забезпечує рівномірний розподіл тиску і покращує її самоочищення.

5. Отримані результати підтверджують доцільність і перспективність використання модернізованих загортачів коткового типу в конструкціях сучасних просапних сівалок з метою забезпечення стабільного та високоякісного загортання насіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сівалка пневматична точного висіву VENZA-8 (анкерна). URL: <https://favorit.ltd/products/pneumatyczny-siewnik-punktowy-venza-8-kotwica>
2. Лихочвор В.В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур. Львів: НВФ «Українські технології», 2002. 800с.
3. Рослинництво: Підручник / О.І. Зінченко, В.Н. Салатенко, М.А. Білоножко; За ред. О.І. Зінченка. – К.: Аграрна освіта, 2001. – 591с.
4. Технологічні карти та витрати на вирощування сільськогосподарських культур з різним ресурсним забезпеченням /за ред. Д.І. Мазоренка, Г.Є. Мазнева. Харків: ХНТУСГ. 2006. 725 с.
5. Петров П.В., Посполітак Т.Є., Юркевич Є.О. Агротехнологія і технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур: навч. посіб. К.: Аграрна освіта, 2009. 268 с.
6. Проектування технологій та розрахунок витрат на вирощування сільськогосподарських культур. Навчальний посібник /за ред. Г.Є. Мазнева. Харків: «Майдан». 2009. 257 с.
7. Сівалка Gaspardo SP. URL: https://www.maschiogaspardo.com/uk_uk/st-stella.html
8. Сівалка Vesta 8. Каталог продукції Elvorti. URL: <https://elvorti.com/catalog/sivalki-prosapni/vesta-8-profi.html?lang=ua>
9. Сівалка Monosem NC Classic. URL: <https://ua.monosem.com/sivalky-tochnoho-vysivu/nc.html>
10. Kuhn сівалка Planter 3. URL: <https://www.kuhn.com/en>
11. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії і розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – С. 141 – 142. URL: <https://studfiles.net/preview/5063474/page:25/>
12. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Том 1, частина 2. Машини для сівби та садіння. – Харків: Око, 2002. – 452 с.

13. Сисолін П.В. та інш. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування, Кн. 1: Машини для рільництва / П.В. Сисолін, В.М. Сало, В.М. Кропівний – К.: Урожай, 2001. – 384 с.
14. Артеменко Д.Ю., Онопа В.А., Скриннік С.С. Обґрунтування конструкції комбінованого прикочуючого котка просапної сівалки. Scientific Journal «ScienceRise» №11 (28) 2016. – С. 25-29. URL: <http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/80814>
15. Артеменко Д.Ю., Настоящий В.А. Обґрунтування робочої поверхні конусного прикочуючого котка просапної сівалки. Scientific Journal «ScienceRise». №5/2(34)2017. – С. 18-22. URL: <http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/101960>
16. Кушнар'ов А.С. Механіко – технологічні основи обробітку ґрунту / А.С. Кушнар'ов, В.І. Кочев. – К.: Урожай, 1989. – 144 с.
17. Артеменко Д.Ю., Магопєць О.С., Ауліна Т.М., Семенова Д.А. Результати експериментальних досліджень розподілу полів деформацій в ґрунті від дії прикочуючих котків бурякових сівалок. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / КНТУ, 2007, випуск 37, 1 – С. 286 – 290.
18. Артеменко Д.Ю. Теоретичне дослідження процесу взаємодії конусного котка просапної сівалки з ґрунтом. Вісник аграрної науки Причорномор'я: науково-теоретичний фаховий журнал / В. С. Шебанін (гол. ред.) та ін. – Миколаїв, 2012. Вип. 1 (65). – С. 171 – 177.
19. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / Л.М. Шутенко, О.Г. Рудь, О.В. Кічаєва та ін.; за ред. Л.М. Шутенка; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекєтова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекєтова, 2017. – 563 с.
20. Павлицє В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В.Т. Павлицє. – Львів: Афiша, 2003. – 560 с.

21. Гандзюк М.П. Основи охорони праці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / М.П. Гандзюк, Є.П. Желібо, М.О. Халімовський. За редакцією М.П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2003. – 408с.
22. ДСТУ 7239:2011. Засоби індивідуального захисту. http://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2011/09/dstu_7239_2011.pdf
23. ДСТУ 2867-94. Державний стандарт України. Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. https://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY3/dsty_2867-94.pdf
24. СП 4282-87. Санітарні правила по устрою тракторів та сільськогосподарських машин. https://dnaop.com/html/57502/doc-%D0%A1%D0%9F_4282-87
25. ДСТУ 2189-93. Система стандартів безпеки праці. Машина сільськогосподарські навісні та причіпні. Загальні вимоги безпеки. Київ, 1994. – 25 с.
26. ГОСТ 25942-90. Трактори і сільськогосподарські машини. Пристрої швидковідєднуючі. Вимоги до конструкції. http://www.leonorm.lviv.ua/p/DG/CND2015_2.HTM
27. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник / В.Ц. Жидецький – Львів: Афіша, 2002.– 320 с.