

Центральноукраїнський національний технічний університет

ЦЗДО

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2025 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

«Механізація вирощування соняшнику з обґрунтуванням конструкції і параметрів комбінованого агрегату для безполицевого обробітку ґрунту»

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу,
групи АІ-24МЗ

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності Н7 «Агроінженерія»

_____ Михайлова Дарія Олександрівна

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Сергій ЛЕЩЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Іван ВАСИЛЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра Сільськогосподарського машинобудування
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
Галузь знань Н7 «Сільське, лісове, рибне господарство та ветеринарна медицина»
Спеціальність Н7 «Агроінженерія»
Освітньо-професійна програма «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ**

«___» _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Михайловій Дарії Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Механізація вирощування соняшнику з обґрунтуванням конструкції і параметрів комбінованого агрегату для безпліцевого обробітку ґрунту
2. Керівник роботи (проекту) Лещенко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання роботи до захисту 20.12.2025 р.
4. Мета та завдання дипломної роботи _____

5. Перелік ілюстративного матеріалу _____

Анотація

**Тема: «Механізація вирощування соняшнику з обґрунтуванням конструкції і параметрів комбінованого агрегату для безполицевого обробітку ґрунту»
безполицевий обробіток ґрунту, комбінований ґрунтообробний агрегат, робочий орган глибокорозпушувача**

Україна стабільно входить до трійки світових лідерів за виробництвом соняшнику та посідає перше місце за експортом соняшникової олії, що підкреслює актуальність удосконалення технологій вирощування цієї культури. Нині в інтенсивних технологіях спостерігаються негативні наслідки надмірного використання полицевої оранки, зниження родючості ґрунтів, руйнування структури орного шару та накопичення рослинних решток, що обумовлює необхідність переходу до ґрунтозахисних способів обробітку.

Метою роботи є підвищення ефективності вирощування соняшнику шляхом удосконалення технології основного обробітку ґрунту та обґрунтування конструкції і параметрів комбінованого агрегату для глибокого безполицевого розпушування. У науковій частині проведено аналітичні дослідження, які доводять доцільність застосування долота криволінійної увігнуто-опуклої форми. Така конфігурація забезпечує оптимальний розподіл контактних навантажень, формує рівномірне сколювання ґрунту за параболічною траєкторією та знижує енергоємність процесу завдяки ефекту Баушингера. У результаті долото вдосконаленої геометрії сприяє формуванню однорідних структурних агрегатів і підвищенню якості розпушування.

Результати дослідження підтверджують працездатність модернізованої конструкції та її доцільність для впровадження у виробництво, що забезпечує реалізацію ґрунтозахисної системи землеробства та оптимізацію енергозатрат основного обробітку ґрунту.

Abstract

**Topic: «Mechanization of Sunflower Cultivation with the Substantiation of the Design and Parameters of a Combined Unit for Moldboardless Tillage»
non-moldboard tillage, combined soil-cultivating implement, deep loosener working element**

Ukraine is consistently among the top three global leaders in sunflower production and ranks first in sunflower oil export, which emphasizes the relevance of improving technologies for cultivating this crop. Currently, intensive technologies exhibit negative consequences from the excessive use of moldboard plowing, such as reduced soil fertility, destruction of the arable layer structure, and accumulation of plant residues, necessitating a transition to soil-protective tillage methods.

The objective of the work is to increase the efficiency of sunflower cultivation by improving the main tillage technology and substantiating the design and parameters of a combined unit for deep moldboardless loosening. In the scientific part, analytical studies were conducted proving the feasibility of using a chisel with a curvilinear concave-convex shape. This configuration ensures the optimal distribution of contact loads, forms uniform soil shear along a parabolic trajectory, and reduces the energy consumption of the process due to the Bauschinger effect. As a result, the chisel of improved geometry contributes to the formation of homogeneous structural aggregates and enhances the quality of loosening.

The research results confirm the operability of the modernized design and its expediency for implementation in production, which ensures the realization of a soil-protective farming system and the optimization of energy inputs for main tillage.

Зміст

1. Вступ.....	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень	7
3. Наукова частина.....	34
4. Практична реалізація результатів досліджень.....	48
5. Охорона праці	57
6. Висновок.....	59
Список використаної літератури.....	60
Додатки.....	63

1. Вступ

Аграрний сектор нашої держави відзначається потужним потенціалом та прогресуючою диверсифікацією виробництва, що забезпечує зростання обсягів продукції та географічне розширення ринків збуту. Динамічне збільшення посівних площ соняшнику є показовим прикладом цієї тенденції. У останній період країна входить до трійки найбільших світових виробників олійної сировини та займає перше місце за експортом соняшникової олії на міжнародному ринку.

Разом із позитивними тенденціями збільшення обсягів виробництва соняшнику існує низка негативних аспектів. Серед основних: інтенсивне виснаження обґрунтованого родового потенціалу через мінімізацію або ігнорування звозмінних систем і культивування соняшника як монокультури для отримання стабільних високих доходів; деградація структури орного горизонту внаслідок використання важких енергоємних машинно-тракторних агрегатів в інтенсивних технологічних системах; накопичення великої маси грубостеблових рослинних залишків на поверхні поля та у верхньому обґрунтованому шарі, що створює перешкоди для реалізації наступних технологічних процесів. Виходячи з цього, питання підвищення ефективності вирощування соняшнику, вдосконалення існуючих технологій та адаптація машин і знарядь, що використовуються для інтенсивної технології вирощування соняшнику до дійсних умов виробництва є актуальним, а комплексне і ефективне вирішення цього питання дозволить забезпечити вирощування стабільного врожаю за умов забезпечення родючості ґрунтів і для вирощування інших культур в сівозміні.

Одним із критичних елементів типових технологій вирощування польових культур, зокрема соняшнику, є система основного обробітку. Переважна більшість господарств Кіровоградської області перший глибокий обробіток роблять за рахунок полицевої оранки, що в результаті посилюють інтенсивність еродованих процесів (вітрової та водної ерозії) і виступають

домінуючим чинником деградації ґрунтового покриву, що зумовлює різке зниження продуктивності посівів у регіоні.

У процесі виконання цієї магістерської кваліфікаційної роботи здійснюється спроба вдосконалити технологію вирощування соняшнику, що використовується в базовому господарстві, а також провести дослідження та обґрунтувати оптимальні параметри глибокорозпушувача, який застосовується під час основного обробітку ґрунту з урахуванням збереження його родючості та зменшення загальних енерговитрат на технологічний процес.

2. Стан досліджуваного питання та вибір напряму досліджень

2.1. Загальна інформація про вирощування соняшнику. Потенціал вирощування цієї культури в Україні

Соняшник є найважливішою олійною культурою України, що дає значні та надійні прибутки, а тому його вирощування займає одне із провідних місць серед продукції рослинництва. Зібране насіння соняшнику володіє високою жирністю, яка подекуди сягає 50...52% [1...3]. Порівняльний аналіз олійних культур, що вирощуються в Україні, свідчить про те, що соняшник характеризується найвищою олієпродуктивністю з гектара – в середньому 750 кг/га. Наявність відповідних обґрунтовано-кліматичних умов у поєднанні з впровадженням раціональних технологій культивування забезпечують стабільну високу врожайність соняшника. Це зумовлює його домінуюче положення за показниками посівних площ та валового збору. Логічним наслідком є той факт, що соняшникова олія становить приблизно 98% загального виробництва рослинних олій.

Як зазначалось раніше, переоцінити значення рослинництва, як провідної галузі економіки України, дуже важко. Статистичні дані [1] свідчать, що агропромисловий комплекс України використовує приблизно 90% орних земель, до 50% водних ресурсів та залучає близько 30% працездатного населення країни. Попри те, що українські чорноземи визнані еталонними, їх стан поступово знижується: через деградацію обґрунтованої структури, переущільнення, порушення водно-повітряного режиму, зменшення вмісту органічних речовин та гумусу. Ці процеси негативно впливають на родючість і призводять до зниження врожайності сільськогосподарських культур, зокрема соняшнику. Подолання цих негативних процесів потребує реалізації комплексу заходів, спрямованих на раціональне землекористування, впровадження науково обґрунтованих сортів, оптимізацію системи покращення з оптимальним застосуванням органічних добрив. Виходячи з вище наведеного, удосконалення

агротехнологій вирощування польових культур, включаючи соняшник, є пріоритетним завданням сучасного землеробства. Впровадження інноваційних агротехнічних рішень, спрямованих на уповільнення деградаційних процесів у чорноземах та ініціювання відновлення їхньої родючості, є стратегічним пріоритетом для аграрних підприємств, незалежних від їх масштабів та організаційно-правових форм господаря.

Біологічні та морфологічні ознаки соняшнику та базова технологія його вирощування у господарських умовах

Соняшник [1...8] є однією з ключових олійних культур агропромислового комплексу України. Таксономічно вид *Helianthus annuus* L., що належить до родини Asteraceae, представлений двома біологічними формами, які відрізняються за морфологічними характеристиками: окультурений соняшник (*Helianthus cultus* Wenzl) та його дикорослий аналог (*Helianthus ruderalis* Wenzl). Культурна форма представлена сортовим різноманіттям, що вирощується за інтенсивними технологіями у виробничих умовах із застосуванням комплексу регламентованих агротехнічних заходів. Натомість дикорослі форми соняшнику переважно поширені за межами Європейського регіону, характеризуються спонтанним неконтрольованим розвитком, а їхня біомаса не становить комерційного інтересу для промислової переробки.

Культурний соняшник (*Helianthus cultus* Wenzl) є однорічною самоцвітною рослиною (рис. 1). Коренева система соняшнику – стрижнева, яка може проникати в товщу ґрунту на глибину до 4 м та зазвичай інтенсивно розповсюджується в сторони від стебла на відстань до 120 см. Структурні та функціональні особливості кореневої системи забезпечують високу адаптивність соняшнику до посушливих умов вирощування, демонструючи стабільну продуктивність у регіонах з обмеженим водозабезпеченням, зокрема в Південному Степу України.



Рис. 1. Загальний вигляд та біологічні особливості соняшнику

Стебло культурного соняшнику – прямостояче, високе, міцне, має дерев'янисту структуру та є нерозгалуженим. В середині порожнина стебла заповнена пухкою серцевиною. Висота стебла у районуваних сортів соняшнику олійного напрямку становить 0,6...2,5 м, тоді як у силосних форм цей показник може досягати 3...4 м.

Листковий апарат соняшнику (рис. 1) утворений великими листками еліпсоподібної форми з зубчастим краєм, які прикріплюються до стебла довгими черешками. Кількість листків на рослині визначається сортовими особливостями та групою стиглості: скоростиглі сорти формують 15...25 листків, пізньостиглі – можуть досягати 35 штук.

Генеративний орган соняшнику (рис. 2) представлений суцвіттям-кошиком, яке має форму сплющеного диска діаметром 10...20 см у олійних форм та 30...35 см у гризових сортів. Периферія суцвіття оточена багаторядними листковими обгортками. Структурною основою кошика є

квітколоже (рис. 2), на якому в центральній частині локалізовані трубчасті квітки, а по периметру – язичкові. Яскраво-жовті язичкові квітки виконують атрактивну функцію, приваблюючи комах-запилювачів під час цвітіння. Трубчасті квітки, кількість яких варіює від 600 до 1200 на одному суцвітті, є двостатевими і заповнюють всю площу кошика. Кожна така квітка містить одногніздову зав'язь, стовпчик і п'ятизубчастий віночок жовтого або помаранчевого кольору, зрослий з пелюстками.



Рис. 2. Морфологічні ознаки соняшнику

Біологічною особливістю соняшнику є схильність до перехресного запилення, внаслідок чого частина генеративних органів залишається незаплідненою, формуючи пусті зернівки. З метою мінімізації цього явища в технологічному процесі вирощування практикується використання

медоносних комах шляхом встановлення вуликів на посівах, що забезпечує істотне скорочення пустозерності.

Плід соняшнику представлений зернівкою, видовжено-овальної форми (рис. 2) з нечітко вираженими чотирма ребрами. Структурно зернівка складається з ядра, вкритого тонкою плівкою, та щільної лушпини, яка не з'єднана з насіниною. Колір лушпинної оболонки варіює від чорного та сірого до білого і смугастого. Показник лушпинності, який визначається як відношення маси оболонки до загальної маси насінини, знаходиться в діапазоні 22...46%. Селекційно цінними вважаються генотипи з мінімальним вмістом лушпинної фракції. Маса 1000 зернівок варіює в межах 40...125 г залежно від сортових особливостей.

Культурні форми соняшнику [8] класифікуються на три типи залежно від господарського призначення та структурних особливостей зернівок: кондитерський, олійний та проміжний. Кондитерський тип характеризується значними морфометричними параметрами: висота рослин досягає 4 м, діаметр кошика становить 25...40 см, довжина насінин варіює в межах 11...23 мм. Ядро займає менше половини внутрішнього об'єму зернівки, абсолютна маса досягає 170 г, частка лушпинної фракції становить 46...56%, вміст олії не перевищує 35%.

Олійний тип відзначається компактною висотою рослин (до 2,5 м), дрібнішими зернівками (7...13 мм), які майже повністю заповнені ядром. Маса 1000 насінин становить 35...80 г, лушпинність обмежується 25...35%, олійність досягає 38...56%. Проміжний тип поєднує морфологічні ознаки обох форм: за параметрами насіння наближається до олійного, за іншими характеристиками – до кондитерського типу.

В агропромисловому виробництві України домінують олійні типи, які поряд з високою олієпродуктивністю та низькою лушпинністю демонструють природну резистентність до соняшникової молі та вовчка.

Основною товарною продукцією переробки соняшнику є рослинна олія, що використовується в харчовій промисловості. Унікальність соняшникової олії визначається високим вмістом біологічно активної лінолевої кислоти (55...60%), яка належить до поліненасичених жирних кислот. Ця сполука стимулює метаболізм холестеринових ефірів в організмі людини, забезпечуючи позитивний фізіологічний ефект. Хімічний склад олії включає також фосфоліпіди, фітостерини та комплекс вітамінів (А, D, Е, К). Застосування соняшникової олії охоплює хлібопекарську, кондитерську галузі, консервне виробництво та кулінарію. У технічних цілях з продуктів переробки культури виготовляють лакофарбові матеріали, лінолеум, стеаринові композиції, текстильні та пакувальні матеріали. Останніми роками активно розвивається напрям утилізації побічної продукції для виробництва пелетного палива, біодизельного пального та інших енергоносіїв у секторі відновлюваної енергетики.

Таким чином, враховуючи господарську цінність соняшнику та широкий спектр використання продуктів його переробки, оптимізація агротехнологій культивування з метою забезпечення стабільної продуктивності є пріоритетним завданням сучасного рослинництва. У досліджуваному агропідприємстві застосовується традиційна система вирощування соняшнику, технологічні етапи та агрозаходи якої викладені нижче.

Вимоги до ґрунтово-кліматичних умов при вирощуванні соняшнику

Формування високої та стабільної продуктивності соняшнику потребує оптимального температурного режиму та достатнього водозабезпечення, особливо на початкових етапах розвитку рослин (рис. 3). Ґрунтово-кліматичні умови Степової та Лісостепової зон України найповніше відповідають біологічним вимогам культури для реалізації її продуктивного потенціалу. Водночас, посилення посушливості клімату, що поступово охоплює центральні регіони країни, переводить ці території до

категорії ризикованих для вирощування більшості польових культур, включаючи соняшник. Враховуючи, що саме ці регіони забезпечують основні обсяги виробництва олійної сировини, доцільним є використання районованих посухотолерантних гібридів та сортів, адаптованих до лімітуючих факторів середовища.

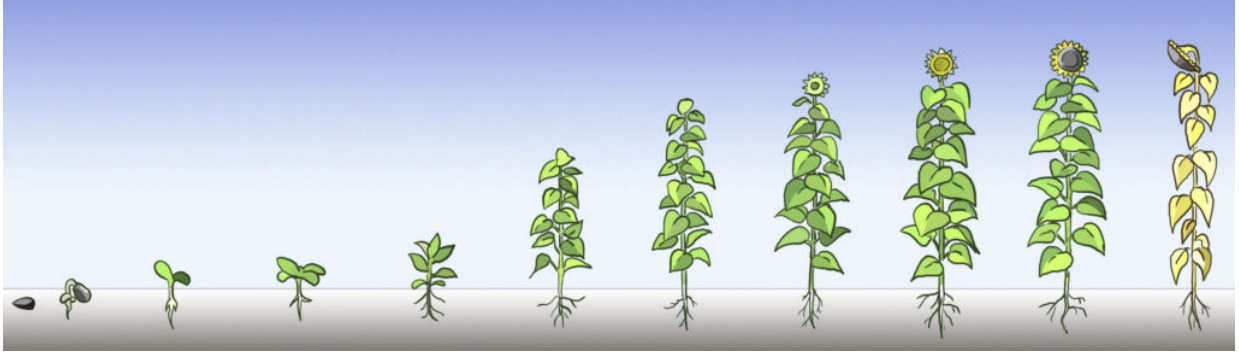


Рис. 3. Фази розвитку соняшнику

Вимоги соняшника до світла. При плануванні агротехнології вирощування соняшнику необхідно враховувати його високі вимоги до освітлення. Соняшник належить до світлолюбних культур з підвищеною потребою в сонячній радіації протягом усього періоду вегетації. Оптимальна інтенсивність освітлення є критичним фактором для нормального перебігу фотосинтетичних процесів та накопичення органічної речовини. Дефіцит сонячної радіації, особливо на ранніх фазах та тривалі періоди хмарності негативно впливають на ростові процеси та формування продуктивності культури. За умов недостатнього освітлення спостерігається витягування стебел, послаблення розвитку кореневої системи та зниження інтенсивності формування генеративних органів. Незважаючи на належність до рослин короткоденного періоду, за умов вирощування у північних областях України спостерігається значне подовження тривалості вегетації соняшнику.

Вимоги соняшника до тепла. Соняшник характеризується підвищеними тепловими вимогами протягом вегетації. Мінімальна температура для проростання насіння становить $+4...+6^{\circ}\text{C}$, проте оптимальні умови ($+15...+20^{\circ}\text{C}$) забезпечують появу сходів на 6...10 день після сівби. На

ранніх етапах розвитку рослини толерантні до короткочасних заморозків до $-5...-6^{\circ}\text{C}$. Температурний режим є визначним фактором для всіх фізіологічних процесів культури. Інтенсивність фотосинтезу, транспірації та накопичення органічної речовини прямо залежать від теплозабезпечення. Під час цвітіння оптимальна температура становить $+25...+27^{\circ}\text{C}$, тоді як підвищення до $+30^{\circ}\text{C}$ призводить до пригнічення ростових процесів. У генеративну фазу стійкість до низьких температур різко знижується – заморозки до -1°C спричиняють пошкодження або загибель квіток. Тепловий стрес негативно впливає на формування насіння, що зумовлює необхідність оптимізації строків сівби відповідно до регіональних температурних умов.

Вимоги соняшника до вологи. Попри високу посухостійкість, соняшник характеризується значним водоспоживанням протягом вегетації. Розподіл витрат вологи є нерівномірним: на період від сходів до формування суцвіть припадає близько 23% загальної потреби, фаза бутонізації-цвітіння потребує до 60%, дозрівання – 17% від сумарного водоспоживання [7, 8]. Дефіцит вологи в критичний період (формування та цвітіння кошиків) призводить до пригнічення розвитку, зменшення діаметра суцвіть та підвищення пустозерності в їх центральній частині. Потужна коренева система культури здатна залучати вологу з глибини до 3 м, частково компенсуючи дефіцит опадів. Водозабезпечення на початкових етапах онтогенезу здійснюється за рахунок верхніх шарів ґрунту, тоді як у наступні фази домінує використання вологи з горизонтів глибше 50 см. В умовах ризикованого землеробства необхідна реалізація комплексу вологозберігаючих заходів: покращення інфільтраційних характеристик ґрунту, снігозатримання або застосування зрошення для гарантованого водозабезпечення посівів.

Вимоги соняшнику до ґрунтів та поживних речовин. В Україні основні площі під соняшником зосереджені на чорноземах звичайних та каштанових ґрунтах з оптимальною реакцією середовища рН $6,0...6,8$.

Непридатними для вирощування є важкоглинисті, піщані, перезволожені ґрунти, а також солонці та ґрунти з підвищеною кислотністю [8].

Соняшник характеризується інтенсивним виносом елементів живлення, що значно перевищує показники зернових культур. Формування 1 ц насіння потребує близько 6 кг азоту, 2 кг фосфору та 10 кг калію, що відповідає співвідношенню $N:P_2O_5:K_2O = 3:1:5$. Збалансоване забезпечення поживними елементами відповідно до фаз розвитку є визначним фактором реалізації продуктивного потенціалу культури.

Існуюча технологія вирощування соняшнику у господарстві

Підготовка насіння до сівби

Для посіву необхідно використовувати сертифікований насіннєвий матеріал районованих сортів з високими показниками сортової чистоти та схожості. Обов'язковим агротехнічним заходом є передпосівне протруювання інсектофунгіцидними препаратами для захисту від патогенів та шкідників.

Проти несправжньої борошнистої роси, корневих гнилей та фомозу рекомендується застосування фунгіцидних протруйників: Оріус Універсал у нормі 1,5...2,0 л/т, Сценік Комбі – 1,5 л/т, або Ламардор – 0,15...0,2 л/т. Для контролю чисельності дротяників та інших ґрунтових шкідників доцільне використання інсектицидних протруйників: Сідопрід – 8...10 л/т, Круйзер 350 FS – 8...10 л/т, або Гаучо 600 FS – 6...8 л/т насіння.

Технологія внесення добрив

Для різних ґрунтово-кліматичних зон України розроблені диференційовані норми живлення соняшнику. У Південному Степу рекомендовані дози становлять $N_{30-60}P_{40-90}$, у Північному Степу – $N_{30-40}P_{60}$. Калійні добрива вносять лише за умови низького вмісту рухомого калію в ґрунті (менше 30 мг/100 г ґрунту).

Система удобрення соняшнику передбачає використання широкого спектру добрив. Осіннє або весняне внесення аміачної води або РКД (до 2

ц/га) позитивно впливає на продуктивність культури. Особливо ефективним є застосування органічних добрив під оранку, що забезпечує приріст врожайності до 0,2 т/га та покращує родючість ґрунту. За дефіциту органіки практикується заробка соломи попередника з компенсаційним внесенням 8...12 кг азоту на тону рослинних решток для активізації мікробіологічної діяльності.

Локально-смугове внесення мінеральних добрив ($N_{40}P_{60}$) восени або під час сівби є високоефективним агрозаходом. При використанні сівалки СУПН-8, яка розміщує добрива на відстані 2...3 см від насіння, рекомендована доза становить $N_{20}P_{30}$ для запобігання пригнічення схожості.

Підживлення $N_{20}P_{30}$ під час першого міжрядного обробітку за достатнього зволоження забезпечує приріст врожайності до 0,26 т/га. Необхідність кореневого чи позакореневого підживлення визначається за вмістом фосфору в рослинах – за показника нижче 0,8% вносять $N_{20}P_{30}$. Позакореневе підживлення доцільне у фазі 5...6 пар листків з використанням КАС-28, РКД-10-34 або мікроелементних препаратів

Технологія обробітку ґрунту

Технологія обробітку ґрунту під соняшник визначається типом попередника, фітосанітарним станом та рівнем засміченості поля. На полях з високою забур'яненістю коренепаростками видами необхідне проведення виснажливих заходів. Ефективним прийомом є багаторазове підрізання відростаючих бур'янів після збирання попередньої культури з наступною гербіцидною обробкою за 10...15 днів до основного обробітку препаратами: Раундап Макс (3 - 4 л/га) або Тотал 480 SL (4 - 6 л/га).

З урахуванням складного рельєфу значної частини полів, основний обробіток здійснюється глибокорозпушувачем ПЧ-4,5 на глибину до 40...45 см із поступовим поглибленням обробітку. За безполицевої системи обробітку необхідна інтенсифікація хімічного захисту посівів від бур'янів, патогенів та шкідників через загострення фітосанітарної ситуації.

Весняний період агротехнічних робіт розпочинається з боронування важкими боронами або волокушами перпендикулярно або під кутом до напрямку осіннього обробітку для збереження вологи. На полях з нерівною поверхнею проводять першу культивуацію КПС-4 на глибину 10...12 см. Друга суцільна культивуація виконується за кілька днів до сівби, після масового проростання бур'янів, на глибину 6...8 см з одночасним боронуванням БЗСС-1,0 для вирівнювання поверхні.

Технологія посіву соняшнику

Сівбу соняшнику здійснюють виключно якісним, каліброваним та протруєним насіннєвим матеріалом районованих сортів і гібридів, адаптованих до регіональних агрокліматичних умов. Надмірно ранні строки сівби є недоцільними через підвищені температурні вимоги культури. Оптимальний календарний період сівби становить 15 квітня – 10 травня, проте може варіювати залежно від метеорологічних умов року. У господарстві вирощуються районовані олійні генотипи різних груп стиглості: середньостиглі – Тунка, Форвард; ранньостиглі – Хайсан, Трістан; ультраранній – Флеш.

У процесі висіву соняшнику застосовується пунктирний спосіб із шириною міжрядь 70 см. Оптимальна норма висіву становить 30–45 тисяч насінин на гектар, що дорівнює приблизно 8–10 кг/га [7]. За сприятливих ґрунтових умов насіння загортають на глибину 6–7 см, а на важких або перезволожених ділянках цей показник зменшують до 4–5 см. Посів здійснюють за допомогою сівалки марки СУПН-8.

Технологія догляду за посівами соняшнику у господарстві

Першою операцією для догляду за посівами соняшнику є коткування, при якій застосовують кільчасто-шпорові котки. Наступним етапом є боротьба з бур'янами на стадії "білої ниточки", проводять її через 5–6 днів після посіву. Для цього використовують середні зубові борони,

обробляючи поле упоперек або по діагоналі до рядків. Глибина роботи зубів не повинна перевищувати 5 см, щоб уникнути пошкодження насіння соняшнику. За необхідності, якщо на полі утворилася щільна поверхнева кірка після опадів або з'явилися численні сходи бур'янів, проводять післясходове боронування. Цю операцію виконують на стадії 1–3 пар листків у рослин. Її проводять на низькій швидкості — до 4 км/год, також упоперек рядків, і не раніше 11 години дня. У цей час тургор рослин є достатнім, що зменшує ризик їхнього пошкодження. За умови правильного виконання післясходового боронування ефективність знищення бур'янів сягає 80–90 %, а рівень пошкодження культурних рослин не перевищує 10 %.

Протягом вегетації соняшнику проводять дві міжрядні обробітки за допомогою культиватора КРН-4,2. Глибина обробітки складає 6–8 см. Виконання цих операцій на підвищених швидкостях сприяє частковому присипанню бур'янів у зоні рядка, що дозволяє ефективніше контролювати їхнє розповсюдження та зменшує конкуренцію з культурними рослинами.

Окрім механічного видалення бур'янів, застосовується хімічний метод із використанням гербіцидів, таких як «Раундап», «Основа», «Оскар Пауер» тощо. Для протидії захворюванням культури використовують фунгіциди – «Карбезим», «Амістар Екстра СК», «Хорус» та інші. Захист від шкідників здійснюють за допомогою інсектицидних препаратів, серед яких «Енжио» та «Піринекс Супер».

Істотно підвищити ефективність запилення соняшнику дозволяє розміщення на полях бджолиних сімей. Рекомендована норма становить 1–1,5 вулика на гектар посіву. Цей агротехнічний прийом не тільки зменшує частку невиповненого насіння, але й за сприятливих умов може забезпечити додаткове збільшення врожайності на 2–4%.

Збирання врожаю

Для вирівнювання стиглості соняшнику при нерівномірному дозріванні застосовують десиканти, такі як «Альфа Диквад» та «Макс». Ця

процедура дає змогу прискорити збирання врожаю на 7-8 днів і провести його в оптимальний період, коли насіння досягло максимальної олійності.

За кілька днів до початку збирання поле підготовляють: виконують обкошування та розмітку на загінки. Для прибирання використовують комбайни марок «Лан» і «John Deere», які здійснюють збирання та обмолот кошиків, одночасно подрібнюючи стебла і розподіляють їх по полю.

Після збирання насіння очищають на зерноочисних машинах типу ЗАВ, знижуючи вологість до 12%. Для довготривалого зберігання вологість насіння має бути ще нижчою - не більше 7-8%.

Вдосконалення технології вирощування соняшнику

На Кіровоградщині традиційна система обробітку ґрунту досі переважно базується на глибокій полицевій оранці. Однак цей метод має низку суттєвих недоліків: він є енергоємним, підвищує ризик ерозійних процесів, призводить до ущільнення ґрунтового профілю, зниження родючості та втрати ґрунтової структури [9...15]. У відповідь на ці виклики, частина аграрних підприємств області почала перехід на ресурсозберігаючі технології, орієнтуючись на наукові розробки та світовий досвід. Замість класичної оранки вони впроваджують глибоке розпушування, що є основою для ґрунтозахисного та енергоефективного землеробства. Саме в цьому напрямку запропоновано вдосконалити технологію вирощування соняшнику і в базовому господарстві, що дозволить зменшити негативний вплив на ґрунти та підвищити ефективність виробництва.

Дослідники та аграрії, які застосовують чизельні робочі органи — основні елементи більшості глибокорозпушувачів, відзначають два ключові їхні недоліки [14...15]. По-перше, під час обробітку на дні борозни утворюються характерні зубці, що унеможлиблює отримання рівної поверхні без залучення додаткових робочих органів. По-друге, чизельні лапи не забезпечують повного підрізання рослинних решток.

Разом з тим, важливо враховувати й значні переваги цього методу. Глибокорозпушувачі ефективно руйнують ущільнену підшву, що відновлює інфільтрацію вологи в глибокі шари ґрунту та створює її резерв для рослин упродовж вегетації. Використання таких знарядь також зменшує прояви ерозії, запобігає деградації структури ґрунту, зберігає ґрунтову біоту і, як результат, сприяє відновленню родючості. Крім того, глибокий обробіток ґрунту розпушувачами відрізняється найменшими енерговитратами порівняно з іншими видами основного обробітку [10].

Незважаючи на загальноприйняті агротехнічні переваги глибокого розпушування ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур, включаючи соняшник, існують суттєві обмеження для його широкого впровадження. Одним із ключових бар'єрів, окрім високої вартості спеціалізованої техніки, є низький рівень культури землеробства, що проявляється у сильній забур'яненості полів. Ця проблема традиційно вирішується за допомогою обертання пласта, що робить перехід на безполицевий обробіток складним.

Додатковими складнощами є технологічна несумісність: ринок переважно представлений імпортними розпушувачами, які погано агрегуються з вітчизняними тракторами та не завжди адаптовані до місцевих ґрунтово-кліматичних умов. Водночас доступні вітчизняні машини, такі як глибокорозпушувач ПЧ-4,5, потребують подальшого вдосконалення для підвищення якості обробітку та зниження енерговитрат, що і становить предмет даного дослідження.

Агротехнічні вимоги до глибокого розпушування ґрунту

Для реалізації глибокого безполицейного обробітку критичним параметром, який потребує систематичного моніторингу, є глибина розпушування та її стабільність по всій робочій ширині агрегату. Допустимість відхилення від заданої глибини не повинна перевищувати ± 1 см. Після виконання операції доцільним є максимальне збереження кількості

стерньових залишків на поверхні, що забезпечує зниження втрати вологи через випаровування та ефективний захист від дефляційних процесів.

Якість виконання агротехнічної операції регламентується нормативними показниками. Фактична глибина обробітку не може бути відхилена від заданої більш ніж на 10 %. Аналогічні вимоги висуваються до однорідності заглиблення по всій обробленій площі. Для збереження ґрунтового покриву та мікрокліматичних умов необхідно залишити на поверхні не менше 85 % первинної маси стерні. Водночас має забезпечуватися повне підрізання всіх вегетуючих бур'янів. Технологічні стандарти також встановлюють вимоги до прямолінійності траєкторії руху агрегату з допустимим відхиленням до ± 20 см. Після завершення глибокого розпушування нерівності рельєфу (висоти горбів і глибини зменшення) не потрібно перевищувати 5 см.

Проведення глибокого безполицевого обробітку доцільно лише за достатнього зволоження, коли забезпечується ефективна дезагрегацію великих обґрунтованих фракцій без утворення значної грудкуватості та нерівностей поверхні. Технологічна швидкість операції становить до 12 км/год.

Агротехнічні норми вимагають корекції одночасно під час виконання робіт відповідно до конкретних умов: попередник в сівозміні, агрокліматичних особливостей зони, наявного машинного парку та кваліфікаційного рівня механізаторів. Така адаптація максимізує ефективність технології в умовах виробництва.

Комплектування агрегату для основного безполицевого обробітку ґрунту,
його обслуговування і підготовка до роботи

На підставі наявності в технічному парку господарства чизельних плугів-глибокорозпушувачів типу ПЧ, для основного обробітку ґрунту під соняшник пропонується використовувати агрегат, сформований з трактора Т-150К та розпушувача ПЧ-4,5.

Підготовка машинно-тракторного агрегату до роботи здійснюється відповідно до загальноприйнятих вимог [16...20] і включає послідовне виконання таких етапів: окрема підготовка трактора та сільськогосподарської машини, їх з'єднання в єдиний агрегат, налаштування робочих параметрів, оцінка якості роботи під час контрольного проїзду та, за необхідності, корегування налаштувань. Важливим елементом є також щозмінне техніко-технологічне обслуговування. При комплектуванні агрегату необхідно досягти максимального використання тягового потенціалу трактора, але отримана продуктивність повинна відповідати мінімальним значенням, встановленим виробником техніки.

Для коректного налаштування чизельного глибокорозпушувача необхідно виконати послідовність робіт: зібрати конструкцію згідно з інструкцією з експлуатації, навісити машину на трактор, виконати попереднє регулювання агрегату. Це регулювання включає розстановку та налаштування основних і допоміжних робочих органів, встановлення потрібної глибини обробітку, регулювання висоти рами над рівнем поля, усунення перекосів рами та перевірку функціонування всіх обертових робочих елементів.

Під час першого робочого проходу агрегату в польових умовах здійснюється моніторинг якості виконаної роботи та продуктивності. Отримані показники порівнюються з агротехнічними вимогами, і за наявності відхилень проводяться додаткові корегувальні налаштування безпосередньо на місці.

Обґрунтування кінематичних параметрів і режимів роботи глибокорозпушувача

Для визначення технологічних параметрів та робочих режимів обробного агрегату на складі трактора Т-150К та глибокорозпушувача ПЧ-4,5 необхідно встановити вихідні дані та провести обчислення за стандартизованою методикою [16...25]. При виконанні розрахунків слід

вважати, що тривалість виконання операцій безполицевого обробітку в межах окремого поля або господарства повинна бути обмежена і становити не більше 10 календарних днів [17].

На основі довідкових матеріалів [17] та можливих агротехнічних вимог, з урахуванням маневрових показників та прохідності сформованого агрегату, визначено оптимальний параметр робочих швидкостей $V_{дон} = 7...10$ км/год. Трактор Т-150К забезпечує даний режим роботи на 2-й і 3-й передачах [22], де реальна швидкість руху корелюється з такими значеннями номінального тягового зусилля:

$$\begin{aligned} V_t^{II} &= 8,53 \text{ км/год}; & P_{зак}^{nII} &= 33,2 \text{ кН}; \\ V_t^{III} &= 10,08 \text{ км/год}; & P_{зак}^{nIII} &= 28,4 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Враховуючи умови експлуатації трактора, необхідно встановити фактичні зусилля тяги, що генеруються під час роботи на відповідних передачах:

$$P_{зак} = P_{зак}^n - G_{тр} \cdot i,$$

де $P_{зак}^n$ – номінальне тягове зусилля, що розвивається на гаку трактора і яке прийнято за довідниковими даними [22] і для обраних передач становить відповідно, $P_{зак}^{nII} = 33,2$ кН, $P_{зак}^{nIII} = 28,4$ кН;

$G_{тр}$ – сила ваги трактора, яка для трактора Т-150К [21] складає $G_{тр} = 76$ кН;

i – коефіцієнт, що враховує дійсне значення величини спуску чи підйому, який має подаватися в долях одиниці, так для розрахунків приймаємо $i = 0,03$.

Використовуючи наведену вище формулу з фактичними значеннями, для вибраних передач маємо:

$$\begin{aligned} P_{зак}^{II} &= 33,2 - 76 \cdot 0,03 = 30,92 \text{ кН}; \\ P_{зак}^{III} &= 28,4 - 76 \cdot 0,03 = 26,12 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Розрахунковим шляхом визначимо граничну робочу ширину ґрунтообробного агрегату, враховуючи фактичні зусилля тяги для вибраних передач. Максимальна ширина захвату за зазначеними параметрами окремо за формулою:

$$B_{\max}^n = \frac{P_{\text{зак}}}{K_v \cdot a + R_i},$$

де K_v – питомий опір ґрунту який повинен враховувати поправку на швидкість проведення глибокого розпушування. Значення цього опору шукається за наступною емпіричною залежністю:

$$K_v = K_0 \cdot \left[1 + 0,006 \cdot (V_p^2 - V_0^2) \right],$$

де K_0 – питомий опір ґрунту з врахуванням початкової робочої швидкості $V_0 = 5$ км/год, за даними, наведеними в [25] за таких умов $K_0 = 8$ кН/м;

V_p – робоча швидкість руху ґрунтообробного агрегату в польових умовах, яку можна знайти наступним чином, км/год:

$$V_p = V_m \cdot \left(1 - \frac{\delta}{100} \right),$$

де V_m – довідникове значення теоретичної швидкості руху трактора для конкретної обраної передачі, що наведено вище, км/год;

δ – довідникове значення коефіцієнту пробуксовування приводних коліс трактора, який за даними наведеними в [18] для трактора Т-150К дорівнює $\delta = 12\%$

$$V_p^{\text{II}} = 8,53 \cdot \left(1 - \frac{12}{100} \right) = 7,5 \text{ км/год};$$

$$V_p^{\text{III}} = 10,08 \cdot \left(1 - \frac{12}{100} \right) = 8,9 \text{ км/год}.$$

Зважаючи на проведені розрахунки та аналіз довідкових даних, розрахункове значення питомого опору ґрунту при роботі на обраних передачах складає:

$$K_v^{II} = 8 \cdot [1 + 0,006 \cdot (7,5 - 5)] = 8,12 \text{ кН/м}^2;$$

$$K_v^{III} = 8 \cdot [1 + 0,006 \cdot (8,9 - 5)] = 8,19 \text{ кН/м}^2.$$

Згідно з методичними рекомендаціями, необхідно визначити додатковий опір ґрунту, який виникає під час руху агрегату (трактор із глибокорозпушувачем) на підйом. Цю величину можна розрахувати за такою формулою:

$$R_i = \frac{G_m \cdot i}{B_k},$$

де G_m – встановлена заводом-виробником вага глибокорозпушувача в скомплектованому і готовому до роботи вигляді, кН. Для агрегату ПЧ-4,5 до проведення певних вдосконалень $G_m = 4,2$ кН/м, після проведення вдосконалень, які наведені в наступному розділі вага вдосконаленого ґрунтообробного агрегату становить $G_m = 3,9$ кН/м.;

B_k – ширина захвату чизельного глибокорозпушувача за інструкцією по експлуатації, м. Так для серійної машини ПЧ-4,5, конструктивна ширина захвату становить $B_k = 4,1$ м., після проведення модернізацій конструктивна ширина захвату глибокорозпушувача буде складати $B_k = 4,5$ м.

Отже, згідно з наведеним алгоритмом, виконаємо розрахунок додаткового опору ґрунтообробного агрегату до впровадження вдосконалень:

$$R_i = \frac{4,2 \cdot 0,03}{4,1} = 0,03 \text{ кН.}$$

Після проведення вдосконалень, додатковий опір глибокорозпушувача складає:

$$R_i = \frac{3,9 \cdot 0,03}{4,5} = 0,026 \text{ кН.}$$

Враховуючи отримані раніше результати, визначимо гранично допустиму ширину захвату агрегату до модернізації конструкції розпушувача для різних передач трактора:

$$B_{\max}^{II} = \frac{30,92}{8,12 + 0,03} = 3,79 \text{ м;}$$

$$B_{\max}^{III} = \frac{26,12}{8,19 + 0,03} = 3,18 \text{ м.}$$

За аналогічним алгоритмом визначаємо гранично допустиму ширину захвату агрегату для основних робочих передач після впровадження конструктивних удосконалень глибокорозпушувача:

$$B_{\max}^{II} = \frac{30,92}{8,12 + 0,026} = 4,79 \text{ м;}$$

$$B_{\max}^{III} = \frac{26,12}{8,19 + 0,026} = 4,1 \text{ м.}$$

Для подальшого визначення раціональних параметрів роботи ґрунтообробного потрібно розрахувати тяговий опір за формулою:

$$R_{agr} = (K_v + R_i) \cdot B_k \cdot n_k.$$

Використовуючи вказану математичну залежність, визначимо величину тягового опору глибокорозпушувача під час експлуатації на обраних передачах до модернізації його конструкції:

$$R_{agr}^{II} = (8,12 + 0,03) \cdot 4,1 \cdot 1 = 23,41 \text{ кН;}$$

$$R_{agr}^{III} = (8,19 + 0,03) \cdot 4,1 \cdot 1 = 26,7 \text{ кН.}$$

Аналогічним чином знайдемо тяговий опір для тих-же передач, після проведення вдосконалення:

$$R_{agr}^{II} = (8,12 + 0,026) \cdot 4,5 \cdot 1 = 24,66 \text{ кН;}$$

$$R_{agr}^{III} = (8,19 + 0,026) \cdot 4,5 \cdot 1 = 24,97 \text{ кН.}$$

Для оцінки ефективності використання потужності трактора під час ґрунтообробних операцій доцільно застосувати класичну формулу [23] коефіцієнта використання тягового зусилля:

$$\eta = \frac{R_{agr}}{P_{зак}}.$$

Цей параметр розраховується для основних робочих передач у двох варіантах: для базової конфігурації глибокорозпушувача та після впровадження конструктивних поліпшень.

До вдосконалення:

$$\eta^{II} = \frac{23,41}{30,92} = 0,75;$$

$$\eta^{III} = \frac{26,7}{26,12} = 1,02.$$

Після проведення вдосконалень:

$$\eta^{II} = \frac{24,66}{30,92} = 0,8;$$

$$\eta^{III} = \frac{24,97}{26,12} = 0,96.$$

Проведений аналіз розрахунків дозволяє визначити оптимальний режим роботи. Найефективнішим за використання тягового зусилля є механіко-тракторний агрегат (МТА), сформований з трактора Т-150К та модернізованого глибокорозпушувача, що працює на III робочій передачі. Саме в цій конфігурації коефіцієнт використання тягового зусилля наближається до одиниці, що свідчить про високий рівень енергетичної ефективності.

Важливо відзначити, що для базової версії розпушувача на III передачі значення цього коефіцієнта перевищує одиницю, що робить роботу

агрегату в такому режимі неможливою через перевантаження двигуна. Тому для немодернізованого обладнання необхідно застосовувати лише II робочу передачу, що забезпечує допустиме навантаження.

З точки зору оцінки продуктивності роботи ґрунтообробного агрегату потрібно визначити змінну продуктивність

$$W_{зм} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot T_p,$$

де B_p – робоча ширина захвату глибокорозпушувача за інформацією заводу-виробника, м;

V_p – швидкість роботи ґрунтообробного агрегату в полі, км/год;

T_p – тривалість зміни, год.

Розрахункова робоча ширина захвату глибокорозпушувача дорівнює:

$$B_p = B_m \cdot \beta,$$

де B_m – заявлена виробником ширина захвату глибокорозпушувача, м;

β – коефіцієнт ефективності використання ширини захвату, $\beta = 0,98 \dots 1,0$

Тоді, до проведення вдосконалення розрахункове значення ширини захвату глибокорозпушувача становить

$$B_p = 4,1 \cdot 1,0 = 4,1 \text{ м.}$$

Після проведення вдосконалення конструкції глибокорозпушувача розрахункова ширина захвату агрегату змінилася і дорівнює:

$$B_p = 4,5 \cdot 1,0 = 4,5 \text{ м.}$$

Знайдемо, за відомою методикою [18], тривання робочого часу зміни:

$$T_p = T_{зм} \cdot \tau,$$

де $T_{зм}$ – загальний час тривалості зміни, $T_{зм} = 7$ год;

τ – нормативний коефіцієнт використання часу тривалості зміни,
 $\tau = 0,82$

$$T_p = 7 \cdot 0,82 = 5,7 \text{ год.}$$

Враховуючи наведені вихідні дані, розрахункова змінна продуктивність ґрунтообробного агрегату до модернізації при роботі в польових умовах на обраних передачах становить:

$$W_{зм}^{II} = 0,1 \cdot 4,1 \cdot 7,5 \cdot 5,7 = 17,5 \text{ га/зм};$$

$$W_{зм}^{III} = 0,1 \cdot 4,1 \cdot 8,9 \cdot 5,7 = 20,8 \text{ га/зм}.$$

За аналогічною методикою визначаємо змінну продуктивність ґрунтообробного агрегату на основних робочих швидкостях після впровадження конструктивних удосконалень:

$$W_{зм}^{II} = 0,1 \cdot 4,5 \cdot 7,5 \cdot 5,7 = 19,2 \text{ га/зм};$$

$$W_{зм}^{III} = 0,1 \cdot 4,5 \cdot 8,9 \cdot 5,7 = 22,8 \text{ га/зм}.$$

З метою розрахунку витрат пального на операцію варто використати залежність [20]:

$$Q_{га} = \frac{Q_p \cdot T_p + Q_x \cdot T_x + Q_z \cdot T_z}{W_{зм}},$$

де Q_p , Q_x , Q_z – витрати пального за годину роботи під час здійснення робочого проходу, при годинній роботі на холостому ході та під час зупинок ґрунтообробного агрегату із двигуном, що працює відповідно, кг/год;

T_p , T_x , T_z – відповідно час протягом якого відбувається робочий хід агрегату, холостий хід та стоянки із двигуном, що працює, год;

$$T_x = T_z = \frac{T_{зм} - T_p}{2},$$

$$T_x = T_z = \frac{7 - 5,7}{2} = 0,65 \text{ год}.$$

Підставляємо вихідні параметри у встановлені формульні залежності для обчислення витрати палива під час виконання операції глибокого розпушування до модернізації знаряддя для відповідних робочих передач:

$$Q_{га}^{II} = \frac{27,5 \cdot 7 + 11,7 \cdot 0,65 + 2,5 \cdot 0,55}{9,0} = 22,4 \text{ кг/га};$$

$$Q_{га}^{III} = \frac{27,5 \cdot 7 + 11,7 \cdot 0,65 + 2,5 \cdot 0,65}{10,6} = 19,04 \text{ кг/га.}$$

За цією ж залежністю, розрахуємо витрати пального ґрунтообробним агрегатом на обраних передачах роботи після проведення вдосконалення

$$Q_{га}^{II} = \frac{27,5 \cdot 7 + 11,7 \cdot 0,65 + 2,5 \cdot 0,55}{10,7} = 18,9 \text{ кг/га;}$$

$$Q_{га}^{III} = \frac{27,5 \cdot 7 + 11,7 \cdot 0,65 + 2,5 \cdot 0,55}{12,7} = 15,9 \text{ кг/га.}$$

Проведені розрахунки підтверджують, що впровадження конструктивних удосконалень у глибокорозпушувач призвело до системного зниження витрати палива на всіх робочих передачах агрегату. Цей ефект демонструє прямий техніко-економічний результат модернізації, що підтверджує її доцільність.

Підготовка поля до роботи ґрунтообробного агрегату

Важливим етапом підготовки до безполицевого обробітку ґрунту є комплексне підготування не лише техніки, а й самого поля. Це включає облаштування під'їзних шляхів та усунення потенційних перешкод, які можуть ускладнити роботу агрегату або знизити ефективність його роботи.

За відсутності системи GPS-навігації розмітку проводять традиційним способом – встановленням вішок. Критично важливим є правильне розташування орієнтирів: оператор має бачити одночасно щонайменше три вішки з кабіни трактора. Для цього використовують щогли висотою 2,5–3 метри, що забезпечує їх достатню видимість навіть за умови нерівностей рельєфу.

На полях з обмеженим простором для маневрування обов'язково облаштовують поворотні смуги, розмітку яких також виконують за допомогою вішок. Відповідно до методичних рекомендацій [17], при складанні операційно-технологічної карти обирають оптимальний напрямок руху агрегату. За відсутності особливостей рельєфу чи інших обмежень,

таким напрямком зазвичай є рух уздовж коротшої сторони загону, що в даному випадку становить $L = 1000$ м.

Розрахунок кінематичних параметрів ґрунтообробного агрегату виконується шляхом визначення його кінематичної довжини, яка розраховується за наступною формулою:

$$L_k = l_{mp} + l_m,$$

де l_{mp} – дійсна кінематична довжина енергетичного засобу, так для трактора

Т-150К[19], кінематична довжина дорівнює $l_{mp} = 2,4$ м;

l_m – кінематична довжина глибокорозпушувача, яка для чизельного плуга-глибокорозпушувача ПЧ-4,5 дорівнює [26] $l_m = 2,8$ м.

$$L_k = 2,4 + 2,8 = 5,2 \text{ м.}$$

Для визначення ширини поворотної смуги при гоновому способі руху з петльовими поворотами на кінцях загону використовується формула [18]:

$$E_p = 3 \cdot R_{\min} + e,$$

де R_{\min} – мінімальний радіус повороту скомплектованого МТА, м;

e – реальна величина виїзду агрегату у складі глибокорозпушувача ПЧ-4,5 та трактора Т-150К, м.

Крім маневрених характеристик трактора, на мінімальний радіус повороту безпосередньо впливає ширина захвату глибокорозпушувача. Чим ширше робоче знаряддя, тим більший простір необхідний для його розвороту, що суттєво збільшує радіус повороту всієї системи. Ця залежність є ключовим фактором при проектуванні поворотних смуг та плануванні робочих проходів агрегату в полі.

$$R_{\min} = 1,2 \cdot B_p,$$

$$R_{\min} = 1,2 \cdot 4,5 = 5,4 \text{ м.}$$

Виїзд агрегату для здійснення розвороту варто знайти за відомою залежністю [17]:

$$e = (0,50 \dots 0,70) \cdot L_k$$

$$e = 0,5 \cdot 5,2 = 2,6 \text{ м.}$$

Таким чином, розрахуємо ширину поворотної смуги ґрунтообробного агрегату, враховуючи попередні розрахунки

$$E_p = 3 \cdot 5,4 + 2,6 = 18,8 \text{ м.}$$

Ширина поворотної смуги узгоджується з робочою шириною агрегату і має бути її кратним значенням

$$E = K \cdot B_p,$$

де K – кратність ширини ґрунтообробного агрегату, що має обов'язково округлюватися до найближчого цілого більшого числа.

Отже, з врахуванням наведених залежностей, маємо:

$$K = \frac{E_p}{B_p} = \frac{18,8}{4,5} = 4,177\ldots, \text{ заокруглюємо до найближчого більшого цілого}$$

числа, а отже $K = 5$.

Уточнюємо розмір поворотної смуги відповідно до дійсного числа проходів агрегату під час його експлуатації на цій території

$$E = 5 \cdot 4,5 = 22,5 \text{ м.}$$

Знайдемо розрахункове значення ширини загінки, для чого скористаємося формулою:

$$C = \frac{10^4 \cdot (2 \dots 3) \cdot W_{зм}}{L},$$

де $W_{зм}$ – знайдена вище змінна продуктивність МТА що працює в полі, га/зм;

L – реальне значення довжини загінки, що обробляється, $L = 1000$ м.

$$C = \frac{10^4 \cdot 2 \cdot 22,8}{1000} = 456 \text{ м.}$$

З метою пошуку кількості загінок, які варто зробити на полі, необхідно використати формулу

$$n_3 = \frac{10^4 \cdot F}{L \cdot C},$$

де F – дійсна площа поля, на якому потрібно провести безполицевий обробіток, га.

$$n_3 = \frac{10^4 \cdot 200}{1000 \cdot 456} = 4,38 \text{ шт.}$$

Користуючись проведеними розрахунками, рекомендована кількість загінок – 5, причому необхідно, щоб 4 загинки мали ширину $C = 456$ м, а відповідно п'ята $C = 2000 - (456 \cdot 4) = 176$ м.

Рациональний вибір схеми руху агрегату по полю, зокрема комплексу трактор Т-150К + глибокорозпушувач ПЧ-4,5, забезпечує оптимальні техніко-економічні показники навіть на енергоємних операціях основного обробітку. При виборі траєкторії руху доцільно керуються існуючими науково-методичними рекомендаціями [18...25], враховуючи конфігурацію та площу поля, рельєф місцевості, ґрунтовно-кліматичні характеристики, а також професійну підготовку операторів МТА.

Для безполицевого основного обробітку [18...25] рекомендується гоновий (човниковий) способом руху (рис. 4). Його переваги також з альтернативними схемами включають: простоту реалізації в польових умовах; надійне дотримання агротехнічних регламентів для правильного налаштування МТА; високу техніко-економічну ефективність операцій, що досягається оптимальним рівнем часу робочого ходу та допоміжних операцій.

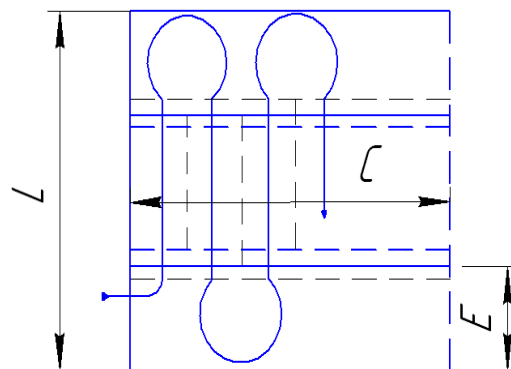


Рис. 4. Схематичне зображення гонового способу руху під час здійснення операцій обробітку ґрунту:

L – загальна довжина поля; C – ширина всього поля; E – дійсна ширина поворотної смуги

З контролю якості обґрунтовано обробки в операційно-технологічній карті слід навести засоби та прилади для перевірки глибини розпушування, однорідності заробітку, інтенсивності кришення, гребенистості поля та частки рослинних залишків на поверхні.

3. Наукова частина

Опис об'єкту вдосконалення в кваліфікаційній роботі

Для підсилення роботи серійного чизельного глибокорозпушувача ПЧ-4,5 в роботі запропоновані деякі зміни до його конструкції. Для обґрунтування модернізації та розробки практичних рекомендацій щодо впровадження удосконаленої машини, необхідно провести комплексний аналіз базової моделі глибокорозпушувача. Цей аналіз має включати вивчення його конструктивних особливостей, визначення експлуатаційних переваг та існуючих недоліків. На основі отриманих даних формується стратегія модернізації, спрямована на підвищення якості виконуваних операцій та зниження енергетичних витрат при обробітку ґрунту.

У якості об'єкту досліджень цієї роботи обрано глибокорозпушувач ПЧ-4,5 [26]. Серійна модель глибокорозпушувача (рис. 5) має класичну конструкцію, де основним несучим елементом слугує зварна рама, виготовлена з профільної квадратної труби. До цієї рами кріпляться всі функціональні компоненти машини. Основними робочими органами виступають розпушувальні лапи, які закріплені на вертикальних стояках. Додаткове обладнання включає зубчастий коток, призначений для подрібнення ґрунту після обробітку. Також конструкція обладнана опорними колесами для стабілізації роботи, механізмом навішування на трактор та регульовальними пристроями, що забезпечують точне налаштування глибини обробітку ґрунту відповідно до агротехнічних вимог.

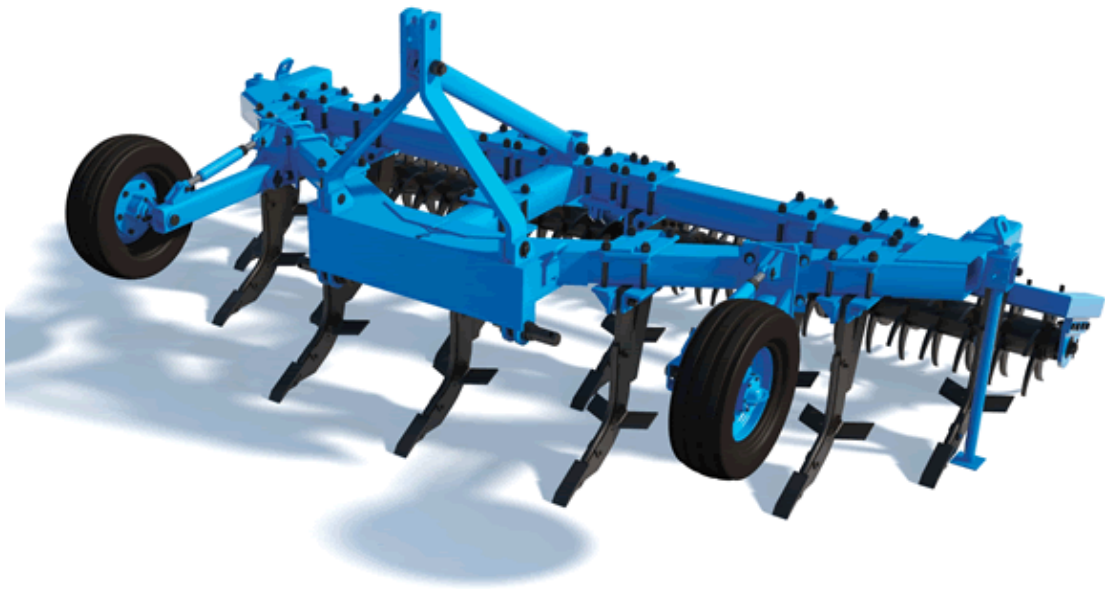


Рис. 5. Чизельний глибокорозпушувач ПЧ-4,5

Безперечно, основним робочим органом глибокорозпушувача, який безпосередньо виконує ключові технологічні операції, є чизельна лапа. Саме цей конструктивний елемент відповідає за розколювання цілиного ґрунту, його подальше розпушування та часткове перемішування частинок у орному горизонті. Одночасно з цим лапа ефективно підрізає кореневі системи рослинних решток і руйнує утворені в ґрунті ущільнення, зокрема, підплучну підшову. Таким чином, чизельна лапа є центральною ланкою в процесі безполицевого обробітку, що визначає як якість підготовки поля, так і енергетичні витрати на проведення операції. На серійному глибокорозпушувачі ПЧ-4,5 основний робочий орган традиційно виконаний у вигляді прямого стояка, до якого кріпиться долото. Однак у більш сучасних модифікаціях, таких як модель ПЧ-4,5 «SVAROG», конструкція була вдосконалена шляхом додавання до вертикального стояка спеціальних елементів – зазвичай це прямолінійні крила або закрилки. Під час роботи ці допоміжні деталі значно покращують якість підрізання корневих систем бур'янів, що підвищує загальну ефективність боротьби з рослинністю-конкурентом під час обробітку ґрунту. Основне навантаження по

сколюванню необробленого ґрунту сприймає на себе долото, яка розміщене в нижній частині робочого органу і кріпиться шплінтом до стояка. У верхній частині стояка на скобах із кронштейнами та болтами, зафіксовані металеві кронштейни, за допомогою яких основний робочий орган фіксується на рамі знаряддя. На аналогічних за принципом дії чизельних знаряддях [10, 16, 25] часто встановлюють різноманітні ножі на передній частині стояка. Таке конструктивне рішення, по-перше, збільшує ресурс робочого органу, а по-друге, частково знижує тяговий опір знаряддя під час роботи в щільному ґрунтовому середовищі. У базовій моделі ПЧ-4,5, яка була обрана прототипом для модернізації, на передній поверхні стояка закріплено обтічний пруток [26]. За задумом інженерів, цей елемент має виконувати аналогічні функції.

Рама ґрунтообробного знаряддя, що є зварною просторовою конструкцією з численними перемичками та боковинами, служить основою для кріплення всіх основних і допоміжних робочих органів агрегату. За своєю формою розробники глибокорозпушувача прийняли рішення виготовляти раму трикутної форми, що повинно, у поєднанні із раціональним розміщенням на ній розпушувальних лап, забезпечити менше забивання рослинними рештками та ґрунтом робочих органів і конструктивних елементів. Ліворуч і праворуч на рамі розміщуються опорні колеса, що шарнірно закріплені до рами, а зміна їх положення відносно поперечин рами, за рахунок обертання гвинтового механізму забезпечують регулювання глибини обробітку ґрунту чизельними лапами. Під час налаштування ґрунтообробного агрегату критично важливо встановити однакове положення регульовальних гвинтів як лівого, так і правого опорних коліс. Нехтування цією вимогою призводить до перекосу рами у вертикальній площині під час експлуатації, що викликає нерівномірне заглиблення робочих органів по всій ширині захвату глибокорозпушувача. Передня частина рами обладнана спеціальним механізмом навішування, який

спроектований для зручної та швидкої зчіпки з потужними тракторами сімейств Т-150 та К-700.

Технологічний процес роботи глибокорозпушувача відбувається наступним чином. Після комплектації глибокорозпушувача ПЧ-4,5 з трактором та завершення всіх регулювальних операцій, агрегат переводиться у робочий стан за допомогою гідравлічної системи тягача. Подальший рух по полю здійснюється з розрахованими раніше кінематичними параметрами, що забезпечує оптимальну якість обробітку та ефективність роботи. В цей час робочі органи, під власною вагою та вагою машини, заглиблюються в ґрунт на глибину, яку обмежують опорні колеса. Під час роботи на заданій глибині долото, яке є основним робочим елементом чизельної лапи, виконує кілька ключових функцій: воно розколює щільний, необроблений ґрунт, одночасно перемішуючи його частинки, та спрямовує роздроблені елементи ґрунтового шару до поверхні поля. Якість подрібнення ґрунту та гранулометричний склад обробленого шару в кінцевому підсумку визначаються комплексом конструктивних параметрів робочого органу. Геометрія долота, конфігурація крил (за їх наявності), форма стояка та розташування на ньому допоміжних елементів (зубів чи обтікачів) безпосередньо впливають на характер утворення тріщин і сколів у ґрунтовому масиві під час руху лапи. Саме ці фактори формують розмірний спектр грудок і співвідношення частинок різної фракції після проходження ґрунтообробного агрегату.

Ретельний розбір протоколів випробувань машини прототипу ПЧ-4,5 та відгуки господарств, де такі машини працюють, дозволяють зауважити, що якісні характеристики роботи ґрунтообробного агрегату є схожими до інших глибокорозпушувачів, виключно з деякими машинами іноземних виробників. Проте, існують значні негаразди, коли агрегату доводиться працювати на ґрунтах із потужною ущільненою підорною підшовою, яка розташована близько до поверхні, на переущільнених, пересушених чи надто перезвожених ґрунтах, на полях із великою кількістю рослинних решток

тощо. Зважаючи на це, на нашу думку, внесення зміни до конструкції чизельного глибокорозпушувача, а саме покращити будову чизельної лапи з метою зменшення її тягового опору, поліпшення кришення та вирівнювання ложа борозни, кращого виконання роботи на угіддях із достатньою кількістю рослинництва є питанням актуальним і слушним до впровадження.

Задля зменшення загального тягового опору агрегату та посилення його роботи у складних умовах, ухвалено рішення замінити серійні чизельні лапи глибокорозпушувача на лапи покращеної конструкції. Ці лапи сконструйовані з врахуванням досліджень, виконаних Ветохином В.І. [27], який запропонував для кращого кришення й посилення поширення деформацій застосовувати криволінійні опуклі чи вігнуто-опуклі поверхні. З огляду даних рекомендацій ухвалено рішення змінити форму звичайного плаского долота на долото криволінійної вігнуто-опуклої форми. Притому, базуючись на дослідженнях, проведених раніше [10] долото мусить бути увігнутим у передній його частині зі швидким набиранням опуклості долота біля стояка лапи. Варто брати до уваги, що така стрімка зміна форми поверхні долота, яка має бути втілена і в поздовжній площині проєкції, дозволяє забезпечити концентрацію стискаючих напружень у передній частині цього елемента (біля його носка) та різкий (майже вибуховий) перехід цих стискаючих напружень до напружень розтягу, що виникають на опуклій частині долота на його задній частині. Даний процес варіювання концентрації напруження в робочій зоні долота активізує тріщиноутворення та руйнування, покращує якість подрібнення обробленого шару та забезпечує ефективність роботи за ускладнених умов. Модернізований робочий орган зі змінними розтягуючими та стискаючими напруженнями одночасно покращує кришення монолітів та знижує енергоємність процесу розпушування.

Грунтуючись на наведеній інформації, та спираючись на запропоновані покращення, можна сформулювати *мету роботи*, яка полягає в інтенсифікації роботи глибокорозпушувача та зменшенні енерговитрат на

процес шляхом удосконалення чизельної лапи та обґрунтування технологічних характеристик глибокорозпушувача.

Завданням дослідження є оцінка конструктивних параметрів і форми робочого органу чизельної лапи та визначення їх впливу на якість подрібнення обґрунтованих агрегатів у зоні заробітку.

Об'єкт досліджень – процес взаємодії модернізованої чизельної лапи з долотом вігнуто-опуклої конфігурації з ґрунтовим масивом при глибокому розпушуванні в межах основного обробітку.

Предмет досліджень – встановлення впливу конструктивних і технологічних параметрів долота вігнуто-опуклої конфігурації та удосконаленої чизельної лапи на показники якості роботи знаряддя.

Дослідження проводилися на базі кафедри СГМ ЦНТУ відповідно до науково-дослідної тематики, закріпленої за випусковою кафедрою.

Теоретичне обґрунтування параметрів вдосконаленого робочого органу

Одним із загальновідомих недоліків чизельних плугів та чизельних глибокорозпушувачів є те, що при роботі таких машин, надто складно отримати вирівняне дно борозни, а хибне налаштування чи невірна розстановка робочих органів спричиняє те, що й на поверхні поля часто виникають пропуски обробітку та гребені. Згідно з традиційною конструктивною схемою таких знарядь, руйнування та розпушування ґрунтового масиву здійснюють чизельні лапи, які складаються зі стояка з приєднаними до нього долотом, крилами або закрилками та зубами чи обтікачами (рис. 6).

Комплексне вивчення конструкцій і робочих схем чизельних лап [10, 16, 25-31] дає можливість виокремити базові конструктивні параметри, властиві переважній більшості таких робочих органів, які вважаються класичними (рис. 6): кут кришення долота – $\beta = 15...45^\circ$; кут нахилу робочої грані стояка до дна борозни $\beta_1 = 15...60^\circ$; нижня частина долота має нахил до

дна борозни $\varepsilon = 0...10^\circ$; кут розхилу долота, за умови його роботи в умовах деблокованого різання $2\gamma = 60...150^\circ$; виліт долота відносно стояка лапи – $l = 0,2...0,8$ м; робоча ширина долота – $\vartheta = 45...100$ мм; ширина розширювача долота (за його наявності) в зоні його руху по дну борозни $\vartheta_1 = 100...350$ мм; висота стояка може бути різною і залежить не лише від глибини обробітку, а й від конструктивних особливостей ґрунтообробного агрегату і може змінюватися в широкому діапазоні значень $H_{ст} = 450...900$ мм; товщина стояка чизельної лапи вибирається із умови забезпечення міцності цієї несучої конструкції і в середньому становить $\vartheta_2 = 25...35$ мм.

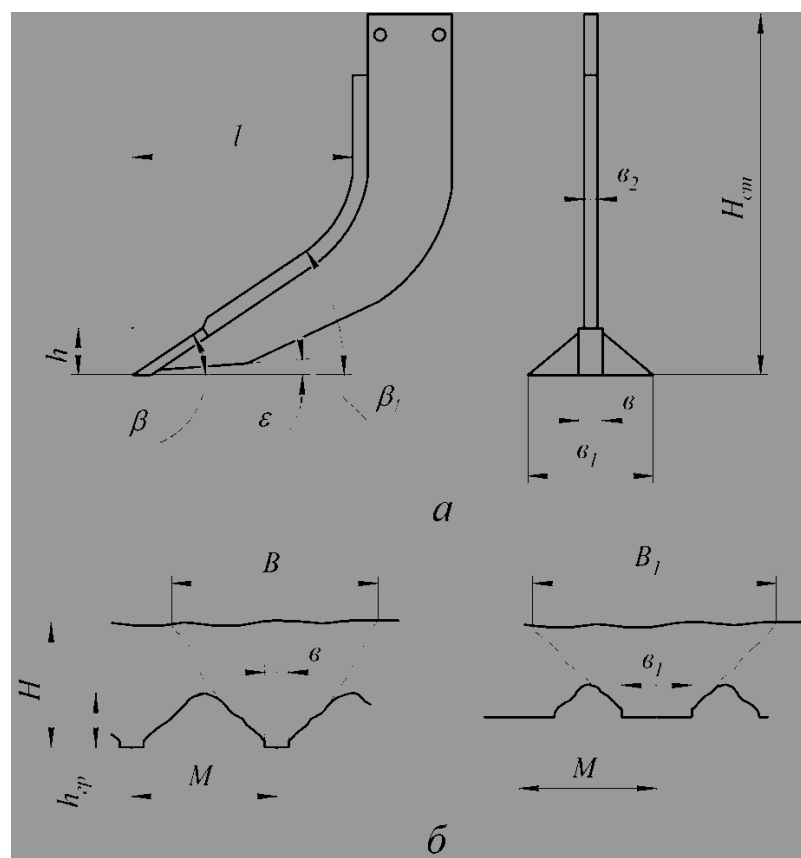
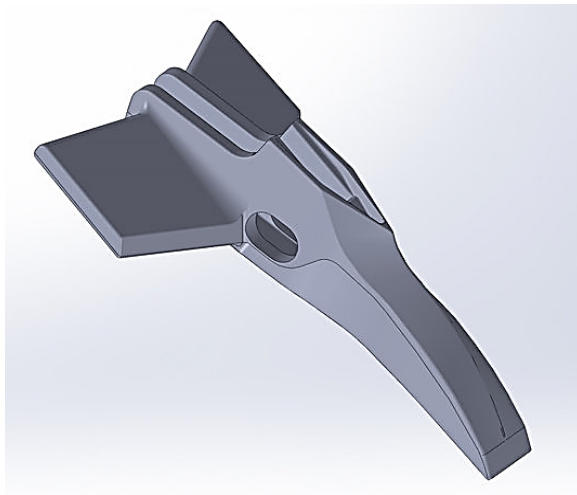


Рис. 6. Розрахункова схема класичних чизельних лап, як основних робочих органів глибокорозпушувачів а) та профілі дна борозни, що утворюються в результаті роботи лап б)

Залежно від конструкції робочих органів глибокорозпушувачів, усі стояки, як основні опорні елементи бувають прямими, параболічними (типу «Пароплау») та дугоподібними. Окрім конструктивних особливостей стояків,

усі вони виконують тотожну функцію – слугують основою, до якої кріпляться долота, лапи чи крила та інші елементи, які безпосередньо виконують роботу по сколюванню ґрунтових монолітів, підрізанню коріння рослин, розпушуванню та перемішуванню зрушених часток. Окрім функції несучого елемента, технологічні та конструктивні характеристики стояка також впливають на якість обробітку, оскільки він забезпечує додаткове кришення ґрунту, відведення великих грудок і рослинних решток. На деяких машинах долота обладнані розширювачами зони деформації ґрунту, що покращує дезагрегацію, проте супроводжується значним зростанням енергоємності процесу обробітку. Якщо глибокорозпушувач, як і більшість машин для подібних операцій, реалізує суцільний основний безполицевий обробіток, то робоча ширина долота b і b_1 є суттєво меншою за ширину захвату B , B_1 зони обробітку чизельною лапою (рис. 6) та відстані між сусідніми робочими органами M .

Безпосередній вплив на енергоємність процесу безполицевого обробітку ґрунту чизельною лапою має форма та геометричні характеристики долота. Більшість серійних апаратів, включно і закордонних, через невисоку ціну і велику уніфікацію фактично застосовують долота прямолінійної форми, а для продовження періоду їхньої експлуатації, ці долота виготовляються ще й двосторонніми оборотними. Існує низька праць і експериментальних підтверджень того, що закріплення на поверхні долота будь-яких накладок, нарізання жолобків чи надання випуклості сприяє покращенню сколювання необробленого ґрунту [27]. Також, чітко доведено [28...31], що якщо на машині застосовується долота ще більш складних і нерівних форм, це дозволяє не лише інтенсифікувати процес обробітку, а й позитивно впливає на енергетику процесу. Провідними виробниками ґрунтообробної техніки для безполицевого обробітку, які впроваджують долота складної конфігурації в серійних глибокорозпушувачах, є компанії JOHN DEERE та LEMKEN (рис. 7).



a)



б)

Рис. 7. Долота чизельних глибокорозпушувачів серійних закордонних виробників JOHN DEERE a) та LEMKEN б)

Попри різноманіття конструктивних виконань чизельних лап, у кожній із них найбільше навантаження сприймають на себе долото та стояк, а тому саме ці складники конструкцій зазнають найінтенсивнішого зношування. Для підтримання їх функціонування як долото так і стояк рекомендується виготовляти із матеріалів, що є максимально зносостійкими, а після втрачання можливості виконувати процес різання і розпушування, затуплення і зношення лез і кромek тощо, ці елементи підлягають заміні, що і є підставою для того, щоб їх робити швидкоз'ємними навіть у польових умовах. Повністю вирішує питання із подовженням терміну експлуатації стояка встановлення, як зазначалося вище, на лобовому його контурі особливих деталей – зубів чи обтічників, які лобові навантаження беруть на себе і саме вони більш активно стираються та виходять з ладу. При цьому дорожчий елемент – стояк залишається цілим і працює після заміни зношених деталей далі.

Існує значна кількість праць, як теоретичного, так і практичного змісту, які сфокусовані на розробці зразків нових глибокорозпушувачів та покращення конструктивних частин серійних агрегатів. Бауков А.В. [27], в власних дослідницьких працях, під час вивчення ґрунтообробних знарядь,

застосовуючи реологію системи Шведова поділяв деформації ґрунту робочими органами в його товщі на дві взаємопов'язані фази. Рештою, ці праці зводилися до розв'язання контактної задачі теорії пружності, після чого Бауков А.В. дійшов до висновку, що поживити процес сколювання і розпушування можна за умови, коли профіль долота, як головного елемента що сколює необроблений ґрунт, варто виготовляти із поперечним перерізом по дузі кола. Така форма поверхні долота забезпечить створення спеціального напруженого стану у ґрунті, який надаватиме виникнення додаткових силових чинників, що формуватимуть максимальну кількість зсувів ґрунтових елементів, що в підсумку забезпечує покращення кришення всього об'єму ґрунтового середовища.

На практиці, обробляючи ґрунт, стається його сколювання, причому поверхня сколювання та її межі здатні суттєво відрізнитись між собою, і, за інших подібних умов, це зумовлюються лише параметрами елемента конструкції, що цей ґрунт ріже. З наукової позиції цю гіпотезу підтвердив Л.Ф. Бабицький [27], який на етапі покращення робочої поверхні корпусу плуга обґрунтував, що надання цій поверхні опуклої форми суттєво покращує загальне кришення ґрунту в зоні руху корпусу з такою поверхнею.

Схожі дослідження з формами поверхонь ґрунтообробних робочих органів проводилися і для культиваторних лап, так В.І Гасилін [27] використовувати застосовувати культиваторні лапи із випуклою подовженою формою поперечного перерізу.

Відповідно до його концепції, покращення кришення і подрібнення обґрунтовано на підвищених швидкостях з одночасним забезпеченням підймання оброблюваного шару та зниження опори переміщення лапи досягається шляхом зменшення кута кришення та збільшення кута розхилу β стрільчастої лапи. 2γ . Отже, і під час застосування впуклих поверхонь для ґрунтообробних робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту теж фіксувався позитивний вплив, навіть при їх роботі на високих швидкостях.

Таким чином, підсумовуючи наведене вище, стає зрозумілим, що покращуючи робочі складові ґрунтообробних машин доцільно використовувати випуклі чи увігнуті поверхні, окрім того, на тяговий опір конструктивних деталей основних робочих частин глибокорозпушувачів мають максимальний вплив його кут кришення β та кут розхилу γ долота. При великій кількості робіт і варіантів конструкції чисельних лап, необхідно зважати на те, що експериментальні дослідження проводилися за різними агрокліматичними умовами, а теоретичні моделі містили суттєві спрощення та припущення, що обмежує їх відповідність практичним реаліям. Водночас було розроблено методику визначення ключових параметрів чизельного лапа та їх впливу на тяговий опір. В основі методики викладено визначення відсоткового складу сили тягового опору в залежності від геометричних характеристик. Базовим значенням (100%) обрано кут кришення 35° , що й було застосовано в конструкції прототипу – плуга-глибокорозувача ПЧ-4,5 як кут установки долота до горизонтальної поверхні.

У свою чергу, зменшення кута кришення β сприяє загальному зниженню тягового опору, при цьому повне зниження цього показника не перевищує 20% від початкового тягового опору чизельної лапи. Мінімальне значення тягового опору можливе за умови, що кут кришення долота перебуває у інтервалі $\beta = 15...25^\circ$, що й показано на рис. 8.

Характер впливу кута розхилу кромки долота $R_x = f(\beta)$ (рис. 9), на тяговий опір вказує на те, що його збільшення до 180° супроводжується зниженням тягового зусилля. Але обов'язковою умовою того, що тяговий опір мусить знижуватися є уникнення забивання різальних граней робочого органу рослинними рештками, у іншому випадку рослинні рештки із ґрунтом налипають на робочі поверхні цим самим змінюючи не тільки геометричну форму робочого органу, а й умови його функціонування. Експлуатація глибокорозпушувача ПЧ-4,5 у виробничих умовах показала, що остання

кардинальна деформація геометрії робочого органу не відбувається, кут розхилу долота чизельної лапи доцільно збільшити до 180° .

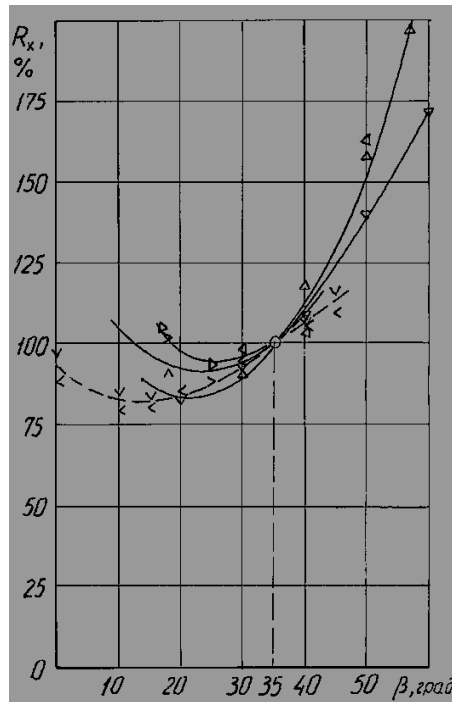


Рис. 8. Вплив кута кришення β долота чизельної лапи на тяговий опір робочого органу:

$<$ – за даними Зеленіна [27];

$>$, ∇ , \triangleleft , \triangle – за даними Синеокова [27]

При певних допущеннях можна розглядати роботу чизельної лапи в обґрунтуванні як процес, подібний до взаємодії між двома нерухомими опорами, що за умови певної постійної жорсткості кожного серйозного до трансформації епюри контактних напружень у параболічну або сідлоподібну форму (рис. 10). Причому можна зазначити, що у разі, якщо тиск розподіляється за параболою, то у ґрунті відбувається виразне утворення рівномірної мережі розтріскувань, що і сприяє утворенню подібних за розміром часток. У випадку ж розповсюдження сідловидних епюр тиску, процес супроводжується зменшенням витрат енергії. На основі цього в роботі запропоновано конструкцію долота, що поєднує увігнуту поверхню в передній частині для зменшення енергетичних витрат з опуклою поверхнею в

задній частині для забезпечення рівномірного тріщиноутворення під час обробітку ґрунту.

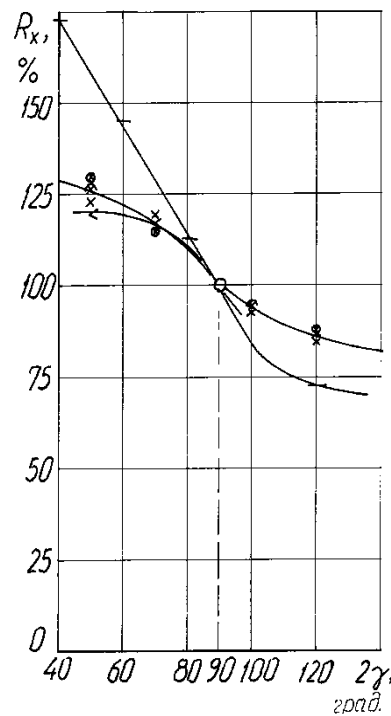


Рис. 9. Вплив кута розхилу долота 2γ на загальний тяговий опір R_x робочого органу:

— — за даними Глейберсона [27]; х — за даними Грачова [27]; о — за даними Зеленіна [27]

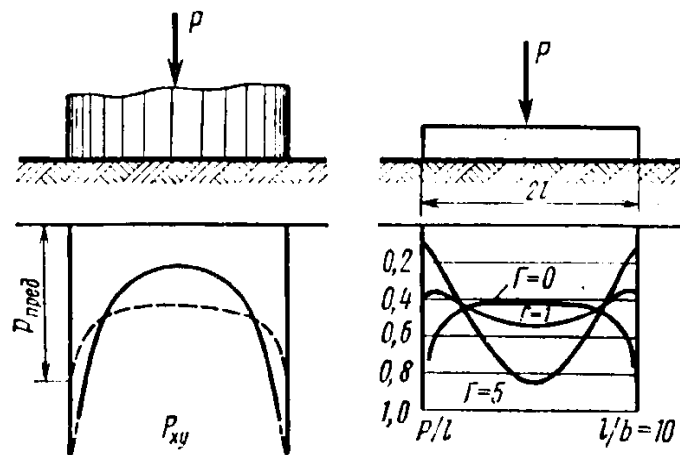


Рис. 10. Епюри контактного тиску, що виникають між двох опор під фундаментом

Таким чином, результати досліджень дозволяють стверджувати, що ефективність обробітку ґрунту та раціональність енергетичних витрат

досягаються за максимальної відповідності геометрії робочих граней долота формі контактної взаємодії з ґрунтом. У процесі руху чизельної лапи в ґрунтовому масиві спочатку відбувається ущільнення і деформація структурних елементів, що супроводжується максимально рівномірним розподілом контактних напружень, найкраще реалізованим при параболічній формі деформаційної поверхні. Необхідно враховувати, що в процесі роботи біля ріжучої кромки долота відбувається нарощування пружних деформацій та навантажень, що супроводжується виникненням зони ущільнення в контактній області [27]. Ця зона суттєво впливає на поширення тріщин і може змінювати загальну конфігурацію робочого органу. Ветохін В.І. [27] відзначав, що сформоване ядро ущільнення біля кромки долота забезпечує S-подібний характер руху ґрунтових частинок у поєднанні з їх ковзанням уздовж робочої поверхні.

Таким чином, можна констатувати, що клиноподібна форма поверхні долота глибокорозпушувача істотно впливає на якість та енергоємність обробітку ґрунту, а кут кришення β та кут розхилу 2γ робочої грані у поєднанні з матеріалом виготовлення та іншими конструктивними параметрами безпосередньо визначають характер, інтенсивність і рівномірність деформацій, що зумовлюють тріщиноутворення в оброблюваному ґрунтовому масиві.

Отже, аналітичні дослідження дозволяють обґрунтувати, що одним із методів покращення інтенсивності та рівномірності руйнування ґрунту при глибокому розпушуванні є зміна конфігурації долота з плоскої на криволінійну, з увігнутим профілем у передній частині та опуклим – у задній. Саме така увігнуто-опукла форма забезпечує розподіл навантажень та контактного тиску, що генерує рівномірне сколювання за параболічним контуром поверхні. Виконання лобової частини долота з увігнутим профілем забезпечує зниження на початковому етапі частки деформацій стиску при зростанні деформацій розтягу, що базується на ефекті Баушингера [27] і

призводить до скорочення енергоємності процесу. Виходячи з наведеного, долото чизельної лапи увігнуто-опуклої конфігурації забезпечує високу якість розпушування з рівномірним утворенням структурних агрегатів при зниженні енергетичних витрат на обробіток.

4. Практична реалізація результатів досліджень

Конструкторські розрахунки глибокорозпушувача

Головним робочим органом глибокорозпушувача є чизельна лапа, яка і виконує основну роботу по кришенню, подрібненню монолітів ґрунту, руйнуванню підорної підшви, підрізання рослин тощо. Закономірно, що конструктивні характеристики чизельної лапи та параметри її функціонування прямо визначають якість процесу обробітку ґрунту. У практиці проектування ґрунтообробної техніки робочі елементи найчастіше представляють як двогранний клин, що рухається в ґрунті. Такий же підхід застосуємо для моделювання долота чизельної лапи.

На енерговитрати процесу впливає також низка чинників, серед яких, окрім конструктивних параметрів робочих органів, можна виокремити компоновання робочих органів і елементів в одній машині, кінематичні характеристики агрегату, зовнішні умови роботи, глибина обробітку, наявність і кількість рослинних решток тощо. З метою мінімізації енергетичних витрат глибина обробітку не повинна перевищувати критичну глибину роботи робочого органу (рис. 11). За невиконання цієї умови спостерігається інтенсифікація пластичних деформацій з відповідним зростанням енергоємності. Додатково, при переміщенні долота в ґрунті відбувається компресія ґрунтового матеріалу в контактній зоні біля кромки, що знижує ефективність кришення та підвищує енергетичні витрати.

Під час розрахунку чизельної лапи потрібно враховувати, що розрахунковий кут сколювання ґрунту $\psi_{ск}$ пов'язаний із максимальною (критично) глибиною обробітку ґрунту H (рис. 11). Для розрахунку

теоретичного кута сколювання ґрунту доцільно застосувати відому залежність [15], яка враховує властивості оброблюваного середовища і має наступний математичний вираз: $\psi_{ск} = 90^\circ - (\beta + \gamma)$,

де β – розрахункове значення кута кришення ґрунту, який для дійсних ґрунтово-кліматичних умов господарства становить, $\beta = 25 - 30^\circ$;

γ – теоретичний кут тертя ґрунту по сталевій поверхні чизельного робочого органу, який дорівнює $\gamma = 22^\circ$.

$$\psi_{ск} = 90^\circ - (25 + 22) = 43^\circ.$$

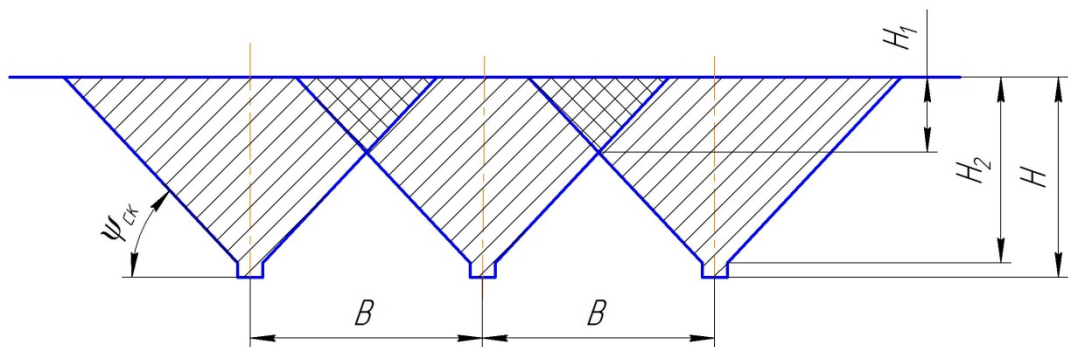


Рис. 11. Вертикальний зріз ґрунту та зони сколювання середовища після обробітку чизельним глибокорозпушувачем

Ще одним якісним параметром безполицевого обробітку ґрунту чизельними знаряддями є фактична глибина суцільного обробітку H_1 після роботи глибокорозпушувача. Ця величина найбільш суттєво впливає на забезпечення якості наступних технологічних процесів, у зв'язку з чим мінімальна глибина суцільного обробітку під час глибокого розпушування рекомендується на кілька сантиметрів глибшою порівняно з глибиною висіву насіння. Маючи дійсні фізико-механічні властивості ґрунту на полі господарства, що підлягає обробітку, глибина суцільного H_1 має прямопропорційний зв'язок із глибиною обробітку H та дійсній відстані між суміжними чизельними лапами (за їх міжсліддям, а не в одному ряду) B . Відповідно до рекомендацій ряду авторів [25...31] і враховуючи, що

глибокорозпушувач працює до проведення культивуації, глибину суцільного обробітку необхідно забезпечити на рівні $H_1 = 12...15$ см.

Згідно з наведеними вище рекомендаціями щодо суцільного обробітку та глибину руху робочих елементів в необробленому ґрунті шляхом простих перетворень можливо визначити розрахункову велечину інтервлу між міжсліддями чизельних лап та модернізованого глибокорозпушувача:

$$B = 2(H - H_1) \operatorname{ctg} \psi_{ck},$$

$$B = 2(400 - 150) \operatorname{ctg} 45 = 510 \text{ мм.}$$

Виконані розрахунки дозволили встановити граничну відстань між робочими органами в агрегаті, при цьому зменшення цієї відстані гарантує забезпечення заданої глибини суцільного обробітку. Враховуючи потребу в уніфікації конструкції та конструктивні особливості, для чизельного глибокорозпушувача, що рекомендується до впровадження, відстань між лапами встановлюємо $B = 500$ мм.

Сколювання ґрунту під дією ґрунтообробних робочих органів відбувається аналогічним чином. Схема утворення тріщин у суцільному середовищі перед чизельною лапою при її переміщенні в ґрунтовому масиві на глибині H представлена на рис. 12. Працюючи у ґрунті на заданій глибині обробітку, чизельна лапа із характерним для неї кутом кришення α сколює необроблені горизонти ґрунту, причому кут сколювання, а отже і кут тріщиноутворення складає τ .

У першому наближенні, при розрахунку чизельної лапи, можна прийняти, що кут кришення α (кут нахилу долота до горизонтальної лінії дна борозни) буде рівним куту тертя ґрунту по долоту. Дане припущення широко застосовується в розрахунковій практиці проектування робочих органів ґрунтообробної техніки. У цьому випадку формула розрахунку кута сколювання ґрунту попереду чизельної лапи (рис. 12) має форму:

$$\tau = 90^\circ - (\alpha + \varphi + \varphi_1) / 2,$$

в альтернативній формі, з урахуванням рівності кутів α та φ

$$\tau = 90^\circ - \left(\alpha + \frac{\varphi_1}{2} \right),$$

де φ_1 – внутрішній кут тертя часток ґрунту між собою, який дорівнює $\varphi_1 = 50^\circ$;

α – кут кришення долота ґрунтообробного робочого органу, який в конкретному випадку рівний $\alpha = 25^\circ$.

Отож, можемо знайти розрахунковий кут сколювання ґрунту долотом чизельного глибокорозпушувача спереду робочого органу

$$\tau = 90^\circ - \left(25^\circ + \frac{50^\circ}{2} \right) = 40^\circ.$$

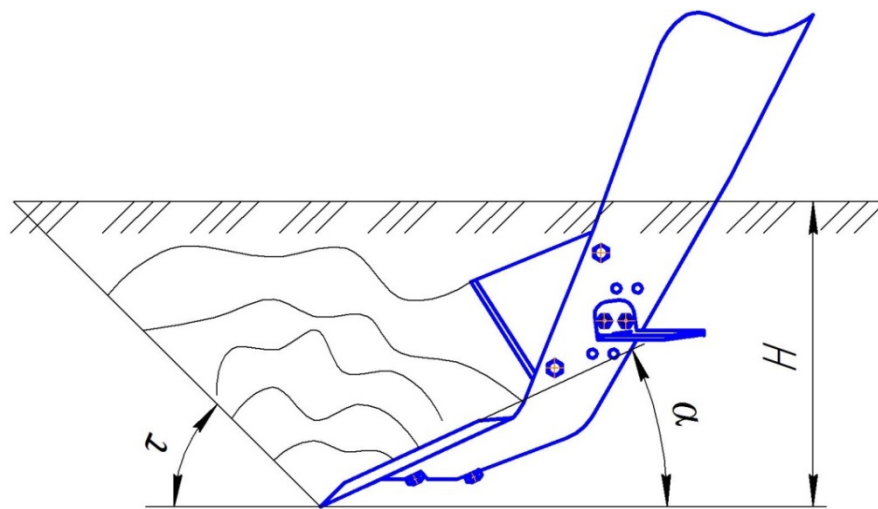


Рис. 12. Схематичне зображення та деякі параметри чизельної лапи під час її роботи у товщі ґрунту на глибині H

У поздовжньому напрямку глибокорозпушувача розповсюджуються деформації, що зумовлюють руйнування ґрунту на відстані C від чизельної лапи. Розмір зони сколювання в поздовжньому напрямку розраховується за формулою

$$C = H \cdot ctg\tau \approx H \cdot tg\left(\alpha + \frac{\varphi_1}{2} \right).$$

Розрахунок цієї формули дозволив отримати значення цього сколювання:

$$C = 400 \cdot tg\left(25 + \frac{50}{2} \right) = 476 \text{ мм.}$$

Базуючись на виконаних розрахунках та враховуючи потребу уникнення закупорювання міжрядь великими грудками і рослинними рештками, відстань між рядами лап глибокорозпушувача L повинна задовольняти співвідношення:

$$L > H \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + C.$$

$$L > 400 \cdot \operatorname{tg}(25 + 25) + 476 = 952 \text{ мм.}$$

Наведена нерівність дозволяє також визначити мінімальне значення відстані між рядами чизельних лап глибокорозпушувача. Враховуючи, що в реальних польових умовах можуть бути присутні переущільнені ґрунти зі схильністю до утворення крупних грудок при обробітці, а також значна кількість рослинних решток, включаючи високостеблові, для запобігання забиванню стояків розпушувача відстань між рядами лап доцільно збільшувати. Додатково до цього, робота чизельного глибокорозпушувача мусить забезпечувати можливість проведення обробітці ґрунту у широкому діапазоні глибин, і часто такі глибини можуть бути доволі суттєвими – до 45...50 см, а отже також є необхідність і для граничних глибин виключити можливість забивання знаряддя між рядами лап, що теж вимагає збільшення міжрядної відстані. Керуючись зазначеними рекомендаціями та конструктивними особливостями, реальну міжрядну відстань глибокорозпушувача ПЧ-4,5 доцільно визначити на рівні $L = 1100$ мм.

Отже, проведені розрахунки дають змогу гарантувати працездатність агрегату за умови фактичного застосування вирахованих характеристик глибокорозпушувача. Цілком зрозуміло, що покращений чизельний глибокорозпушувач, може створювати задані агротехнічні вимоги, навіть при підвищених глибинах роботи (до 45...50 см).

Визначення дійсної ширини захвату агрегату з урахуванням ґрунтових умов проводиться за залежністю:

$$B_q = \eta \cdot P_m / q,$$

де η – коефіцієнт, який показує наскільки повно використовується тягове зусилля енергетичного засобу, з врахуванням [15], ця величина дорівнює $\eta = 0,85$;

P_m – розрахункове значення тягового зусилля енергетичного засобу, на конкретній обраній передачі, із розрахунку, проведеному в технологічній частині, значення цього параметру для трактора Т-150К на III робочій передачі дорівнює $P_m = 26,12$ кН;

q – значення питомого опору ґрунту на метр ширини захвату глибокорозпушувача, значення даного показника визначається конкретними агрокліматичними умовами та складом додаткових робочих органів, які забезпечують працездатність агрегату. З урахуванням фактичних умов роботи чизельного глибокорозпушувача ПЧ-4,5, обладнаного зубчастим котком, питомий опір складає $q = 4,85$ кН/м [10, 12, 15].

Отже, маємо
$$B_q = 0,85 \cdot 26,12 / 4,85 = 4,58 \text{ м.}$$

З огляду на прийняте значення міжслідня чизельних робочих органів в агрегаті приймаємо його ширину захвату $B_q = 4,5$ м. Як було зазначено, для виключення забивання чизельних лап вони розташовуються з певним кроком у два ряди. Враховуючи необхідність обробітку коліїв від опорних коліс, доцільно винести дві лапи на третій напівряд. Таким чином, з урахуванням міжслідня, розрахункова кількість лап на рамі глибокорозпушувача дорівнює

$$n = \frac{B_q}{B},$$

де B_q – дійсна ширина захвату ґрунтообробного агрегату, мм;

B – прийняте міжсліддя чизельних лап у вертикальній площині (рис. 11), чи фактична ширина захвату лапи глибокорозпушувача, мм.

Підставивши знайдені величини маємо загальну кількість робочих органів на знарядді

$$n = \frac{4500}{500} = 9 \text{ шт.}$$

Отже, виконані конструкторські дають змогу засвідчити, що чизельний глибокорозпушувач ПЧ-4,5 гарантує ширину захвату 4,5 м завдяки роботі дев'ятьма чизельними лапами запропонованої конструкції. Як і для інших глибокорозпушувачів, робота вдосконаленого знаряддя із 9-ма лапами, що розташовані у два ряди фактично забезпечує збільшення реальної ширини захвату відносно конструктивної. Варто зауважити, що таке збільшення фактичної ширини захвату є сприятливим явищем, оскільки буде відбуватиметься якісніше перекриття суміжних проходів.

Розрахунок на міцність стояка лапи глибокорозпушувача

Аби забезпечити потрібну міцність робочих органів, при їх роботі у товщі ґрунту, треба гарантувати стійкість стояка чизельної лапи, зокрема і в небезпечному перерізі при дії на стояк максимального згинального моменту [34] рис. 13.

Для виконання відповідних обчислень необхідно створити масштабне креслення чизельної лапи та методом безпосередніх вимірювань визначити необхідні розрахункові параметри, а саме величини $H' = 750$ мм і $h = 850$ мм. У процесі переміщення чизельної лапи в ґрунтовому шарі найбільший згинальний момент діє в перерізі А-А (рис. 13), і він зумовлений силою R_{xz} :

$$M_a = R_{xz} \cdot h = 3,3 \cdot 0,85 = 2,8 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Момент інерції стояка в небезпечному прямокутному перерізі, розташованому в центрі тяжіння, визначається за формулою:

$$I_{Z_1} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{3 \cdot 24^3}{12} \approx 3453 \text{ см}^4.$$

Площа поперечного перерізу стояка в зоні дії максимального згинаючого моменту складає

$$F_{np} = b \cdot h = 3 \cdot 24 = 72 \text{ см}^2$$

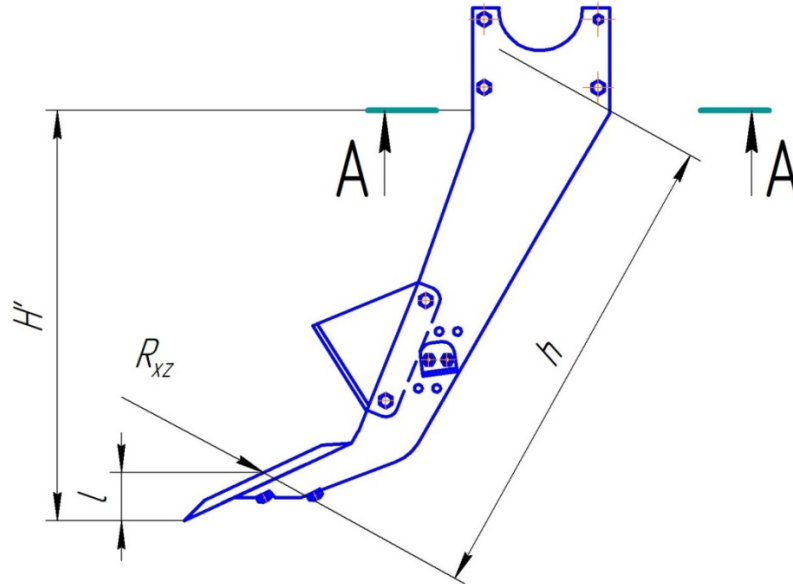


Рис. 13. Схема до розрахунку чизельної лапи на міцність

Побудуємо переріз стояка лапи в небезпечній зоні (рис. 14), який застосовуємо для подальших обчислень його моменту опору.

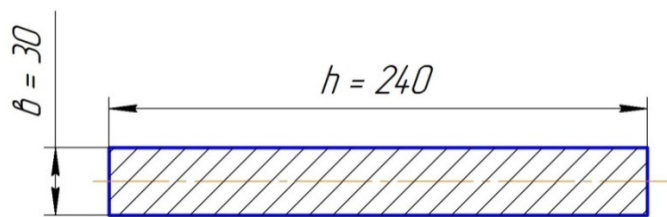


Рис. 14. Розрахункова схема перерізу стояка лапи глибокорозпушувача в небезпечному місці

Розрахуємо і статистичний момент небезпечного перерізу у системі координат XZ_1

$$S_{Z_1} = F_{np} \cdot x_{np} + F_{кр} \cdot x_{кр} = 72 \cdot 0 + 7,1 \cdot (12 + 1,5) = 95,8 \text{ см}^3.$$

Абсциса центру тяжіння небезпечного перерізу знаходиться за формулою:

$$x_c = a_1 = \frac{S_z}{F} = \frac{S_t}{F_{np} + F_{кр}} = \frac{95,8}{72 + 7,1} = 1,21 \text{ см.}$$

Враховуючи проходження нейтральної осі Z через центр тяжіння стояка чизельної лапи, головний момент інерції відносно цієї осі визначається як

$$I_Z = I_{Z_1} + a_1^2 \cdot F_{np} + I_{Z_2} + a_2^2 \cdot F_{кр} =$$

$$3453 + 1,21^2 \cdot 72 + 4 + (12 + 1,5 - 1,21)^2 \cdot 7,1 = 4630 \text{ см}^4$$

Для знаходження конкретного місця знаходження абсцис крайніх точок небезпечного перерізу варто використати залежності:

$$x_A = \frac{h}{2} + a_1 = 12 + 1,21 = 13,21 \text{ см.}$$

$$x_B = \frac{h}{2} + d - a_1 = 12 + 3 - 1,21 = 13,79 \text{ см.}$$

Проведені розрахунки доводять, що має місце наступна залежність $x_B > x_A$. З врахуванням останньої нерівності, щоб знайти осьовий момент опору по перерізу варто прийняти, що $x_{\max} = x_B = 13,79 \text{ см}$.

Тоді маємо

$$W_{Z_{\min}} = \frac{I_Z}{x_B} = \frac{4630}{13,79} = 335,7 \text{ см}^3.$$

Після цього можемо провести розрахунок нормального напруження в крайній точці небезпечного перерізу

$$\sigma_{\max} = \frac{M_a}{W_{Z_{\min}}} = \frac{2800}{335,7 \cdot 10^{-6}} \approx 83,4 \cdot 10^6 \text{ Па} = 83,4 \text{ МПа.}$$

Для виготовлення стояка глибокорозпушувача використовується Сталь 45, що володіє достатніми характеристиками міцності та зносостійкості для таких робочих органів. За даними довідкової літератури [29], допустиме граничне напруження цього матеріалу при циклічних динамічних знакозмінних навантаженнях дорівнює $[\sigma] = 125 \text{ МПа}$.

Тепер можемо порівняти нормативне значення максимального напруження стояка лапи із розрахунковим його значенням $\sigma_{\max} < [\sigma]$. Виконання даної нерівності підтверджує, що стояк чизельної лапи з геометричними параметрами $b = 30 \text{ мм}$; $h = 240 \text{ мм}$, із сталі 45 є працездатним і може ефективно експлуатуватися на різних ґрунтах

5. Охорона праці

Глибокородзпушувач, удосконалення якого є предметом даної роботи, повинен комплексно задовольняти вимоги ДСТУ 2189-93. Робота на зібраному ґрунтообробному агрегаті має бути цілком безпечною і комфортною, а умови його виготовлення, збирання, регулювання і експлуатації повинні повністю відповідати встановленим вимогам з охорони праці та техніки безпеки для аналогічних робіт [33, 34].

Складаючи ґрунтообробний агрегат, виконуючи його налаштування і проводячи операції обробітку ґрунту в полі, на працівників можуть діяти цілий ряд шкідливих та небезпечних виробничих чинників фізичного походження. Серед цих чинників слід виділити найбільш характерні для операцій обробітку ґрунту чизельними глибокородзпушувачами: рухомі та обертові елементи конструкції, підвищений рівень шуму, вібрація на робочому місці оператора під час виконання робіт або обслуговування, підвищена запиленість робочої зони, високий вміст вихлопних газів або димність повітря, відхилення температури повітря від допустимих значень, некомфортна вологість повітря, надмірна швидкість повітряних потоків, гострі кромки конструктивних елементів, що можуть спричинити травмування персоналу, та інші фактори.

Задля зменшення впливу цих та інших шкідливих чи небезпечних виробничих чинників треба розробити спеціальні заходи, які варто реалізовувати для безпечної роботи з агрегатом за будь-яких умов.

Для дієвого й безпечного вконання налаштувань скомплектованого ґрунтообробного агрегату він мусить бути додатково обладнаним тим інструментом, зокрема спеціальним, якого немає в стандартному інструменті в тракторі. З метою здійснення ручного очищення робочих частин від налиплого ґрунту, намотаних і забитих рослинних залишків тощо, глибокородзпушувач має бути оснащений спеціальним чистиком, робота яким

дозволить проводити безпечно очищення робочих органів і інших елементів машини.

На етапі проектування агрегату забезпечується таке розташування основних робочих органів, щоб їх обслуговування, регулювання та очищення було максимально безпечним і зручним для оператора.

Важливим аспектом безпеки є колірне оформлення глибокорозпушувача. Фарбування машини в контрастний до робочого середовища колір забезпечує її постійну видимість під час експлуатації та дозволяє оцінювати потенційні ризики. Конструктивні елементи, які потребують візуального контролю під час роботи та можуть створювати відблиски, покриваються матовою фарбою або спеціальними наліпками для захисту від відбитого сонячного випромінювання. На рамі та конструктивних елементах машини мають бути розміщені інформаційні таблички, знаки безпеки та написи, що попереджають персонал про можливі аварійні ситуації при експлуатації ґрунтообробного агрегату.

Встановлюються також вимоги до стійкості чизельного глибокорозпушувача у відчепленому стані – машина повинна зберігати стійкість при прикладенні зусилля до 200 Н. При транспортуванні глибокорозпушувача необхідно дотримуватися правил дорожнього руху та забезпечити відповідність вимогам до сільськогосподарської техніки щодо встановлення світловідбивачів, допустимої ширини габариту, нанесення знака обмеження швидкості з лівого заднього боку тощо. Конструкція глибокорозпушувача має дозволяти агрегування з трактором одним оператором. При регулюванні механізмів і конструктивних елементів зусилля на переміщення органів керування не повинно перевищувати 200 Н.

З позиції пожежної безпеки чизельний ґрунтообробний агрегат має повністю відповідати вимогам ДСТУ ISO 6309:2007, ДСТУ ІЕС 80416-1:2005, ДСТУ ISO 3864-1:2005 [34].

6. Висновок

В рамках кваліфікаційної роботи проведено розрахунок та вдосконалення агротехнології вирощування соняшнику, наведено ботаніко-господарську характеристику культури та сфери її застосування, обґрунтовано технологічні режими та кінематичні характеристики агрегату Т-150К + ПЧ-4,5. Результати дослідження підтверджують, що впровадження безполицевого обробітку за рекомендованими параметрами роботи та конструктивними рішеннями забезпечить реалізацію ґрунтозахисної системи землеробства зі зниженням енергетичних витрат на основний обробіток.

У науковій частині роботи здійснено аналіз існуючих досліджень у галузі вдосконалення робочих органів глибокорозпушувачів. Встановлено, що одним із напрямів інтенсифікації процесу, який забезпечує покращення руйнування ґрунтових монолітів при зниженій енергоємності, є застосування долота вдосконаленої конфігурації як основного елемента дезагрегації необробленого ґрунту. Запропоновано використання увігнуто-опуклої форми долота, що забезпечує швидкий перехід від концентрації стискаючих напружень у передній частині до розтягуючих напружень на опуклій поверхні задньої частини. Виконано необхідні конструкторські розрахунки, які підтверджують працездатність розробленої конструкції з підвищенням якості роботи та загальної продуктивності модернізованого ґрунтообробного агрегату.

Список використаної літератури

1. Статистичний збірник «Рослинництво України за 2020 рік» – К.: Державний комітет статистики України, 2020. – 196 с.
2. Наукові основи агропромислового виробництва в зоні Степу України / За ред. М.В. Зубця. – К.: Аграрна наука, 2010. – 986 с.
3. Інноваційні ресурсозберігаючі технології: ефективність в умовах різного фінансового стану агроформувань: [монографія] / за ред. Професора Г.Є. Мазнева. – Харків: Вид-во «Майдан», 2015. – 592 с.
4. Технології вирощування зернових і технічних культур в умовах Лісостепу України / За ред. П.Т. Саблука, Д.І. Мазоренка, Г.Є. Мазнева. – [2-е вид., доп.]. К.: ННЦ ІАЕ, 2008. – 720 с.
5. Технологія виробництва продукції рослинництва: Навч. посіб. Ч.2 / Мельник С.І., Муляр О.Д., Кочубей М.Й., Іванцов П.Д. К.: Аграрна освіта, 2010. – 405 с.
6. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві: Підручник / С.М. Каленська, Л.М. Єрмакова, В.Д. Паламарчук та ін.. Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2015. – 448 с.
7. Гаврилюк М.М. Олійні культури в Україні: Навчальний посібник / М.М. Гаврилюк, В.Н. Салатенко, А.В. Чехов, М.І.Федорчук / за редакцією В.Н. Салатенко. – 2-ге видання перероблене і доповнене. К.: Основа, 2008. – 420 с.
8. Зінченко О. І., Салатенко В. Н., Білоножко М. А.;. Рослинництво: Підручник / за ред. О. І. Зінченка. К.: Аграрна освіта, 2001. — 591 с.
9. Довідник з машиновикористання в землеробстві / За ред. В.І. Пастухова Харків: Веста, 2001. – 347 с.
10. Машина для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Х.: Мачулін, 2016. – 244 с.

11. Практикум із землеробства: Навчальний посібник / М.С. Кравченко, О.М. Царенко, Ю.Г. Міщенко та ін.: За ред. М.С. Кравченка і З.М. Томашівського. К.: Мета, 2003. – 320 с.
12. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
13. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: Підруч. у 2 т: Т. 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. А.В. Рудя. К. Агроосвіта, 2012. – 434 с.
14. Кравчук В.І., Мельник Ю.Ф. Машини для обробітку ґрунту та сівби/ МінАПК України, Дослідницьке, – 2009. – 288 с.
15. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування, Книга 1. Машини для рільництва / за ред. Черновола М.І. К. Урожай, 2001. – 384 с.
16. Механізація технологічних процесів в землеробстві: Навчально-методичний комплекс: навч. посіб. / С.М. Грушецький, І.М. Бендера, Т.Д. Іщенко та ін.. Кам'янець-Подільський : ФОП Сисин О.В., 2011. – 352 с.
17. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсів «Технологія механізованих робіт в рослинництві» та «Машиновикористання в рослинництві» для студентів спеціальностей 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування» / Укладачі: В.М. Сало, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, Д.І. Петренко, П.Г. Лузан. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – 170 с.
18. Ільчук М.М., Зрібняк Л.Я., Мельник С.І. Організація і планування сільськогосподарського виробництва: Підручник. К.: Вища освіта, 2013. – 535 с.

19. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі : навчальний посібник / Коновалюк О. В., Колісник М. В., Васюк С. М., та ін., Київ : Науково-Методичний Центр ВФПО, 2025.– 202 с.
20. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.
21. Машиновикористання у рослинництві. Технологічний регламент використання машин у рослинництві: Навчальний посібник. / Гарькавий А.Д., Калетнік Г.М., Мельник І.І. та ін. – ВДАУ, НУБІП, ЛДАУ, 2009. – 160 с.
22. Фортуна В.Й., Миронюк С.К. Технологія механізованих сільськогосподарських робіт. – К.: Вища школа, 1991. – 316 с.
23. Лімонт А.С., Мельник І.І., Малиновський А.С. і ін. Практикум із машиновикористання в рослинництві: Навчальний посібник /. За ред. І.І. Мельника. – Київ: Кондор. – 2004. – 284 с.
24. Марченко В.В. Механізація технологічних процесів у рослинництві: Навчальний посібник. – Київ: «Кондор», 2007. – 332 с.
25. Гречкосій В.Д., Погорілець О.М., Ревенко І.І. та ін. Довідник сільського інженера / За ред. В.Д. Гречкосія. – 2-е вид., перероб. і доповнене. – К.: Урожай, 1991. – 400 с.
26. Войтюк Д.Г., Аніскевич Л.В., Іщенко В.В. Сільськогосподарські машини: підручник / за ред. Д.Г. Войтюка. К: «Агроосвіта» , 2015. – 679 с.
27. Ветохін В.І. Системні та фізико-хімічні основи проектування розпушувачів ґрунту: Дис. на здобуття ступеня канд. тех. наук: 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / В.І. Ветохін. Глеваха, – 2010.
28. Надикто В.Т. Математичне моделювання функціонування машиннотракторних агрегатів / В.Т. Надикто, В.М. Кюрчев //Збірник наукових праць ТДАТУ. Мелітополь, 2010. –Вип.11, т.7.

29. Бучок В.С. Трактори і автомобілі: Навчальний посібник. К.:Аграрна освіта, 2008. – 331 с.
30. Войтюк Д.Г., Дубровін В.О., Іщенко Т.Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини// За ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.
31. Войтюк Д.Г., Яцун С.С., Довжик М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку/ За ред. Д.Г. Войтюка. Суми: ВТД Університетська книга, 2006. – 480 с.
32. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т.1 (частина1). Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. – Харків: ОКО, 2001. – 444 с.
33. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
34. Пістун І.П., Хом'як Й.В., Хом'як В.В. Охорона праці в галузі сільського господарства: Навчальний посібник. Суми: Університетська книга, 2009. – 365 с.
35. Основи охорони праці: Підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.
36. Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності Н7 «Агроінженерія» за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» / уклад.: Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.М. Мороз, Ю.В. Мачок, О.В. Нестеренко. М-во освіти і науки Укр., Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025.– 47 с.

Додатки