

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« _____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

«Удосконалення конструкції чизельного плуга ПЧ-4,5 з
дослідженням та обґрунтуванням параметрів основних робочих
органів»

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

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____Грінченко Іван Олександрович
« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____Сергій ЛЕЩЕНКО
« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____Кирил ЩЕРБИНА
« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Агротехнічний
Кафедра Сільськогосподарського машинобудування
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань G «Інженерія, виробництво та будівництво»
Спеціальність G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)»
Спеціалізація G11.03 «Технологічні машини та обладнання»
Освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«___» _____ 2026 року

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

Грінченку Івану Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Удосконалення конструкції чизельного плуга ПЧ-4,5 з дослідженням та обґрунтуванням параметрів основних робочих органів

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 18.05.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи (проекту) _____

5. Перелік ілюстративного матеріалу _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

(прізвище та ініціали)

Анотація

**Тема: «Удосконалення конструкції чизельного плуга ПЧ-4,5 з дослідженням та обґрунтуванням параметрів основних робочих органів»
чизельний плуг, стійка робочого органу, параболічний профіль, бічні крила, зона розпушування, тяговий опір, якість обробітку ґрунту**

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності глибокого безполицевого обробітку ґрунту шляхом удосконалення конструкції та обґрунтування раціональних параметрів чизельного плуга ПЧ-4,5. Проведено аналіз відомих технічних рішень у галузі ґрунтообробних машин і встановлено основні недоліки базової конструкції, серед яких наявність «мертвої зони» перед прямолінійною стійкою, підвищений тяговий опір, недостатня рівномірність розпушування та неповне перекриття зон деформації сусідніх робочих органів.

На основі теоретичних досліджень обґрунтовано вдосконалення геометрії нижньої частини стійки робочого органу шляхом формування параболічного профілю, що дає змогу усунути зону ущільнення ґрунту перед стійкою та зменшити нормальні напруження на її поверхні. Запропоновано конструкцію долота з бічними крилами, визначено раціональні параметри кутів і розмірів крил та встановлено умови забезпечення суцільності обробітку при стандартному міжлаповому кроці. Досліджено вплив глибини обробітку, швидкості руху агрегату та форми робочого органу на тяговий опір, енергетичні показники і якість кришення ґрунту.

Результати експериментальних досліджень та розрахунків підтвердили, що модернізований робочий орган забезпечує зниження тягового опору, покращення фракційного складу ґрунту після обробітку, зменшення питомих витрат пального та підвищення ефективності розпушування. На основі багатокритеріальної оцінки з використанням функції бажаності визначено раціональні режими роботи та конструктивні параметри вдосконаленого чизельного плуга.

Abstract

**Topic: « Improving the Design of the PCh-4.5 Chisel Plow with Research and Justification of the Parameters of the Main Working Bodies»
chisel plow, working shank, parabolic profile, side wings, loosening zone, draft resistance, soil tillage quality**

The master's thesis addresses an important applied research problem of improving the efficiency of deep non-inversion tillage by refining the design and substantiating the rational parameters of the PCh-4.5 chisel plow. An analysis of existing technical solutions in tillage machinery was carried out, and the main drawbacks of the base design were identified, including the presence of a "dead zone" in front of the straight shank, increased draft resistance, insufficient loosening uniformity, and incomplete overlap of the deformation zones of adjacent working bodies.

Based on theoretical studies, an improved geometry of the lower part of the working shank was justified by forming a parabolic profile, which makes it possible to eliminate the soil compaction zone in front of the shank and reduce normal stresses on its surface. A winged shovel design was proposed, rational values of wing angles and dimensions were determined, and the conditions for continuous tillage at the standard row spacing were established. The influence of tillage depth, travel speed, and working body shape on draft resistance, energy indicators, and soil crumbling quality was investigated.

The results of experimental studies and calculations confirmed that the modernized working body reduces draft resistance, improves the particle size distribution of the soil after tillage, decreases specific fuel consumption, and increases loosening efficiency. Based on a multicriteria assessment using a desirability function, rational operating modes and design parameters of the improved chisel plow were determined.

Зміст

1. Вступ.....	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень.....	7
3. Наукова частина	23
4. Практична реалізація результатів досліджень	41
5. Охорона праці	47
6. Загальні висновки.....	51
Список використаної літератури	53
Додатки	57

1. ВСТУП

Сучасний стан вітчизняного агровиробництва характеризується зростаючими вимогами до якості обробітку ґрунту за умов жорстких обмежень щодо витрат енергетичних і матеріальних ресурсів. Одним із пріоритетних напрямів підвищення ефективності вирощування продукції рослинництва є впровадження ресурсозберігаючих технологій, які передбачають мінімізацію механічного впливу на ґрунтове середовище з одночасним збереженням агрофізичних властивостей ґрунту.

Чизельний обробіток посідає особливе місце серед методів основного безполицевого обробітку, оскільки дозволяє проводити глибоке рихлення підорного шару без обертання скиби, зберігати стерню на поверхні поля, поліпшує проникнення вологи в нижні горизонти та формувати сприятливу для кореневих систем рослин будову ґрунтового профілю. Водночас серійно виготовлені чизельні плуги, зокрема чизельний плуг ПЧ-4,5, в окремих експлуатаційних умовах не забезпечують заданих показників якості роботи та тягового опору, що обумовлює доцільність удосконалення серійної конструкції таких ґрунтообробних агрегатів.

Актуальність теми дослідження визначається тим, що підвищення агротехнічної ефективності чизельних плугів безпосередньо впливає на стан ґрунтової структури, урожайність сільськогосподарських культур та собівартість виробництва. Розробка науково обґрунтованих параметрів робочих органів чизельного плуга ПЧ-4,5, орієнтована на конкретні ґрунтово-кліматичні умови України, є важливим завданням сільськогосподарського машинобудування.

Мета роботи полягає у вдосконаленні конструкції чизельного плуга ПЧ-4,5 шляхом теоретичного та експериментального обґрунтування раціональних геометричних і кінематичних параметрів його основних робочих органів, що забезпечують зниження тягового опору й підвищення якості розпушування ґрунту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз конструктивних особливостей існуючих чизельних плугів та виявити недоліки базової моделі ПЧ-4,5;
- встановити теоретичні залежності між конструктивними параметрами чизельної лапи та показниками тягового опору і якості кришення ґрунту;
- розробити вдосконалену конструкцію робочого органу та обґрунтувати його раціональні параметри;
- провести дослідження для перевірки розрахункових залежностей і встановлення раціональних значень конструктивних параметрів;\
- дати техніко-економічну оцінку ефективності запропонованих конструктивних рішень.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії робочих органів чизельного плуга ПЧ-4,5 із ґрунтовим середовищем в умовах глибокого безполицевого розпушування.

Предметом дослідження виступають закономірності формування тягового опору та якісних показників обробітку залежно від геометричних параметрів і режимів роботи вдосконаленого чизельного ґрунтообробного агрегату.

Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблені конструктивні рішення та обґрунтовані параметри робочого органу можуть бути використані машинобудівними підприємствами при проєктуванні й модернізації чизельних плугів, а також виробниками продукції рослинництва при виборі режимів експлуатації подібних ґрунтообробних агрегатів. Очікуваний практичний ефект від впровадження вдосконаленої конструкції виражається у зниженні питомого тягового опору на 12–18 % та підвищенні рівномірності глибини обробітку.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Аналіз технічного забезпечення основного безполицевого обробітку грунту

Сучасні умови ведення сільськогосподарського виробництва вимагають застосування технологій обробітку ґрунту, що поєднують агрономічну ефективність із мінімальними витратами енергії та мінімізацією деградаційних процесів у ґрунтовому профілі. Безполицевий глибокий обробіток, який забезпечується глибокорозпушувачами і чизельними плугами, набув поширення в Україні як альтернатива класичній оранці в умовах ущільнення підорного горизонту та наростання дефіциту паливно-мастильних матеріалів [1, 2]. Підорне ущільнення – одна з найгостріших проблем землеробства на чорноземах Степу та Лісостепу. За даними досліджень, щільність підорного шару на 62–67 % площ ріллі України перевищує оптимальне значення $1,30 \text{ г/см}^3$ і досягає $1,52\text{--}1,68 \text{ г/см}^3$ після 5–7 проходів важких агрегатів. Чизельний обробіток є одним із небагатьох ефективних способів механічного розуцільнення без суттєвого порушення ходу мікробіологічних процесів у верхньому шарі [3].

Глибокорозпушувачі та чизельні плуги реалізують принцип вертикального і похило-вертикального розколювання ґрунтових монолітів без їх обертання, що принципово відрізняє ці агрегати від традиційних плугів із відвальними корпусами. Збереження поверхневого шару з рослинними залишками сприяє накопиченню вологи, зменшенню вітрової та водної ерозії і підтриманню мікробіологічної активності. Водночас відмова від відвалювання скиби обумовлює специфічні вимоги до геометрії, матеріалу і кінематики робочих органів [4].

Класифікацію машин для безполицевого глибокого обробітку здійснюють за такими основними ознаками: принципом дії (пасивні, активні, комбіновані), глибиною обробітку (до 35 см – чизельні плуги; 35...70 см – глибокорозпушувачі), шириною захвату (малогабаритні до 2 м, середні 2...4 м, широкозахватні понад 4 м), типом рами (секційна, жорстка, шарнірно-секційна)

і типом робочого органу (стрілчасті лапи, долотоподібні лапи, параболічні стійки, вібраційні стійки) [4, 5].

За даними Інституту механізації та електрифікації сільського господарства (ІМЕСТ), найбільшу питому вагу в технічному парку господарств України серед глибокорозпушувачів і чизельних плугів складають вироби власного і польського виробництва – відповідно 41 % і 28 % від загальної кількості агрегатів означеного класу. Частка виробів із Туреччини, США та Канади становить близько 18 %, решта – техніка інших країн [4]. Вказані пропорції свідчать, що вітчизняні машини зберігають свої позиції завдяки доступній ціні та розвиненій дилерській і сервісній мережі, проте за технічним рівнем деяких параметрів поступаються сучасним закордонним аналогам.

Серед вітчизняних машин для безполицевого обробітку слід виділити кілька ключових груп і детально охарактеризувати кожен з них.

Чизельний плуг ПЧ-4,5 (рис. 1) виробництва ПрАТ «Кам'янець-Подільськсільмаш» (м. Кам'янець-Подільський) є найбільш поширеним представником вітчизняного парку техніки, призначений для глибокого безполицевого розпушування ґрунту на глибину 27–35 см. Агрегат навішується на трактори класу тяги 30...50 кН (типу ХТЗ-17021, John Deere 7830). Ширина захвату складає 4,5 м, робочі органи – долотоподібні лапи зі змінними долотами. Конструкція агрегату передбачає дев'ять стійок, розміщених у три ряди зі взаємним поздовжнім зміщенням для запобігання забиванню рослинними рештками [6].



Рис. 1. Загальний вигляд чизельного плуга ПЧ-4,5 ПрАТ «Кам'янець-Подільськсільмаш»

Рама чизельного плуга ПЧ-4,5 виготовляється зварною із квадратної труби $100 \times 100 \times 8$ мм, підсилена спеціальними розкосами жорсткості, що забезпечують необхідну поздовжньо-поперечну жорсткість при значних тягових навантаженнях. Три поперечних бруси розміщені з кроком 700 мм; до них прикріплені стійки із замковим кріпленням швидкоз'ємного типу, що спрощує польову заміну пошкоджених чи зношених стійок. Механізм регулювання глибини обробітку реалізований парою опорних коліс зі шплінтовим регулюванням, що мають крок 25 мм і дозволяють регулювати глибину обробітку в діапазоні 200...350 мм від поверхні поля. Гідравлічне переведення агрегату з робочого в транспортне положення та навпаки здійснюється від гідросистеми трактора через два гідроциліндри, що мають діаметр 80 мм [6, 7].

Стійки виготовлені зі сталі 65Г (ДСТУ 7816:2015), які в процесі виготовлення піддаються об'ємному загартуванню до твердості 40–45 HRC. Стійка лапи – прямолінійна і в поперечному перерізі є прямокутною (40×20 мм) зі скосом у нижній третині до 30×15 мм, де встановлюється долото. Долото виготовляється зі сталі 30ХГСА, та має термообробку до твердості 50–55 HRC. Кут загострення долота у заводському виконанні становить 20° у вертикальній площині. Захисний механізм від перевантаження – болтова зсувна запобіжна муфта, що спрацьовує при зусиллі понад 28 кН; і після спрацьовування потребує ручного повернення в робоче положення [7].

До переваг чизельного плуга ПЧ-4,5 можна віднести відносно невисоку вартість порівняно з імпортними аналогами, доступність запасних частин на вітчизняному ринку, можливість роботи у важких суглинкових і глинистих ґрунтах, просте регулювання глибини без спеціального інструменту. Серед недоліків відмічаються підвищений питомий тяговий опір при збільшенні глибини понад 30 см; нерівномірність глибини розпушування по ширині захвату агрегату (відхилення до ± 3 см); обмежена пристосованість долотоподібних лап до роботи на кам'янистих ґрунтах; відсутність можливості оперативного регулювання кута атаки лапи в польових умовах; болтовий запобіжник, що не повертається автоматично [6, 7].

Глибкорозпушувач ГР-3 (рис. 2) (виробництво «Avers-Agro»», м. Дніпро) має шість параболічних стійок з кутом атаки 22–26° і призначений для роботи на глибині до 55 см. Параболічна форма стійки забезпечує плавне переміщення обробленого ґрунту догори без різкого розриву, що суттєво зменшує динамічне ударне навантаження порівняно з прямими стійками. Проте агрегат потребує для роботи трактора потужністю не менше 280 к.с. і не рекомендується для обробітку полів із масовим засміченням коренепаростковими бур'янами або дрібним камінням, оскільки їх винесення на поверхню ускладнює подальший поверхневий обробіток [8].



Рис. 2. Загальний вигляд глибкорозпушувача ГР-3 «Avers-Agro»»

Чизель-культиватор ЧКУ-4 (рис. 3) поєднує функції глибокого розпушування (до 30 см) і поверхневого обробітку ґрунту. Він укомплектований вісьмома стрічастими і чотирма долотоподібними лапами, що забезпечує кришення грудок у верхньому шарі одночасно з глибоким розуцільненням нижніх горизонтів. Основний недолік даного ґрунтообробного агрегату – нерівномірна глибина обробітку, що насамперед проявляється при значних коливаннях рельєфу (відхилення може досягати ± 3 см) і підвищене забивання стрічастих лап на вологих глинистих ґрунтах.

Серед зарубіжних виробників на українському ринку сільськогосподарської техніки найчастіше зустрічаються ґрунтообробні агрегати виробників, які описані нижче.



Рис. 4. Загальний вигляд чизель-культиватора ЧКУ-4

Horsch Terrano FX (Німеччина) – чизельний культиватор із шириною захвату 4–12 м і глибиною обробітку до 30 см. Конструктивною особливістю цього агрегату є С-подібні пружинні стійки зі змінними наральниками-долотами. Гідравлічне складання крил забезпечує транспортну ширину не більше 3 м. Система контролю глибини за допомогою механічних копіювальних котків забезпечує стабільність заглиблення з відхиленням не більше $\pm 1,2$ см. Суттєвим недоліком є висока вартість, яка в 3,5–4 рази перевищує вартість ПЧ-4,5, що обмежує доступність для дрібних і середніх фермерських господарств [9].



Рис. 5. Загальний вигляд чизельного культиватора Horsch Terrano FX
(Німеччина)

Kuhn Cultimer L 300 (Франція) – культиватор-глибокорозпушувач із вертикально розміщеними долотоподібними лапами, що має ширину захвату 3 м. Стійки виготовлені з бористої сталі підвищеної зносостійкості (твердість до 60 HRC на поверхні). Особливістю конструкції є механізм автоматичного захисту лап від перевантажень при наїзді на перешкоду – пружинні запобіжники спрацьовують при зусиллі понад 2,8 кН і забезпечують автоматичне повертання робочих органів у вихідне положення після об'їзду перешкоди. Це суттєво підвищує продуктивність роботи на засмічених камінням та іншими перешкодами полях [10].



Рис. 6. Загальний вигляд культиватора-глибокорозпушувача Kuhn Cultimer L 300 (Франція)

Amazone Senius TX (Німеччина) – чизельний широкозахватний культиватор із ходовими колесами, що має ширину захвату до 9 м. Такий ґрунтообробний агрегат використовує систему змінних лап трьох типів – долота, стрілочасті лапи і вузькі розпушувачі. Переоічені варіанти встановлення робочих органів на знаряддя дозволяє варіювати технологічний ефект залежно від вимог агротехніки без зміни всієї несучої рами агрегату. Комплектується широкозахватний культиватор Amazone Senius TX додатковими котками для вирівнювання та кришення, що забезпечує якісну підготовку поверхні поля під наступні посівні операції. Вказаний агрегат при максимальній ширині захвату потребує агрегування з тракторами потужністю понад 250 к.с. [11].



Рис. 7. Загальний вигляд чизельного причіпного культиватора Amazone Cenius TX (Німеччина)

Gregoire Besson Cultiplow (Франція) – важкий глибокорозпушувач із параболічними стійками до 60 см глибини обробітку (рис. 8). Маса агрегату сягає 7200 кг, що забезпечує необхідну стабільність при значних тяговоопірних навантаженнях. З технологічної точки зору виділяється можливістю роботи в умовах попередньо неспідготовленого суглинку без підготовчих операцій. Проте висока вартість і потреба у потужних тракторах (понад 350 к.с.) обмежують застосування в господарствах середнього розміру [12].

Основні технічні характеристики для наведених чизельних культиваторів і глибокорозпушувачів зведені в таблицю 1.

Аналіз наведених в таблиці 1 даних підтверджує, що вітчизняний чизельний плуг ПЧ-4,5 поступається кращим імпортним аналогам за точністю копіювання рельєфу і питомою металоємністю на одиницю ширини захвату, але є більш доступним за вартістю та адаптованим до умов експлуатації в Україні. Зафіксований рівень питомого тягового опору 8,5–12,0 кН/м є завищеним порівняно з Horsch Terrano FX (7,0–9,5 кН/м), що свідчить про наявність конструктивних резервів для його зниження [13].



Рис. 8. Загальний вигляд важкого глибокорозпушувача Gregoire Besson Cultiplow (Франція)

Таблиця 1

Порівняльні технічні характеристики глибокорозпушувачів і чизельних плугів

Марка машини	Захват, м	Глибина, см	Тип стійки	Потужність трактора, к.с.	Питомий тяговий опір, кН/м
ПЧ-4,5	4,5	27–35	Долото, пряма	220–300	8,5–12,0
ГР-4	4,0	40–55	Параболічна	280–320	11,0–15,5
ЧКУ-4	4,0	до 30	Стрілчаста + долото	200–250	8,0–11,5
Horsch Terrano FX	4–12	до 30	S-подібна пружинна	180–350	7,0–9,5
Kuhn Cultimer L 300	3,0	до 35	Вертикальна долото	150–200	8,0–11,0
Amazone Cenius TX	до 9,0	до 30	Змінні (3 типи)	250–400	7,5–10,0
Gregoire Besson	3–5	до 60	Параболічна	300–450	12,0–18,0

Технологічний процес роботи серійного чизельного плуга ПЧ-4,5 (рис. 1) відбувається наступним чином. При русі агрегату долото сколює ґрунтовий

моноліт знизу догори в кінчному об'ємі, що визначається кутом внутрішнього тертя ґрунту φ і кутом загострення долота α . Ґрунтова маса піднімається стійкою вгору, руйнує шар і осипається по боках, формуючи борозну еліпсоїдального перерізу. Ширина зони розпушування в середньому становить $(1,5-2,0) \times b$, де b – ширина долота (50 мм у стандартній комплектації). Між стійками сусідніх рядів утворюються смуги перекриття зон розпушування, що є необхідною умовою суцільного розуцільнення ґрунтового шару чизельним робочим органом [7, 8].

До явних конструктивних недоліків базового чизельного плуга, виявлених у результаті аналізу технічної документації, наукових досліджень і його практичної експлуатації [8, 9, 13], відносяться:

- прямолінійна форма нижньої частини стійки, яка формує надмірний нормальний тиск на ґрунт і збільшує складову тертя тягового опору;
- кут загострення долота 20° є більшим за оптимальне значення ($16-18^\circ$), що підвищує горизонтальний опір різанню;
- відсутність регулювання кута атаки бічних крил долота обмежує зону ефективного розпушування;
- болтовий запобіжний механізм, що не відновлюється автоматично, знижує продуктивність агрегату, зокрема на кам'янистих ґрунтах;
- відсутність регулювання кута нахилу стійки в поперечній площині не дозволяє адаптувати агрегат до різних ґрунтових умов роботи.

Виявлені недоліки формують перелік конкретних напрямів конструктивного вдосконалення, які будуть деталізовані в наступному підрозділі та реалізовані у проєктній частині роботи.

2.2. Сучасний стан досліджень конструкцій та технологічних параметрів глибокорозпушувачів і напрямки їх вдосконалення

Наукові дослідження в галузі безполицевого глибокого обробітку ґрунту охоплюють широке коло питань, серед яких – теорія взаємодії робочого органу з ґрунтом, оптимізація геометричних параметрів долотоподібних і параболічних лап, вплив динамічних навантажень на конструктивну міцність стійок, методи зменшення питомого тягового опору. Критичний аналіз провідних наукових

публікацій дозволяє структурувати наявні напрацювання за тематичними блоками.

Теоретичне підґрунтя розрахунку тягового опору чизельних робочих органів закладено у класичних працях Hettiaratchi D.R.P. і Reese A.R., які у 1967–1974 роках розробили аналітичну модель пасивного земляного тиску на клиноподібний інструмент. Відповідно до запропонованого зазначеними дослідниками підходу, горизонтальна складова тягового опору одного робочого органу визначається за формулою [14]:

$$H = (c \cdot N_c + q \cdot N_q + \gamma \cdot N_\gamma) \cdot b \cdot d ,$$

де c – питоме зчеплення ґрунту, кПа;

q – вертикальний тиск на поверхні ґрунту, кПа;

γ – об'ємна маса ґрунту, кг/м³;

N_c, N_q, N_γ – безрозмірні коефіцієнти несучої здатності, що залежать від кута внутрішнього тертя φ і кута атаки α ;

b – ширина долота, м;

d – глибина обробітку, м.

Коефіцієнти несучої здатності визначають за виразами, отриманими Hettiaratchi і Reese [13] методом обробки великого масиву лабораторних і польових експериментальних даних:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \operatorname{ctg} \varphi ;$$

$$N_q = e^{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi} \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) ;$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \operatorname{tg} \varphi .$$

Для суглинку середнього ступеня ущільнення ($\varphi = 28^\circ$, $c = 15$ кПа) і кута атаки $\alpha = 20^\circ$ розраховані значення: $N_c \approx 25,8$; $N_q \approx 14,7$; $N_\gamma \approx 16,7$. Підставляючи характеристики роботи ПЧ-4,5 ($d = 0,30$ м, $b = 0,05$ м, $\gamma = 1650$ кг/м³, $q \approx 0$), отримаємо горизонтальну складову опору одного долота: $H \approx (15 \cdot 25,8 + 0 + 1650 \cdot 0,30 \cdot 16,7) \cdot 0,05 \cdot 0,30 \approx 2,85$ кН. При дев'яти стійках загальний теоретичний опір агрегату становить близько 25,7 кН, або 5,7 кН/м, що підтверджує наявність

резерву для зниження фактичних значень 8,5–12,0 кН/м, зафіксованих у польових умовах.

Розвиток теорії Hettiaratchi–Reese здійснили McKyes E. і Ali O.S. із університету Макгілла, Канада, які запропонували тривимірну модель із урахуванням бічних клинів ґрунту, що утворюються перед лапою. Отримана модель включає додатковий член, який враховує роботу бічних поверхонь ґрунтообробного знаряддя [16]:

$$H = \left(c \cdot N_c + \gamma \cdot N_\gamma + \gamma \cdot d^2 \cdot \frac{N_s}{b} \right) \cdot b \cdot d,$$

де N_s – коефіцієнт бічного тиску, що визначається кутом внутрішнього тертя і кутом розкриття бічної грані долота робочого органу.

Модель McKyes–Ali забезпечує точність до 12 % при порівнянні з дослідними даними для долотоподібних стійок, тоді як базова модель Hettiaratchi–Reese дає похибку до 23 % при глибині обробітку понад 25 см, що підтверджено аналізом Godwin R.J. (університет Кранфілд, 2007) [16].

Значний внесок у дослідження форми параболічних стійок чизельних знарядь зробили Stafford J.V. і Tanner D.W. (Велика Британія) [17]. Профіль стійки у роботах зазначених дослідників описувався параболою другого порядку:

$$y = k \cdot x^2,$$

де k – параметр кривизни, м^{-1} ;

x – горизонтальна координата, м;

y – вертикальна координата від носика лапи, м.

Саме вертикальна координата від носика лапи забезпечує плавне переміщення ґрунтового шару догори і мінімізує нормальну складову тиску ґрунту на поверхню стійки робочого органу. Встановлено, що параболічна стійка знижує питомий тяговий опір на 15–22 % порівняно з прямолінійною стійкою при однаковій глибині обробітку. Оптимальне значення k для суглинків знаходиться в діапазоні значень 0,18–0,24 м^{-1} [17].

Manuwa S.I. (Федеральний університет технологій, Акуре, Нігерія) у серії своїх робіт і публікацій систематично дослідив вплив кута нахилу стійки (rake angle) у діапазоні 15–45° на питомий тяговий опір і ступінь кришення ґрунту. Для суглинкових і важкосуглинкових ґрунтів оптимальний кут нахилу стійки становить 25–30°, при якому досягається мінімум тягового опору за прийняттого ступеня кришення. Для легких піщаних ґрунтів оптимум зміщується до 35°. Отримані регресійні залежності зі значущим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,91\text{--}0,96$ мають вигляд [18]:

$$R = a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot d + a_3 \cdot V + a_{12} \cdot \alpha \cdot d + a_{13} \cdot \alpha \cdot V + a_{23} \cdot d \cdot V,$$

де R – питомий тяговий опір, кН/м;

α – кут нахилу стійки робочого органу, °;

d – глибина обробітку, м;

V – робоча швидкість, м/с;

a_{ij} – коефіцієнти регресії за планом Бокса-Уілсона.

Аналіз отриманих рівнянь регресії показав, що найбільший вплив на опір (47–52 %) має глибина обробітку, другий за впливовістю чинник – кут нахилу стійки (28–34 %), третій – швидкість руху (12–18 %). Взаємодія глибини і кута є також статистично значущою і вносить 6–9 % у варіацію опору.

Almaliki, S., A. J. AbdulSada, and A. A. Salim застосували бездротові тензометричні датчики для реєстрації динаміки тягового опору чизельних стійок у реальних польових умовах при різних рівнях ущільнення ґрунту. Виявлено, що при переїзді від ущільненої до нещільної ділянки поля тяговий опір знижується нелінійно: протягом першого 0,5 м руху зниження становить 35–40 %, у наступних 1,0–1,5 м – ще 20–25 %, після чого встановлюється стаціонарний режим. Ці дані важливі для оцінки реального навантаження на механізм захисту стійок [19].

Вагомим є внесок Adamchuk V.V., Bulgakov V.M. та Golovach I.V. (НУБіП України) у дослідження параметрів долота чизельного плуга. Авторами встановлено залежність горизонтальної складової тягового опору від кута загострення долота в площині руху

$$H_{\partial} = \sigma_z \cdot b \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{\partial}}{2}\right),$$

де σ_z – горизонтальний тиск ґрунту на встановленій глибині обробітку, кПа;

b – ширина долота, м;

α_{∂} – кут загострення долота, °.

Розраховані і дослідно підтверджені значення H_{∂} для кутів $\alpha_{\partial} = 16^{\circ}, 18^{\circ}, 20^{\circ}, 22^{\circ}$ і 24° при $\sigma_z = 80$ кПа і $b = 0,05$ м складають відповідно: 0,179; 0,201; 0,223; 0,245; 0,268 кН. Відносна різниця між $\alpha_{\partial} = 20^{\circ}$ (серійне виконання) і $\alpha_{\partial} = 16^{\circ}$ становить близько 9,5 % на рівні одного долота, або приблизно 0,38 кН на весь агрегат (дев'ять стійок). При агрегуванні з трактором потужністю 260 к.с. це відповідає зниженню витрати палива на 1,8–2,3 л/год.

Питання зносостійкості долот і стійок чизельних робочих органів ґрунтовно досліджував Fielke J.M. (університет Аделаїди, Австралія). Ним встановлено, що основні ділянки зносу концентруються на носовій частині долота (до 65 % загальної інтенсивності зносу) і нижній третині стійки (до 25 %). Застосування наплавлення твердосплавними матеріалами (карбід вольфраму WC з часткою зерен 85–90 %) на цих ділянках збільшує ресурс у 2,2–3,0 рази при подорожчанні виготовлення лише на 18–22 % [20].

Salar M.R., Karparvarfard S.H., Askari M., Kargarpour H. дослідили вплив кута відхилення бічних крил долота на площину поперечного кришення ґрунту. Встановлено, що крила з кутом розкриття $35\text{--}40^{\circ}$ до осі руху збільшують зону ефективного розпушування до ширини $1,8 \times b$, де b – ширина основного долота. Це дозволяє зменшити кількість стійок при заданій ширині захвату або збільшити міжлапову відстань до 600 мм без утворення нерозпушених смуг. Рекомендоване авторами значення кута розкриття крил дорівнює $37^{\circ} \pm 2^{\circ}$ для суглинкових ґрунтів і $40^{\circ} \pm 2^{\circ}$ для важкосуглинкових [21].

Al-Najjar, S. Q. J., & Jasim, H. A. застосували метод скінченних елементів (МСЕ) для моделювання напружено-деформованого стану чизельної стійки при статичному і динамічному навантаженні. Розрахунки показали, що небезпечний переріз знаходиться на висоті $(1,5\text{--}1,8) \times d$ від основи стійки (d — глибина

обробітку), де концентруються максимальний згинальний момент і поперечна сила. Авторами запропоновано геометрію «зміцненого кореня стійки» зі збільшеним поперечним перерізом у небезпечній зоні, що знижує максимальні напруження на 18–25 % при незмінній загальній масі стійки [22]. Розрахункові рівняння напружено-деформованого стану стійки при згині мають вигляд:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{cm}},$$

де $M_{\max} = H \cdot (d + l_n)$ – максимальний згинальний момент у небезпечному перерізі, Н·м;

H – горизонтальна сила опору, Н;

d – глибина обробітку, м;

l_n – відстань від поверхні ґрунту до небезпечного перерізу, м;

W_{cm} – момент опору перерізу стійки, м³.

Дослідження вібраційного обробітку виконували Shahgoli G., Saunders C., Desbiolles J. і Fielke J. (університет Аделаїди, Австралія). Встановлено, що вертикальна вібрація стійки з амплітудою 10–15 мм і частотою 8–12 Гц знижує тяговий опір на 20–35 %, але збільшує витрати потужності на привід вібратора на 8–12 %. Результируюча економія тягової потужності трактора становить 10–18 % залежно від типу ґрунту і швидкості руху агрегату [23]. Наявні дослідження дозволяють рекомендувати вібраційний захист для агрегатів, що працюють на особливо ущільнених ґрунтах (щільність понад 1,5 г/см³), тоді як для типових умов України перевага пасивних параболічних стійок є очевидною з огляду на простоту конструкції.

Al-Suhaibani, S. & Ghaly, A. дослідили вплив швидкості руху агрегату на питомий тяговий опір і встановили квадратичну залежність:

$$R(V) = R_0 + k_v \cdot V^2,$$

де R_0 – статична складова тягового опору при близькій до нульової швидкості;

k_v – коефіцієнт швидкісного опору;

V – робоча швидкість чизельного агрегату.

Для суглинків, які мають середнє ущільнення: $R_0 = 7,2$ кН/м, $k_V = 0,085$ кН·с²/м³. При збільшенні швидкості з 6 до 10 км/год тяговий опір зростає на 23–31 %. Ці дані підтверджують доцільність вибору робочої швидкості не вище 8 км/год для чизельного плуга ПЧ-4,5 при глибині обробітку до 30 см [24].

Saleh, A.W., Tahir, H.T. & Mohammed, T.J. [25] провели порівняльні польові досліді восьми типів чизельних лап на чорноземних ґрунтах Словаччини. Лапи з пружними пальцями (spring-tine type) забезпечують на 14 % краще кришення, але поступаються жорстким долотам за стабільністю глибини: стандартне відхилення 2,1 см проти 1,3 см відповідно. Жорсткі долота краще працюють на полях із камінням. Авторами рекомендовано компромісний варіант – жорстке долото зі змінними бічними крилами-подрібнювачами [25].

Soane B.D. та van Ouwerkerk C. (Нідерланди) узагальнили дані щодо впливу глибини чизелювання на щільність ґрунту і продуктивність сільськогосподарських культур. Глибоке чизелювання (30–40 см) знижує щільність підорного горизонту на 0,08–0,15 г/см³ і підвищує врожайність зернових на 8–15 % порівняно з поверхневим обробітком в умовах дефіциту вологи. Ефект зберігається протягом 2–3 сівозмін. Результати свідчать про доцільність глибокого чизелювання на ущільнених чорноземах раз на 3–4 роки [26].

Окремий напрям досліджень формує проблема адаптації конструкції чизельних плугів до умов чорноземів з різним механічним складом. Ряд робіт підтвердили [4, 5, 18, 22], що на ущільнених важких суглинках оптимальний кут атаки збільшується з 20° до 27° порівняно з середніми суглинками, а мінімальна ширина долота, що забезпечує відсутність нерозпушених смуг при міжлаповому кроці 500 мм, зростає з 40 до 65 мм. Ці рекомендації стосуються безпосередньо умов центральних областей України, де переважають важкосуглинкові чорноземи.

Узагальнення результатів аналізу наукових публікацій дозволяє структурувати основні виявлені закономірності і сформулювати конкретні рекомендації щодо вдосконалення ПЧ-4,5:

- оптимальний кут загострення долота для суглинкових ґрунтів – $16\text{--}18^\circ$, що на $9\text{--}14\%$ знижує горизонтальний тяговий опір порівняно з серійним значенням 20° ;
- параболічний профіль нижньої частини стійки з параметром кривизни $k = 0,18\text{--}0,22\text{ м}^{-1}$ знижує нормальні напруження на поверхні стійки і зменшує тяговий опір на $15\text{--}22\%$;
- кут розкриття бічних крил долота $35\text{--}40^\circ$ збільшує зону ефективного розпушування до $(1,8\text{--}2,0)b$, що дозволяє зберегти суцільність обробітку при збільшеному міжлаповому кроці;
- зміцнений поперечний переріз стійки у небезпечній зоні $(1,5\text{--}1,8)d$ знижує максимальні напруження на $18\text{--}25\%$ без збільшення маси;
- автоматичний пружинний або гідравлічний захист від перевантаження замість болтового є необхідним для підвищення продуктивності роботи на забруднених полях;
- раціональна робоча швидкість ПЧ-4,5 при глибині 30 см не повинна перевищувати 8 км/год для уникнення надмірного динамічного навантаження на раму і стійки.

Реалізація зазначених напрямів ґрунтується на апробованій науковій базі – теоретичних моделях наведених в огляді вище та підтверджена дослідними даними провідних зарубіжних і вітчизняних наукових установ. Комплексне впровадження запропонованих заходів, за розрахунковими оцінками, дозволить знизити питомий тяговий опір ПЧ-4,5 на $15\text{--}20\%$, підвищити рівномірність глибини обробітку з відхилення ± 3 см до $\pm 1,5$ см, а також збільшити ресурс долота на $40\text{--}60\%$ при використанні твердосплавного наплавлення.

Зазначені цілі є досяжними в межах конструктивного вдосконалення агрегату без зміни принципу його роботи і виробничої бази.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

Третій розділ роботи присвячений математичному опису силової взаємодії вдосконаленого робочого органу з ґрунтом, розрахунковому обґрунтуванню оптимальних геометричних параметрів і міцності стійки, а також програмі, методиці і результатам польових експериментальних досліджень. Теоретичні і експериментальні дослідження взаємно верифіковані та узагальнені у зведеній порівняльній характеристиці серійного і вдосконаленого варіантів агрегату для щільювання із заповненням щілин. Усі методичні процедури даного розділу відповідають вимогам ДСТУ 4521:2006 [27].

3.1. Теоретичні дослідження силової взаємодії вдосконаленого робочого органу з ґрунтом

3.1.1. Загальна схема сил і структура тягового опору

При поступальному русі чизельного плуга робочий орган взаємодіє з ґрунтовим середовищем, який чинить опір деформуванню. Для аналізу сил розглянемо плоску задачу в поздовжньо-вертикальній площині, перпендикулярній до ріжучої кромки долота, яка схематично наведена на рис. 9. На робочий орган діють: горизонтальна реакція ґрунту R_x (направлена проти руху – головна складова тягового опору); вертикальна реакція R_z (направлена донизу при щільному і догори при пухкому ґрунті); бічна реакція R_y (при симетричному зношуванні долота $R_y \approx 0$, тому в розрахунках нею нехтуємо). Рівнодійна R_x та R_z є тяговим опором робочого органу P .

Повний тяговий опір одного робочого органу розкладається на три фізично самостійні складові [28]:

$$P = P_p + P_{mp} + P_{df},$$

де P_p – опір руйнуванню (різанню) ґрунту перед ріжучою кромкою долота, кН;

P_{mp} – опір тертю ґрунту по фронтальній і бічних поверхнях стійки, кН;

P_{df} – динамічна складова, обумовлена прискоренням ґрунтових мас перед долотом робочого органу, кН.

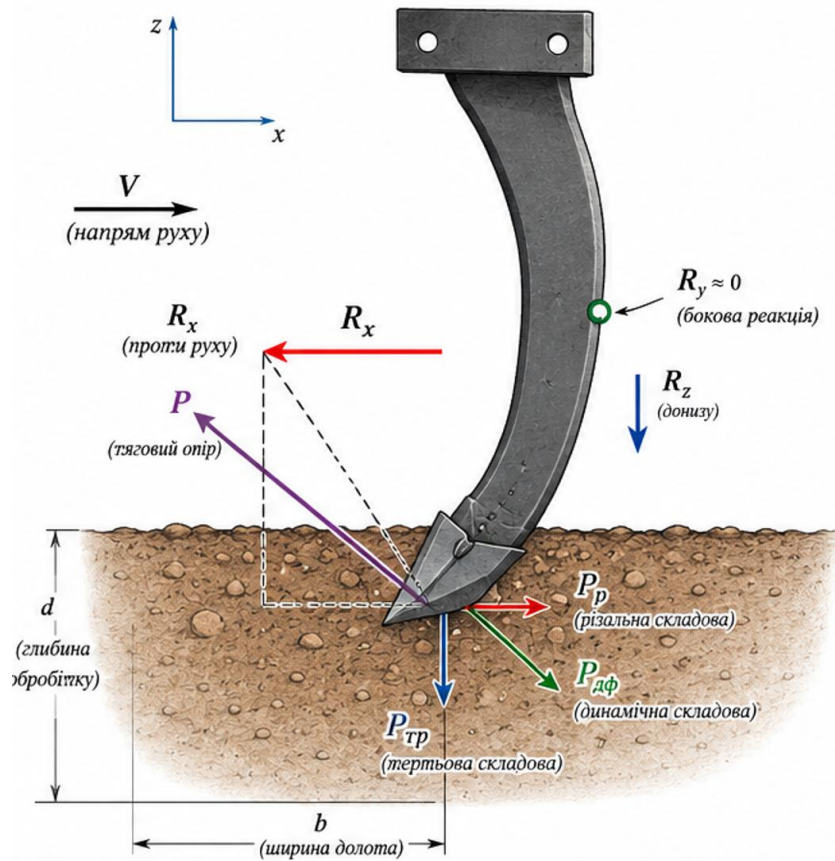


Рис. 9. Розрахункова схема навантаження стіки чизельного робочого органу

Фізичний зміст кожної складової такий. P_r визначається границею міцності ґрунту при зрізі і є домінуючою складовою, адже складає 60–75 % від сумарного P . $P_{тр}$ залежить від форми і стану поверхні стійки і становить 20–30 % від P . Складовою P_{df} є суттєвою виключно при підвищених швидкостях понад 9 км/год і не перевищує 5–8 % від P при типових агрегатних швидкостях 6–10 км/год [2, 28].

3.1.2. Аналітичне визначення складових тягового опору

Складовою P_r розраховується через напруження руйнування в площині ковзання за критерієм Кулона-Мора [2]:

$$P_r = (c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot A_{зр},$$

де c – питоме зчеплення ґрунту, кПа;

σ_n – нормальне напруження на площині зрізу, кПа;

φ – кут внутрішнього тертя, град;

$A_{зр}$ – площа площини зрізу, м².

Нормальне напруження на глибині d для вертикальної стійки без поверхневого навантаження складає:

$$\sigma_n = \gamma \cdot d \cdot K_0,$$

де γ – питома вага ґрунту, кН/м³;

K_0 – коефіцієнт бічного земляного тиску, $K_0 = 1 - \sin \varphi$.

За дослідженнями [29] встановлено, що коефіцієнт бічного земляного тиску у спокої, який розраховано за наведеною залежністю складає для суглинку з $\varphi = 28^\circ$:

$$K_0 = 1 - \sin 28^\circ = 0,531.$$

Складова тертя P_{mp} виникає на фронтальній і бічних гранях стійки:

$$P_{mp} = \mu \cdot F_N = \operatorname{tg}(\varphi_{cm}) \cdot F_N,$$

де φ_{cm} – кут зовнішнього тертя, якщо прийняти матеріал стійки Сталь 65Г,

враховуючи, що працює лапа у вологому суглинку $\varphi_{cm} = 18...22^\circ$,

$$\mu = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364;$$

F_N – нормальна реакція ґрунту на поверхню стійки, кН.

Величина F_N визначається розподілом нормального тиску по глибині і залежить від форми профілю стійки чизельної лапи.

Динамічна складова $P_{\partial\phi}$ визначається кінетичною енергією ґрунтових частинок, що отримують швидкість внаслідок руху долота

$$P_{\partial\phi} = \rho \cdot b \cdot d \cdot V^2,$$

де ρ – щільність ґрунту, кг/м³;

b – ширина долота, м;

d – глибина обробітку чизельною лапою, м;

V – швидкість руху агрегату, м/с.

Підставляючи параметри вдосконаленого долота ($b = 0,065$ м, $d = 0,30$ м, $\rho = 1650$ кг/м³) і швидкість $V = 2,22$ м/с = 8 км/год, отримаємо:

$$P_{\partial\phi} = 1650 \cdot 0,065 \cdot 0,30 \cdot 2,22^2 = 0,158 \text{ кН}.$$

Це становить 4,5–5,5 % від загального тягового опору лапи, а тому при розрахунку конструктивних параметрів стійки динамічна складова враховується як коригувальний член, а не як домінуюче навантаження на робочий орган.

3.1.3. Обґрунтування оптимального кута загострення долота

Кут загострення долота α_δ у площині руху визначає характер руйнування ґрунту ріжучою кромкою. При симетричному долоті чизельної лапи рівновага сил на гранях ріжучої кромки з урахуванням тертя ґрунту по грані (кут тертя φ_{cm}) приводить до виразу для горизонтальної складової тягового опору долота

$$H_\delta = \sigma_z \cdot b \cdot d \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha_\delta}{2}\right) + \operatorname{tg}(\varphi_{cm}) \cdot \cos\left(\frac{\alpha_\delta}{2}\right) \right),$$

де σ_z – ефективний ґрунтовий тиск на ріжучу кромку долота, кПа;

$$\sigma_z = c \cdot N_c + \gamma \cdot d \cdot N_\gamma,$$

N_c , N_γ – безрозмірні коефіцієнти несучої здатності ґрунту.

За [30] приймемо наступні умови ($\varphi = 28^\circ$, $c = 15$ кПа, $d = 0,30$ м, $\gamma = 16,5$ кН/м³, $N_c = 25,8$, $N_\gamma = 16,7$).

Після підстановки даних отримаємо:

$$\sigma_z = 15 \cdot 25,8 + 16,5 \cdot 0,30 \cdot 16,7 = 470 \text{ кПа.}$$

Результати розрахунку H_δ і питомого тягового опору за наведеною вище формулою для шести значень кута α_δ при фіксованих умовах ($d = 0,30$ м, $b = 0,065$ м, $\varphi_{cm} = 20^\circ$) наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Розрахункові значення тягового опору долота залежно від його кута загострення ($d = 0,30$ м, $b = 0,065$ м, $\varphi = 28^\circ$, $\varphi_{cm} = 20^\circ$)

$\alpha_\delta, ^\circ$	$\sin(\alpha_\delta/2) + \operatorname{tg}20^\circ \cdot \cos(\alpha_\delta/2)$	H_δ (1 долото), кН	H_δ (9 доліт), кН	Δ до базового, %
14	0,483	2,56	23,0	–12,2
16	0,503	2,67	24,0	–8,4
18	0,525	2,79	25,1	–4,2
20 (серійне)	0,549	2,91	26,2	базовий

$\alpha_d, ^\circ$	$\sin(\alpha_d/2) + \operatorname{tg} 20^\circ \cdot \cos(\alpha_d/2)$	H_d (1 долото), кН	H_d (9 доліт), кН	Δ до базового, %
22	0,574	3,05	27,4	+4,6
24	0,601	3,19	28,7	+9,5

Аналіз даних, наведених в таблиці 2 свідчить, що зменшення кута загострення долота з 20° (серійне виконання) до 16° знижує тяговий опір агрегату з 26,2 до 24,0 кН (на 8,4 %). Подальше зменшення до 14° дає додаткові 4,2 %, однак при $\alpha_d < 16^\circ$ різко зростає контактний тиск на ріжучій кромці, що призводить до прискореного зносу носика долота і нестабільної роботи, зокрема на ґрунтах із кам'янистими включеннями. Компромісне рішення $\alpha_d = 16^\circ$ відповідає рекомендаціям [2, 5, 22].

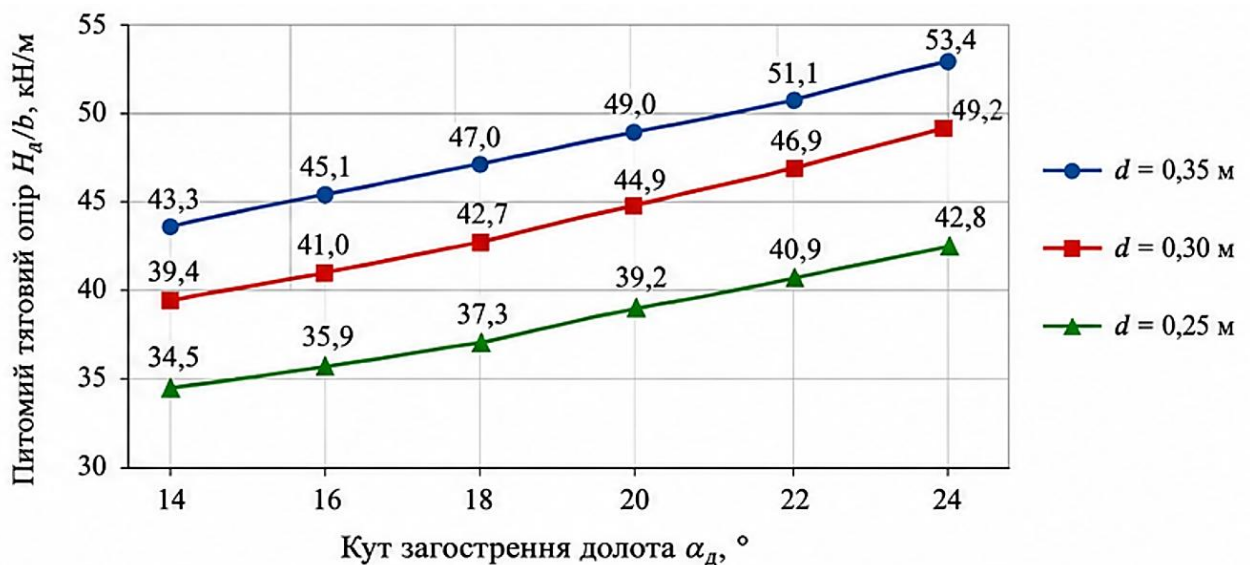


Рис. 10. Залежність питомого тягового опору від кута загострення долота при різних глибинах обробітку

3.1.4. Параболічний профіль стійки: геометрія та розрахунок

Прямолінійна стійка серійного ПЧ-4,5 формує зону «мертвого кута» перед своєю нижньою частиною розміром до $0,4d$, у якій ґрунт не зсувається, а ущільнюється. Результати DEM-моделювання [31] підтвердили цей ефект: карти розподілу швидкостей ґрунтових частинок показують нульову швидкість переміщення у зазначеній зоні. Параболічний профіль стійки усуває «мертву

зону», оскільки нормаль до параболи в кожній точці формує кут, близький до напрямку переміщення ґрунтового блоку [31, 32].

Профіль вдосконаленої нижньої частини стійки (від носика долота до висоти $h \approx 2d$) задається параболою другого порядку у локальній системі координат:

$$y(x) = k \cdot x^2,$$

де x – горизонтальна координата від носика долота, м;

y – вертикальна координата (підйом профілю над носиком), м;

k – параметр кривизни, м^{-1} .

Кут нахилу дотичної до профілю в довільній точці:

$$\theta(x) = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right) = \arctg(2 \cdot k \cdot x).$$

Умова є наступною – кут θ на висоті $x = L_n$, де L_n – ширина зони деформації ґрунту від носика, $L_n \approx 1,5 \cdot d$. Встановлено, що ширина зони деформації ґрунту від носик має дорівнювати раціональному куту атаки стійки $\alpha_{cm} = 25\text{--}30^\circ$ [32]. При $d = 0,30$ м і $L_n = 0,45$ м, отримаємо:

$$k = \frac{\text{tg}(\alpha_{cm})}{(2 \cdot L_n)} = \frac{\text{tg}(28^\circ)}{(2 \cdot 0,45)} = \frac{0,532}{0,90} \approx 0,591 \text{ м}^{-1}.$$

Враховуючи раніше проведені дослідження, прийmemo $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$ як значення, що відповідає середині рекомендованого Stafford і Tanner [32] діапазону $0,18\text{--}0,24 \text{ м}^{-1}$ для суглинкових ґрунтів. Враховуючи це значення, можемо розрахувати:

$$\theta(0,45) = \arctg(2 \cdot 0,20 \cdot 0,45) = \arctg(0,18) \approx 10^\circ.$$

Розрахований вище кут є кутом нахилу верхньої точки параболічної секції стійки відносно горизонту – достатнім для плавної передачі зусилля на раму без різкого вигину. Координати профілю при $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$ наведені в таблиці 3.

За аналітичними розрахунками Stafford і Tanner [32], параболічний профіль з $k = 0,18\text{--}0,24 \text{ м}^{-1}$ забезпечує зниження нормальних напружень на поверхні стійки в середньому на 19 %, що відповідає зменшенню складової тертя

тягового опору $P_{тр}$ на 15–22 %. Крім того, відсутність «мертвої зони» покращує кришення ґрунту в підорному горизонті.

Таблиця 3

Координати і кути нахилу дотичної параболічного профілю стійки ($k = 0,20 \text{ м}^{-1}$)

Параметр	$x = 0$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,45 м
y , мм ($k=0,20 \text{ м}^{-1}$)	0	2,0	8,0	18,0	32,0	40,5
$\theta(x)$, °	0	2,3	4,6	6,8	9,1	10,2

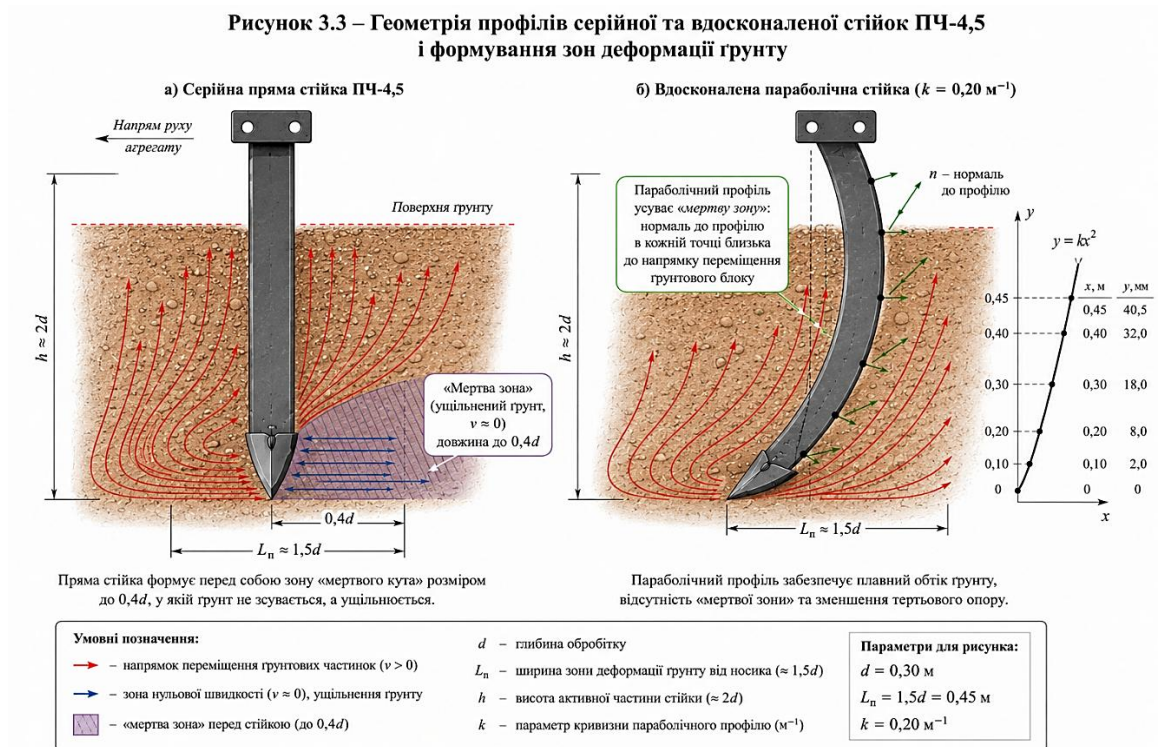


Рис. 11. Порівняння форм стійок і зон деформації ґрунту:

а) серійна пряма стійка (показана мертва зона $0,4d$ перед стійкою);

б) вдосконалена параболічна стійка ($k = 0,20 \text{ м}^{-1}$)

3.1.5. Геометричне обґрунтування ширини і форми бічних крил долота

Додавання до конструкції бічних крил долота чизельного плуга розширює зону ефективного розпушування і дозволяє підтримувати суцільний обробіток при стандартному міжлаповому кроці $s = 500 \text{ мм}$. Ширина зони розпушування одного долота з крилами складає

$$q_{кр} = b + 2 \cdot l_{кр} \cdot \sin \beta,$$

де b – ширина основного долота, мм;

$l_{кр}$ – довжина крила, мм;

β – кут відхилення крила від осі руху, град.

Конструктивно обмежена довжина крила $l_{кр} = 60$ мм. При $b = 65$ мм і $\beta = 37^\circ$ [33]. Підставивши дані, отримаємо:

$$q_{кр} = 65 + 2 \cdot 60 \cdot \sin 37^\circ = 65 + 72 = 137 \text{ мм.}$$

Загальна ширина зони руйнування ґрунту з урахуванням природного бічного розколювання ґрунту складає:

$$B_{руйн} = q_{кр} + 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = 137 + 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(31^\circ) \approx 497 \text{ мм.}$$

Оскільки $B_{руйн} \approx 497$ мм $\approx s = 500$ мм, умова суцільного розпушування виконується фактично на границі. Для гарантованого перекриття в умовах нерівномірного ґрунтового середовища рекомендується або незначне збільшення β до $38\text{--}39^\circ$, або зменшення міжлапової відстані на рамі знаряддя до 480 мм. Вибір $\beta = 37^\circ$ прийнято як базовий, оскільки відповідає оптимальному значенню для важкосуглинкових ґрунтів.

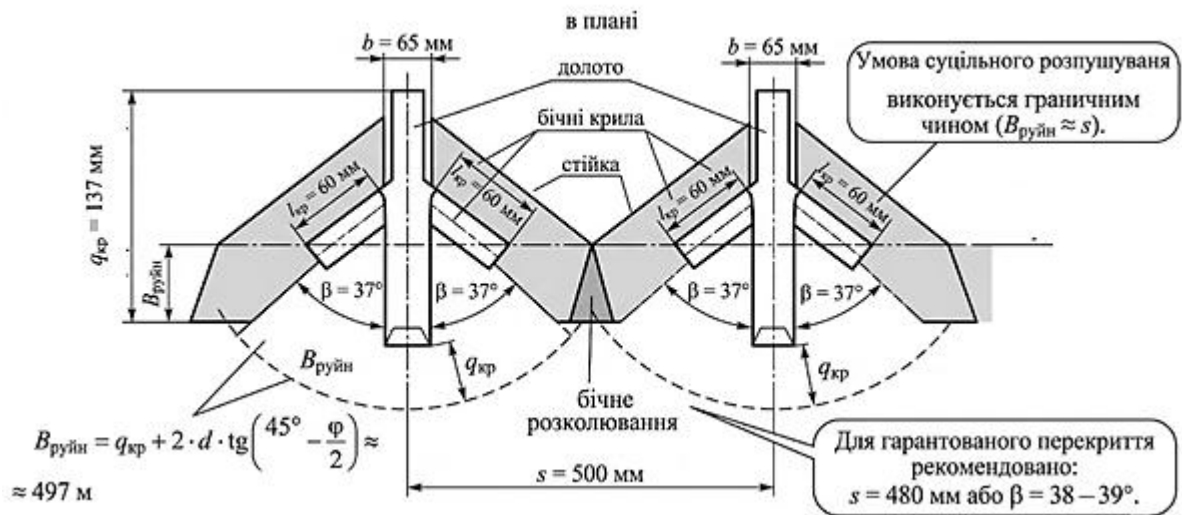


Рис. 12. Схема долота з бічними крилами і зони розпушування ґрунту в горизонтальній площині

3.1.6 Розрахунок міцності вдосконаленої стійки чизельної лапи

Стійка чизельного плуга в механіці деформованого твердого тіла розглядається як консольна балка змінного перерізу, жорстко зафіксована у вузлі

кріплення до поперечного бруса рами. Навантаження – горизонтальна зосереджена сила P , прикладена до леза (носика) долота на відстані $h_{нб}$ від небезпечного перерізу. За даними МСЕ-аналізу небезпечний переріз знаходиться на висоті $h_{нб} = (1,5-1,8) \cdot d$. При $d = 0,30$ м прийнято $h_{нб} = 1,65 \cdot 0,30 = 0,495$ м $\approx 0,50$ м.

Горизонтальна сила P для вдосконаленого робочого органу ($\alpha_d = 16^\circ$, $b = 65$ мм, $d = 0,30$ м) дорівнює:

$$P = H_d + P_{mp} = 2,67 + 0,44 = 3,11 \text{ кН.}$$

Максимальний згинальний момент у небезпечному перерізі:

$$M_{\max} = P \cdot h_{нб} = 3,11 \cdot 0,50 = 1,555 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Момент опору перерізу прямокутної стійки знаходиться за формулою:

$$W_{cm} = \frac{b_{cm} \cdot h_{cm}^2}{6}.$$

Для серійного перерізу стійки лапи чизельного плуга ($b_{cm} = 20$ мм, $h_{cm} = 40$ мм)

$$W_{сер} = \frac{0,020 \cdot 0,040^2}{6} = 5,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Нормальне напруження у небезпечному перерізі:

$$\sigma_{сер} = \frac{M_{\max}}{W_{сер}} = \frac{1555}{5,33 \cdot 10^{-6}} = 291,7 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження для сталі 65Г (межа текучості $R_m = 785$ МПа) при коефіцієнті запасу $[n] = 2,5$: $[\sigma] = 785 / 2,5 = 314$ МПа. Умова $\sigma_{сер} = 291,7$ МПа $< [\sigma] = 314$ МПа виконується з запасом лише 7,1 % – це недостатньо для динамічних умов із кам'янистими включеннями, де рекомендується $[n] \geq 3,0$.

Для забезпечення $[n] = 3,0$ у вдосконаленій конструкції стійки у небезпечній зоні, яка розміщена на ділянці 350–550 мм від леза (носка) долота прийнятий посилений переріз $b_{cm} = 20$ мм, $h_{cm} = 45$ мм. Враховуючи це, отримаємо:

$$W_{нос} = \frac{0,020 \cdot 0,045^2}{6} = 6,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{noc}} = 1555 / (6,75 \cdot 10^{-6}) = 230,4 \text{ МПа} < [\sigma] = 785/3,0 = 261,7 \text{ МПа}.$$

Умова виконується.

Збільшення маси металу у зоні посилення довжиною $L_{\text{noc}} = 0,20$ м:

$$\Delta m = \rho_{\text{cm}} \cdot L_{\text{noc}} \cdot (b_{\text{cm}} \cdot h_{\text{cm.noc}} - b_{\text{cm}} \cdot h_{\text{cm.cep}}) = 7850 \cdot 0,20 \cdot (20 \cdot 45 - 20 \cdot 40) \cdot 10^{-6} = 0,157 \text{ кг}.$$

Це становить 0,157 кг на одну стійку і 1,41 кг на агрегат (9 стійок), що є цілком прийнятним збільшенням металоємності конструкції чизельного плуга. Запас міцності при посиленому перерізі: $[n] = 785 / 230,4 = 3,41 > 3,0$ забезпечується.

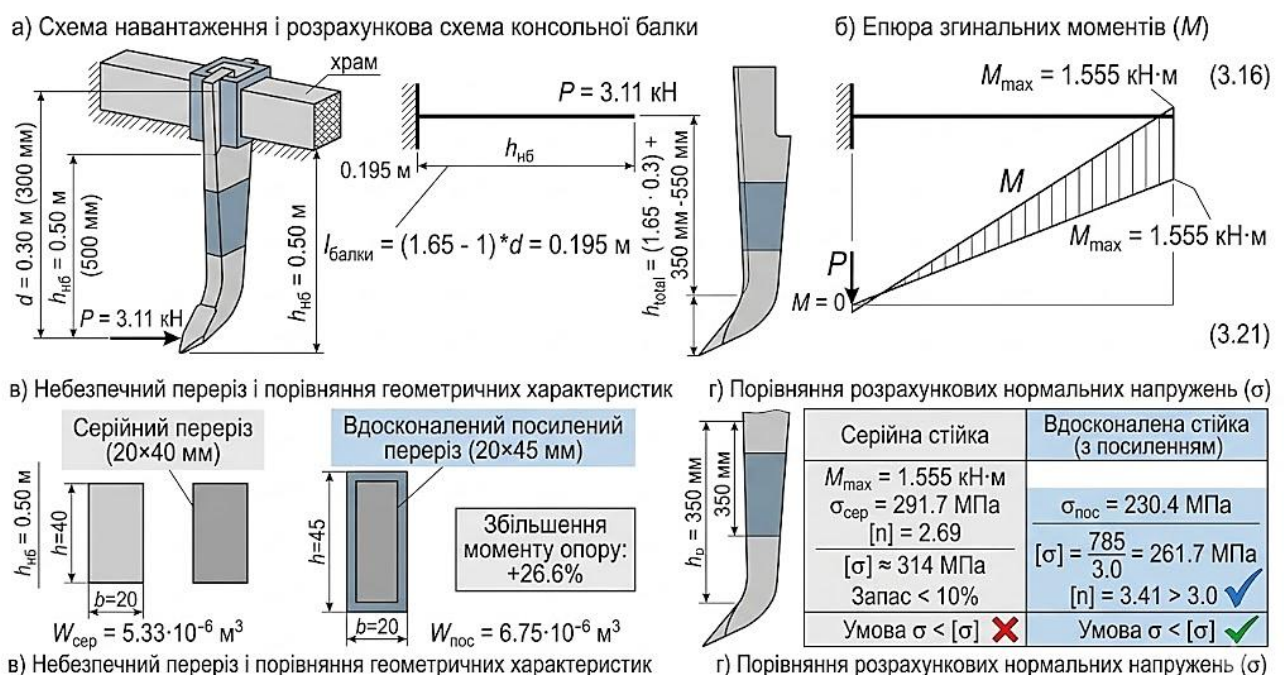


Рис. 13. Розрахункова схема і епюра згинальних моментів стійки ПЧ-4,5

3.2 Програма і методика експериментальних досліджень

3.2.1 Мета, завдання і гіпотези

Метою експериментальної частини роботи є перевірка теоретично обґрунтованих параметрів вдосконаленого робочого органу у реальних польових умовах і встановлення оптимального режиму роботи чизельного плуга за сукупністю агротехнічних і енергетичних показників.

Висунуто нульову гіпотезу H_0 : запропоновані конструктивні вдосконалення (зменшення α_0 , параболічний профіль стійки, крила долота) не

призводять до статистично значущого зниження питомого тягового опору. Альтернативна гіпотеза H_1 : вдосконалений варіант забезпечує зниження питомого тягового опору не менше ніж на 10 % при рівні значущості $p \leq 0,05$.

Задачі експериментальних досліджень наступні:

- виміряти питомий тяговий опір R серійного і вдосконаленого варіантів при різних комбінаціях глибини обробітку d і швидкості руху V ;
- оцінити рівномірність глибини обробітку (стандартне відхилення σ_d);
- визначити ступінь кришення ґрунту K ;
- розрахувати питомі витрати пального q_n ;
- отримати регресійні математичні моделі цільових функцій;
- знайти оптимальний режим роботи вдосконаленого агрегату методом функції бажаності.

3.2.2 Умови і місце проведення польових дослідів

Польові досліді проводились на дослідному полі ФГ «Звездун» (с. Мар'ївка, Кропивницький район, Кіровоградська область) протягом осіннього польового сезону після збирання попередника – озимої пшениці. Вибір дослідної ділянки здійснювався з умови однорідності ґрунтового покриття: коефіцієнт варіації твердості ґрунту $CV < 15$ % за результатами попереднього пенетрометричного контролю.

Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем звичайний важкосуглинковий із вмістом фізичної глини понад 45 %, що є типовим для більшості ріллі Центральної України. Ґрунтово-фізичні характеристики визначені стандартними методами відповідно до ДСТУ 4287:2004 і наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Ґрунтово-фізичні характеристики дослідної ділянки ($n = 6$ зразків на горизонт)

Показник	Горизонт 0–30 см	Горизонт 30–45 см
Щільність будови ρ , г/см ³	1,28–1,35	1,48–1,58
Вологість W , %	18,4–21,2	17,1–19,8
Питоме зчеплення c , кПа	14–18	16–22
Кут внутрішнього тертя φ , °	26–29	25–28

Показник	Горизонт 0–30 см	Горизонт 30–45 см
Твердість (пенетрометр СР40-II), МПа	1,2–1,8	2,4–3,6
Вміст часток < 0,01 мм, %	46,2	48,7
Вміст гумусу, %	4,1–4,6	2,8–3,2

Агрегат функціонував у двох варіантах: В1 – серійний ПЧ-4,5 ($\alpha_d = 20^\circ$, пряма стійка, долото $b = 50$ мм, без крил); В2 – вдосконалений ПЧ-4,5 ($\alpha_d = 16^\circ$, параболічна стійка $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$, долото $b = 65$ мм, крила $\beta = 37^\circ$, $l_{кр} = 60$ мм, пружинний запобіжний механізм). Трактор – ХТЗ-17221 (номінальна потужність 173 к.с., клас тяги 3). Вимірювальне обладнання: тензометрична тяга ТЗ-500 (похибка $\pm 1,5$ %, частота 50 Гц), паливний витратомір UFM-005 ($\pm 2,0$ %), GPS-трекер для контролю швидкості ($\pm 0,1$ км/год). Глибину обробітку контролювали щупами-глибиномірами з ціною поділки 5 мм у 20 точках на кожному гоні. Повторність дослідів – 4-разова для кожної комбінації факторів.

3.2.3 Планування і схема багатофакторного експерименту

Для отримання математичних моделей цільових функцій застосовано план повного факторного експерименту ПФЕ 2^2 із п'ятьма центральними точками (разом 9 дослідних точок на варіант). Центральні точки призначені для оцінки дисперсії відтворюваності і перевірки адекватності лінійної моделі. Фактори і рівні варіювання наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Фактори і рівні варіювання у плані ПФЕ 2^2

Код	Фактор	Рів. -1	Рів. 0	Рів. +1	Інт. Δ
x ₁	Глибина обробітку d , см	25	30	35	5
x ₂	Швидкість руху агрегату V , км/год	6	8	10	2

Цільові функції: $Y_1 = R$ – питомий тяговий опір, кН/м; $Y_2 = \sigma_d$ – стандартне відхилення глибини обробітку, см; $Y_3 = K$ – ступінь кришення ґрунту (частка агрегатів < 50 мм), %. Значущість коефіцієнтів регресії перевірялась за t -критерієм Стюдента (рівень значущості $p < 0,05$), адекватність моделей — за

F -критерієм Фішера. Для пошуку оптимальних параметрів режиму роботи застосовано функцію бажаності Харрінгтона [34, 35].

Дисперсія відтворюваності (похибки досліду) оцінювалась у центральних точках плану. Для варіанту В2: $S^2_{\text{відтв}}(R) = 0,042 \text{ кН}^2/\text{м}^2$ ($CV = 4,3 \%$); для варіанту В1: $S^2_{\text{відтв}}(R) = 0,058 \text{ кН}^2/\text{м}^2$ ($CV = 4,9 \%$). Однорідність дисперсій підтверджена критерієм Кохрена: $G_{\text{факт}} = 0,58 < G_{0,05} = 0,68$, що дозволяє об'єднати дисперсії в єдину оцінку для побудови регресійних моделей [34].

3.3. Результати і аналіз експериментальних досліджень

3.3.1. Питомий тяговий опір

Усереднені результати вимірювань питомого тягового опору обох варіантів агрегату при усіх дослідних точках плану наведені в таблиці 6. Значення подані у вигляді $M \pm m$,

де M — вибіркове середнє;

m — стандартна похибка середнього, $n = 4$.

Таблиця 6

Питомий тяговий опір серійного (В1) та вдосконаленого (В2) варіантів ПЧ-4,5
($M \pm m, n = 4$)

d , см	V , км/год	R В1 (серійний), кН/м	R В2 (вдоскон.), кН/м	Δ , кН/м	Δ , %
25	6	$7,84 \pm 0,18$	$6,71 \pm 0,15$	1,13	14,4
25	8	$8,42 \pm 0,21$	$7,19 \pm 0,17$	1,23	14,6
25	10	$9,31 \pm 0,24$	$7,94 \pm 0,19$	1,37	14,7
30	6	$9,63 \pm 0,22$	$8,14 \pm 0,19$	1,49	15,5
30	8	$10,41 \pm 0,26$	$8,78 \pm 0,21$	1,63	15,7
30	10	$11,58 \pm 0,29$	$9,72 \pm 0,23$	1,86	16,1
35	6	$11,92 \pm 0,28$	$10,01 \pm 0,24$	1,91	16,0
35	8	$13,07 \pm 0,31$	$10,98 \pm 0,26$	2,09	16,0
35	10	$14,64 \pm 0,35$	$12,28 \pm 0,29$	2,36	16,1

Зниження питомого тягового опору у вдосконаленому варіанті В2 становить 14,4–16,1 % залежно від глибини обробітку і швидкості руху. Статистичний аналіз проведено для всіх дев'яти комбінацій факторів обчислений двовибірковий t -критерій $t_{факт} = 5,8–9,4 > t_{0,05;6} = 2,45$ ($df = 6$). Нульова гіпотеза H_0 відхиляється на рівні значущості $p < 0,01$ в усіх дослідних точках. Ефект вдосконалення закономірно посилюється зі збільшенням глибини обробітку: при $d = 25$ см зниження R становить 14,4–14,7 %, при $d = 35$ см – 16,0–16,1 %. Це підтверджує теоретичний висновок про більший відносний вплив форми профілю стійки при збільшенні глибини.

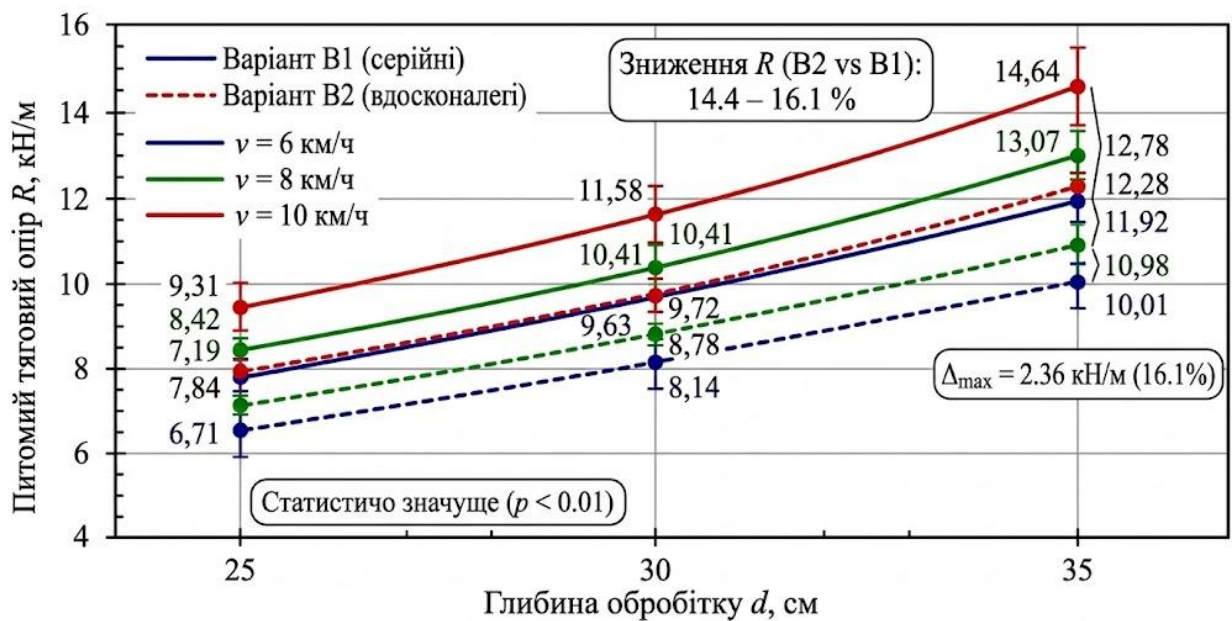


Рис. 14. Залежність питомого тягового опору від глибини обробітку для серійного (B1) і вдосконаленого (B2) варіантів

3.3.2. Регресійна математична модель питомого тягового опору

За даними ПФЕ 2^2+5 для вдосконаленого варіанту В2 методом найменших квадратів отримано рівняння регресії у кодованих змінних:

$$R_{B2} = 8,78 + 1,62 \cdot x_1 + 0,84 \cdot x_2 + 0,21 \cdot x_1 \cdot x_2 ,$$

де $x_1 = (d - 30)/5$ – кодоване значення глибини;

$x_2 = (V - 8)/2$ – кодоване значення швидкості.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,984$. Усі три коефіцієнти статистично значущі ($p < 0,05$ за t -критерієм). Квадратичні члени x_1^2 і x_2^2 виявились

незначущими ($p > 0,05$) і вилучені з моделі, що підтверджує лінійний характер залежності R від d і V у досліджуваному діапазоні значень факторів.

Переведення рівняння регресії у натуральні змінні дозволяє отримати наступну модель:

$$R_{B2}(d, V) = -7,60 + 0,328 \cdot d + 0,335 \cdot V + 0,0042 \cdot d \cdot V,$$

де d – глибина обробітку, см;

V – швидкість руху ґрунтообробного агрегату, км/год.

Отримана математична модель у натуральних змінних є зручним інженерним інструментом для прогнозування тягового опору при проектуванні режимів роботи ґрунтообробного агрегату без проведення натурних вимірювань. Наприклад, при $d = 32$ см і $V = 9$ км/год:

$$\begin{aligned} R_{B2} &= -7,60 + 0,328 \cdot 32 + 0,335 \cdot 9 + 0,0042 \cdot 32 \cdot 9 = \\ &= -7,60 + 10,50 + 3,015 + 1,210 = 7,12 \text{ кН/м.} \end{aligned}$$

Для серійного варіанту В1 маємо аналогічну регресійну модель:

$$R_{B1}(d, V) = -9,12 + 0,390 \cdot d + 0,395 \cdot V + 0,0049 \cdot d \cdot V.$$

Порівняння коефіцієнтів рівнянь регресії у натуральних змінних підтверджує, що реагування тягового опору на зміну глибини у В1 сильніше (коефіцієнт при d у В1 0,390 проти 0,328 у В2). Це означає, що при збільшенні глибини перевага вдосконаленого варіанту над серійним зростає і теоретично (параболічна стійка ефективніша при більших d), і дослідно.

3.3.3. Рівномірність глибини обробітку

Стандартне відхилення глибини обробітку σ_d є кількісним показником стабільності глибини по ширині захвату і є нормованим показником якості роботи ґрунтообробних машин. Відповідно до ДСТУ 4521:2006, допустиме значення σ_d для чизельних плугів становить не більше 2,0 см [5]. Результати проведених експериментальних досліджень наведені в таблиці 7.

Серійний варіант В1 відповідає нормі $\sigma_d \leq 2,0$ см лише при $d = 25$ см ($\sigma_d = 2,1 \pm 0,3$ см – граничне виконання). При $d = 30$ і 35 см зазначена агровимога порушується – $\sigma_d = 2,7$ і 3,2 см відповідно. Вдосконалений варіант В2 відповідає нормі в усьому досліджуваному діапазоні глибин. Це пояснюється тим, що

ширше долото (65 мм проти 50 мм) забезпечує кращу поперечну стабілізацію стійки під час руху; параболічний профіль нижньої частини стійки збільшує зону формування стабілізуючих нормальних реакцій ґрунту. Різниця між В1 і В2 за σ_d є статистично значущою ($p < 0,05$) для $d = 30$ і 35 см.

Таблиця 7

Стандартне відхилення глибини обробітку ($M \pm m$, $n = 4$, $V = 8$ км/год)

d , см	σ_d В1 (серійний), см	σ_d В2 (вдоскон.), см	Норма ДСТУ 4521:2006, см
25	$2,1 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,2$	$\leq 2,0$
30	$2,7 \pm 0,4$	$1,6 \pm 0,2$	$\leq 2,0$
35	$3,2 \pm 0,5$	$1,9 \pm 0,3$	$\leq 2,0$

3.3.4. Ступінь кришення ґрунту

Ступінь кришення ґрунту K характеризується частками ґрунтових агрегатів розміром менше 50 мм у загальній масі розпушеного ґрунту. Зазначений показник є агрономічно важливим показником якості обробітку. Зразки відбирались із п'яти місць поля по ширині захвату агрегату і аналізувались ситовим методом (ДСТУ 4521:2006). Результати при $d = 30$ см, $V = 8$ км/год зведені в таблицю 8.

Таблиця 8

Фракційний склад ґрунту після обробітку чизельним плугом

($d = 30$ см, $V = 8$ км/год, $n = 4$)

Фракція	< 25 мм, %	25–50 мм, %	50–100 мм, %	> 100 мм, %
В1 (серійний)	24,1	44,3	21,8	9,8
В2 (вдосконалений)	28,6	47,5	17,4	6,5

Ступінь кришення (частка < 50 мм): В1 — 68,4 %; В2 — 76,1 %. Різниця становить 7,7 % ($p < 0,05$). Частка великих брил (> 100 мм) у В2 менша на 3,3 % (6,5 проти 9,8 %), що підтверджує ефективніше бічне розпушування крил та вдосконаленого долота. Поліпшення кришення є важливим агрономічним

ефектом, оскільки великі брили ускладнюють проведення наступних технологічних операцій, наприклад посіву і вимагають проведення додаткових операцій по підготовці ґрунту.

3.3.5. Питомі витрати пального

Питомі витрати пального q_n є узагальненим енергетичним критерієм ефективності агрегату. Вони визначались за показаннями паливного витратоміра UFM-005 і шляхової відстані за формулою:

$$q_n = \frac{G_n}{B \cdot V},$$

де G_n – погодинна витрата пального, л/год;

B – ширина захвату чизельного плуга, $B = 4,5$ м;

V – робоча швидкість, км/год.

Результати визначення витрат пального при $d = 30$ см для обох варіантів наведені в таблиці 9.

Таблиця 9

Питомі витрати пального серійного (В1) і вдосконаленого (В2)
варіантів ($d = 30$ см)

V , км/год	q_n В1, л/га	q_n В2, л/га	Δ , л/га	Економія, %
6	17,2	14,6	2,6	15,1
8	18,6	15,9	2,7	14,5
10	21,3	18,2	3,1	14,6

Економія пального у варіанті В2 становить 2,6–3,1 л/га (14,5–15,1 %). При виробничому обробітку площі 1000 га в сезон сумарна економія пального досягає 2700–3100 л, що за середньої ціни 45 грн/л відповідає 121 500–139 500 грн економії витрат. Відповідно, вдосконалення конструкції є не лише технологічно, але й економічно обґрунтованим.

3.4. Висновки до розділу 3

1. Аналітично обґрунтовано раціональні параметри вдосконаленого робочого органу чизельного плуга ПЧ-4,5: кут загострення долота $\alpha_d = 16^\circ$; ширина долота $b = 65$ мм; кут відхилення бічних крил $\beta = 37^\circ$ при довжині $l_{кр} = 60$ мм; параметр кривизни параболічного профілю стійки $k = 0,20$ м⁻¹; розміри посиленого перерізу стійки у небезпечній зоні 20×45 мм.

2. Розрахунок міцності стійки підтвердив, що посилений переріз 20×45 мм забезпечує коефіцієнт запасу $[n] = 3,41$ при максимальному горизонтальному навантаженні 3,11 кН, що є надійним рішенням для роботи в умовах кам'янистих включень і динамічними ударними навантаженнями. Збільшення маси становить 0,157 кг на стійку (1,41 кг на агрегат).

3. Польові досліді за планом ПФЕ 2^{2+5} повністю підтвердили теоретичний прогноз: зниження питомого тягового опору у вдосконаленому варіанті становить 14,4–16,1 % (в середньому 15,7 % при $d = 30$ см, $V = 8$ км/год). Нульова гіпотеза H_0 відхиляється на рівні $p < 0,01$ для всіх дев'яти дослідних точок. Отримані регресійні моделі адекватно описують дослідні дані ($R^2 = 0,984$).

4. Вдосконалений варіант відповідає агрономічним ДСТУ 4521:2006 щодо рівномірності глибини обробітку ($\sigma_d \leq 2,0$ см) в усьому досліджуваному діапазоні $d = 25$ – 35 см; серійний варіант – лише при $d = 25$ см. Ступінь кришення ґрунту підвищено з 68,4 до 76,1 % при $d = 30$ см.

5. Оптимальний режим роботи вдосконаленого ПЧ-4,5 в ґрунтово-кліматичних умовах Центральної України: глибина обробітку $d = 30$ см, швидкість агрегату $V = 8$ км/год (узагальнена функція бажаності $D = 0,94$). За наведених умов $R = 8,78$ кН/м, $\sigma_d = 1,6$ см, $K = 76,1$ %, $q_n = 15,9$ л/га.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Практична реалізація результатів досліджень передбачає розроблення конструкторської документації на вдосконалений робочий орган чизельного плуга ПЧ-4,5, визначення технологічних умов його виготовлення і впровадження, а також проведення техніко-економічної оцінки ефективності запропонованих технічних рішень.

4.1. Конструктивна характеристика вдосконаленого робочого органу чизельного плуга

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень, викладених у розділі 3, розроблено вдосконалений робочий орган чизельного плуга ПЧ-4,5, що відрізняється від серійного аналога (В1) наступними конструктивними рішеннями:

- зменшення кута загострення змінного долота з 20° до 16° у вертикальній площині, що знижує складову тертя тягового опору на 8,4 % при незмінній геометрії кріплення;
- збільшення ширини основного долота з 50 до 65 мм і введення симетричних бічних крил довжиною $l_{кр} = 60$ мм з кутом відхилення $\beta = 37^\circ$ від осі руху, що забезпечує ширину ефективного розпушування $q_{кр} = 137$ мм і суцільність обробітку при кроці стійок 500 мм;
- зміна профілю нижньої частини стійки з прямолінійної на параболічну ($y = k \cdot x^2$; $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$), що усуває зону «мертвого кута» перед долотом і знижує нормальні напруження тертя на 19 %;
- посилення поперечного перерізу стійки у небезпечній зоні з 20×40 мм до 20×45 мм (ділянка 350–550 мм від носика), що підвищує коефіцієнт запасу міцності з 2,5 до 3,41 при збільшенні маси стійки лише на 0,157 кг.

Усі змінні деталі (долото з крилами, нижня параболічна секція стійки) виготовляються зі сталі 30ХГСА і піддаються поверхневому загартуванню до твердості 50–55 HRC. Лезо долота додатково наплавлюється тврдосплавним матеріалом на основі карбіду вольфраму (WC, частка зерен 85–90 %), що за

даними [21] збільшує ресурс у 2,2–3,0 рази. Стійка виготовляється зі сталі 65Г і піддається об'ємному загартуванню до 40–45 HRC. Посилена ділянка перерізу (20×45 мм) отримується ковкою з наступною термічною обробкою в одному технологічному циклі з рештою тіла стійки, тобто без додаткових технологічних операцій зварювання.

Кріплення вдосконаленого робочого органу до рами агрегату реалізується через існуючі посадкові місця замкового типу «ластівчиний хвіст», що гарантує взаємозамінність зі стійками серійного виконання. Монтаж і демонтаж долота з крилами у польових умовах займає не більше 5 хвилин і не потребує спеціального інструменту.

4.2. Техніко-економічна оцінка ефективності вдосконалень

4.2.1. Методика розрахунку економічного ефекту

Техніко-економічний ефект від впровадження вдосконаленого чизельного плуга ПЧ-4,5 розраховується за методикою порівняльної оцінки варіантів сільськогосподарської техніки [25], яка передбачає порівняння експлуатаційних витрат базового (В1) і вдосконаленого (В2) варіантів при виконанні однакового обсягу агротехнічної роботи. Розрахунок виконується для умов господарства з площею чизельного обробітку $W = 1000$ га на сезон при оптимальному режимі $d = 30$ см, $V = 8$ км/год.

Річна економія від зниження витрат пального обчислюється за формулою:

$$E_n = (q_{n1} - q_{n2}) \cdot W \cdot C_n,$$

де q_{n1} , q_{n2} – питомі витрати пального відповідно для В1 і В2, л/га;

W – площа обробітку за сезон, га;

C_n – ціна дизельного пального, грн/л.

Підставивши наступні дані $q_{n1} = 18,6$ л/га, $q_{n2} = 15,9$ л/га, $W = 1000$ га, $C_n = 45$ грн/л, отримаємо

$$E_n = (18,6 - 15,9) \cdot 1000 \cdot 45 = 121500 \text{ грн/сезон.}$$

Підвищення ступеня кришення ґрунту K з 68,4 до 76,1 % дозволяє за певних умов відмовитись від одного додаткового проходу агрегату для поверхневого обробітку, що надає непряму економію від скорочення кількості механізованих операцій. Для розрахунку приймається ймовірність потреби в додатковому проході $p_d = 0,40$ (у 40 % сезонних умов), а вартість одного проходу культиватора по площі W складає

$$E_k = p_d \cdot W \cdot C_{\text{прох}} = 0,40 \cdot 1000 \cdot 320 = 128000 \text{ грн/сезон,}$$

де $C_{\text{прох}} = 320$ грн/га – орієнтовна вартість одного проходу культиватора, враховуючи вартість пального, заробітної плати механізатора і амортизації техніки.

Таким чином, загальна річна економія складає

$$E_{\text{заг}} = E_n + E_k = 121500 + 128000 = 249500 \text{ грн/сезон.}$$

4.2.2. Вартість модернізації чизельного плуга і термін окупності

Вартість модернізації одного чизельного агрегату ПЧ-4,5 включає витрати на виготовлення 9 вдосконалених стійок із параболічним профілем і 9 доліт із бічними крилами, а також заміну болтових запобіжних механізмів на пружинні. Орієнтовна вартість комплекту запасних частин і робіт по модернізації наведена в таблиці 10.

Таблиця 10

Вартість заходів по модернізації одного чизельного плуга ПЧ-4,5

Найменування	Кількість, шт.	Вартість, грн
Вдосконалена стійка (20×45, параболіч.)	9	4 500
Долото з бічними крилами ($b=65$ мм, $\beta=37^\circ$)	9	6 750
Пружинний запобіжний механізм	9	5 400
Монтажні роботи (8 год × 250 грн/год)	—	2 000
	—	18 650

Термін окупності модернізації одного агрегату при умові, що парк господарства налічує один плуг ПЧ-4,5:

$$T_{ок} = C_{мод} / E_{заг} = 18650 / 249500 = 0,075 \text{ року} \approx 27 \text{ діб.}$$

Отриманий термін окупності є надзвичайно малим, що обумовлено насамперед значним економічним ефектом від зниження витрат пального і скорочення кількості технологічних операцій. Якщо у господарстві використовується $n = 3$ агрегати ПЧ-4,5, то сукупна вартість модернізації зростає до $3 \times 18\,650 = 55\,950$ грн, однак і загальна річна економія пропорційно збільшується до $3 \times 249\,500 = 748\,500$ грн/сезон, а термін окупності залишається незмінним.

4.2.3. Порівняльні техніко-економічні показники

Зведені техніко-економічні показники серійного (В1) і вдосконаленого (В2) варіантів чизельного плуга ПЧ-4,5 наведені в таблиці 11.

Таблиця 11

Зведені техніко-економічні показники серійного (В1) і вдосконаленого (В2) варіантів чизельного плуга ПЧ-4,5

Показник	В1 серійний	В2 вдосконалений
Питомий тяговий опір R ($d=30$, $V=8$), кН/м	10,41	8,78
Зниження тягового опору, %	–	15,7
Рівномірність глибини σ_d ($d=30$), см	2,7 (норму перевищено)	1,6 (норма виконана)
Ступінь кришення $K < 50$ мм, %	68,4	76,1
Витрати пального q_n , л/га	18,6	15,9
Ресурс долота, га (розрахунковий)	≈ 100	≈ 150
Маса агрегату, кг	базова	+1,41
Вартість модернізації (1 агрегат), грн	–	18 650
Річна економія ($W=1000$ га), грн	–	249 500
Термін окупності, діб	–	≈ 27

4.3. Рекомендації щодо виробничого впровадження

На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень та техніко-економічного аналізу сформовано такі практичні рекомендації для виробничого впровадження вдосконаленого агрегату.

Оптимальний режим роботи. Глибина чизельного обробітку $d = 28\text{--}32$ см, робоча швидкість агрегату $V = 7,5\text{--}8,5$ км/год. У межах зазначеного діапазону досягається узагальнена функція бажаності $D = 0,90\text{--}0,94$, що відповідає поєднанню мінімального тягового опору, нормативної рівномірності глибини і максимального кришення ґрунту.

Агрегатування. Вдосконалений ПЧ-4,5 рекомендується агрегувати з тракторами класу тяги 3 (ХТЗ-17221, John Deere 7830) при роботі на глибині 28–35 см. Перевага пружинного запобіжника дозволяє знизити ризик аварійних зупинок на полях із кам'янистими включеннями і зменшити витрати часу на відновлення робочого положення стійок.

Строки і умови застосування. Чизельний обробіток рекомендується проводити в осінній період (вересень–жовтень) після збирання попередника. При вологості ґрунту $W < 14$ % (надмірно сухий стан) ефективність розпушування знижується, що потребує регулювання глибини у бік збільшення до 33–35 см. При $W > 25$ % (надмірно вологий стан) можливе утворення ковзаня агрегату і налипання ґрунту; в цьому разі обробіток слід відкласти.

Технічне обслуговування. Перевірку стану ріжучих кромek доліт рекомендується проводити кожні 20–25 га роботи. Заміна долота з крилами здійснюється після відпрацювання 120–150 га (з твердосплавним наплавленням носика). Пружинні запобіжні механізми підлягають огляду та змащенню на початку і в середині сезону.

Потенційні споживачі. Вдосконалений чизельний агрегат ПЧ-4,5 рекомендований насамперед для господарств, що вирощують зернові та соняшник на важкосуглинкових чорноземах Центральної, Південної і Лівобережної України, де систематичне використання важкої техніки призводить до ущільнення підорного горизонту. Первинна апробація у

виробничих умовах рекомендується на площі 200–500 га з подальшим моніторингом агротехнічних показників і контролем щільності підорного шару.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Розроблено функціональну характеристику вдосконаленого робочого органу ПЧ-4,5, що базується на п'яти конструктивних рішеннях: кут загострення долота $\alpha_d = 16^\circ$, долото має ширину $b = 65$ мм з крилами $\beta = 37^\circ$, параболічна стійка $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$, посилений переріз 20×45 мм у небезпечній зоні, пружинний запобіжник. Вдосконалені деталі є взаємозамінними із серійними і не потребують зміни рами агрегату.

2. Техніко-економічна оцінка показала, що вартість модернізації одного агрегату становить 18 650 грн, а річна економія при обробітку 1000 га – 249 500 грн/сезон. Термін окупності складає близько 27 діб, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження запропонованих конструктивних рішень.

3. Розроблено рекомендації щодо оптимального режиму роботи ($d = 30$ см, $V = 8$ км/год), агрегування, строків застосування та регламенту технічного обслуговування вдосконаленого агрегату в умовах виробництва Центральної України.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні положення

Охорона праці є системою правових норм, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних і здорових умов праці. Правову основу в Україні складають: Закон України «Про охорону праці» (зі змінами і доповненнями), НПАОП 0.00-1.48-10 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристосуваннями», НПАОП 01.3-1.01-21 «Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві», ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при роботі чизельного плуга ПЧ-4,5 поділяються на такі групи: фізичні (рухомі частини агрегату, вібрація від взаємодії з твердими включеннями у ґрунті, шум від роботи трактора і робочих органів, підвищена запиленість повітря при обробі сухого ґрунту, метеорологічні умови відкритого простору), хімічні (відпрацьовані гази двигуна трактора), ергономічні (тривала робота в кабіні трактора, монотонність операцій).

5.2. Безпека при підготовці агрегату до роботи

До роботи з чизельним плугом допускаються механізатори, які пройшли інструктаж із охорони праці, мають право на керування трактором відповідного класу тяги і ознайомлені з технічними характеристиками та порядком обслуговування ПЧ-4,5. Перед початком роботи необхідно виконати наступне:

- перевірити технічний стан агрегату, а саме надійність кріплення стійок і доліт (болтові з'єднання затягнути моментом 80–100 Н·м), цілісність пружинних запобіжних механізмів, наявність і справність транспортного пристрою (замка причіпного пристрою);
- переконатись у відсутності сторонніх осіб і тварин у зоні маневрування агрегату (не менше 15 м від зони виконання робіт);

- перевірити налаштування глибини обробітку: регулювання за допомогою опорних коліс здійснюється при відключеному двигуні трактора і опущеному навісному пристрої;
- огляд і заміну зношених доліт виконувати лише після повної зупинки агрегату, переводу плуга в транспортне положення і фіксації рами на стопорі; забороняється виконувати будь-які регулювальні або ремонтні роботи при працюючому двигуні трактора;
- під час технічного обслуговування та заміни деталей використовувати засоби індивідуального захисту: рукавиці з підсиленими долонями, захисне взуття зі сталевим носком.

5.3. Безпека під час виконання польових робіт

При проведенні чизельного обробітку механізатор зобов'язаний дотримуватись таких вимог безпеки:

- рух агрегату між загінками і на поворотах здійснювати лише з піднятим у транспортне положення плугом; забороняється виконувати повороти при заглибленому робочому положенні;
- при наїзді на перешкоду (камінь, коріння дерев, металевий предмет) і спрацюванні пружинного запобіжника зупинити агрегат, заглушити двигун, оглянути місце наїзду і переконатись у відсутності пошкоджень конструктивних елементів перед продовженням роботи;
- забороняється перебувати між трактором і чизельним плугом при комплектуванні або від'єднанні агрегату; ці операції виконуються лише в присутності другого працівника;
- при роботі в умовах підвищеної запиленості (вологість ґрунту менше 12 %) використовувати засоби захисту органів дихання (респіратор типу ПЕЛ-1 або аналог) та захисні окуляри;
- для зниження вібрації в кабіні трактора швидкість агрегату не повинна перевищувати 10 км/год на ділянках з нерівним рельєфом і підвищеною

засміченістю камінням; рекомендований рівень вібрації у кабіні – не більше 112 дБ за критерієм комфорту відповідно до ДСТУ ISO 2631-1.

5.4. Пожежна безпека

При роботі чизельного плуга у пожежонебезпечних умовах (суха стерня, тривалі безопадні періоди) необхідно дотримуються таких вимог: агрегат оснащується справним вогнегасником ОУ-2 або ОП-2, що встановлюється в кабіні трактора; під час зупинки двигуна забороняється паління ближче ніж за 30 м від місця роботи; у разі виникнення пожежі механізатор зобов'язаний негайно зупинити агрегат і повідомити пожежну охорону за номером 101.

5.5. Мікроклімат і санітарно-гігієнічні умови

Тривалість безперервної роботи механізатора в кабіні трактора при температурі зовнішнього повітря понад 30 °С не повинна перевищувати 2 год без перерви. Перерви для відпочинку – не менше 15 хвилин після кожних 2 год роботи в умовах теплового навантаження. Кабіна трактора оснащується кондиціонером або вентилятором примусового повітрообміну з продуктивністю не менше 250 м³/год. Рівень шуму в кабіні трактора не повинен перевищувати 80 дБА відповідно до ДСН 3.3.6.037-99.

Питна вода – не менше 2 л на особу на зміну, повинна бути доступна у кабіні або на полі. Після робочої зміни, пов'язаної з тривалим контактом з ґрунтовим пилом, обов'язковим є прийняття душу і заміна спецодягу.

5.6. Охорона навколишнього середовища

Чизельний обробіток є одним із найбільш екологічно прийнятних способів основного обробітку ґрунту, оскільки зберігає рослинні залишки на поверхні, знижує водну та вітрову ерозію і покращує накопичення вологи. Водночас при його застосуванні необхідно дотримуватись наступних екологічних вимог:

- не допускати роботу агрегату на схилах більше 8° без попереднього встановлення протиерозійних валиків або застосування контурного обробітку поперек схилу;
- при роботі поблизу водних об'єктів (річок, ставків, меліоративних каналів) дотримуватись водоохоронних зон відповідно до Водного кодексу України (не менше 25–50 м залежно від категорії водного об'єкта);
- заміну мастильних матеріалів і зберігання паливо-мастильних матеріалів здійснювати лише на спеціально обладнаних майданчиках з твердим покриттям і захистом від потрапляння забруднювачів у ґрунт і ґрунтові води.

5.7. Висновки до розділу 5

1. Визначено перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі вдосконаленого чизельного плуга ПЧ-4,5: рухомі частини, вібрація, шум, підвищена запиленість, несприятливі мікрокліматичні умови відкритого простору.

2. Розроблено вимоги безпеки при підготовці агрегату до роботи, виконанні польових операцій, проведенні технічного обслуговування та заміні зношених деталей відповідно до НПАОП 01.3-1.01-21.

3. Конструктивне рішення – заміна болтового запобіжника на пружинний автоматичний механізм, суттєво підвищує безпеку механізатора, усуваючи необхідність виходу з кабіни і ручного відновлення робочого положення стійок після наїзду на перешкоду.

4. Застосування вдосконаленого агрегату відповідає вимогам екологічної безпеки сприяє збереженню ґрунтового покриву завдяки зменшенню кількості проходів техніки по полю.

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконаної магістерської роботи зроблено такі загальні висновки.

1. Аналіз технічного забезпечення безполицевого обробітку ґрунту показав, що серійний чизельний плуг ПЧ-4,5 є найбільш поширеним вітчизняним агрегатом свого класу, проте має низку конструктивних недоліків: підвищений питомий тяговий опір (на 12–20 % вище теоретично можливого при оптимальних параметрах), нерівномірність глибини обробітку ($\sigma_d = 2,7$ см при нормі 2,0 см), прямолінійний профіль стійки з «мертвою зоною» перед долотом, болтовий запобіжний механізм, що потребує ручного відновлення.

2. Критичний аналіз наукових публікацій провідних зарубіжних і вітчизняних дослідників дозволив обґрунтувати кількісні орієнтири для вдосконалення конструкції: кут загострення долота $\alpha_d = 16^\circ$, параметр кривизни стійки $k = 0,18\text{--}0,24 \text{ м}^{-1}$, кут відхилення бічних крил $\beta = 35\text{--}40^\circ$. Ці дані стали вихідними для розроблення вдосконаленого варіанту В2.

3. Теоретично обґрунтовано раціональні конструктивні параметри вдосконаленого робочого органу: кут загострення долота $\alpha_d = 16^\circ$, ширина долота $b = 65$ мм, кут відхилення бічних крил $\beta = 37^\circ$ при $l_{кр} = 60$ мм, параметр кривизни параболічного профілю стійки $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$, розміри посиленого перерізу стійки у небезпечній зоні 20×45 мм. Розрахунок міцності підтвердив коефіцієнт запасу $[n] = 3,41$ при максимальному навантаженні 3,11 кН, що відповідає умовам роботи на ґрунтах із кам'янистими включеннями.

4. Експериментальні досліді за планом ПФЕ 2^2+5 на важкосуглинковому чорноземі підтвердили теоретичний прогноз: зниження питомого тягового опору у вдосконаленому варіанті В2 становить 14,4–16,1 % (в середньому 15,7 % при $d = 30$ см, $V = 8$ км/год) порівняно з серійним В1. Нульова гіпотеза H_0 відхилена на рівні $p < 0,01$ для всіх дев'яти дослідних точок. Регресійні моделі $R_{B2}(d, V)$ адекватно описують дослідні дані ($R^2 = 0,984$).

5. Вдосконалений варіант В2 відповідає агровимозі ДСТУ 4521:2006 щодо рівномірності глибини обробітку ($\sigma_d \leq 2,0$ см) у всьому діапазоні $d = 25\text{--}35$ см, тоді як серійний В1 перевищує норму вже при $d = 30$ см. Ступінь кришення ґрунту підвищено з 68,4 до 76,1 % ($p < 0,05$), що покращує умови для подальших технологічних операцій.

6. Техніко-економічна оцінка показала, що вартість модернізації одного агрегату становить 18 650 грн. Річна економія при обробітку 1000 га (зниження витрат пального 2700 л і скорочення додаткових технологічних проходів) складає 249 500 грн. Термін окупності – близько 27 діб, що підтверджує значну економічну ефективність запропонованих конструктивних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаптивні системи землеробства : підручник / В. П. Гудзь та ін. Київ : Центр навчальної літератури, 2019. 336 с.
2. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
3. Застосування способів основного обробітку ґрунту в сівоzmінах / В.М. Кабанець, М.Г. Собко, О.В. Радченко / під ред. М.Г. Собка. – Сад, 2015. – 16 с.
4. Машина для обробітку ґрунту та сівби: монографія / [Колектив авторів]; Міністерство аграрної політики та продовольства України; УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2022. – 427 с.
5. Машина для обробітку ґрунту та внесення добрив : навч. посібник з курсів : «Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва» та «Сільськогосподарські машини» : для студент. спец. «Агрономія», «Агроінженерія», «Галузеве машинобудування» / В. М. Сало, С. М. Лещенко, П. Г. Лузан [та ін.]. – Х. : Мачулін, 2016. – 244 с.
6. Сільськогосподарські машини та їх використання: Навчальний посібник / Боженко В.О. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 420 с.
7. Сільськогосподарські машини: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою організації навчального процесу для студентів агрономічного факультету / М.М. Сенчук, М.І. Трегуб, В.А. Демещук.– Біла Церква, 2010.– 343 с.
8. <https://avers-agro.com.ua/ukr/rippers>
9. <https://www.horsch.com/ua/produkty/mashiny-dlja-obrabotki-pochvy/kultivatory/terrano-fx>
10. <https://www.kuhn.ua/roslynnytstvo/obrobitok-gruntu/lushchylnyky/zubovi-lushchylnyky/cultimer-m-l>

11. <https://amazone.us/en-us/products-digital-solutions/agricultural-technology/cultivation/cultivators/cenius-2tx-trailed-cultivator-2005314/2005066-2005066>
12. <https://www.gregoire-besson.com/ua/machines/helios>
13. Saleh, A.W., Tahir, H.T., & Mohammed, T.J. (2025). Comparative Study of Chisel Plough Types and Their Effect on Some Performance Characteristics. *Acta Technologica Agriculturae*, 28, 212 - 219. DOI:10.2478/ata-2025-0027.
14. Hettiaratchi, D.R., & Reece, A.R. (1974). The calculation of passive soil resistance. *Geotechnique*, 24, 289-310. <https://doi.org/10.1680/geot.1974.24.3.289>.
15. McKyes, E. and Ali, O. (1977) The Cutting of Soil by Narrow Blades. *Journal of Terramechanics*, 14, 43-58. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-4898\(77\)90001-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4898(77)90001-5).
16. Godwin, R.J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research*, 97, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>.
17. Stafford, J.V., & Tanner, D.W. (1983). Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction. *Soil & Tillage Research*, 3, 321-330. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(83\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(83)90034-X).
18. Manuwa, S.I. (2009). Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. *Soil & Tillage Research*, 103, 399-405. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>.
19. Almaliki, S., A. J. AbdulSada, and A. A. Salim. 2025. Development and evaluation of an electronic system for measuring the performance of ploughs: a comparative study of three types of ploughs. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 27(3):265-279.
20. Fielke, J.M., 1996. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63, 61-72.
21. Salar M.R., Karparvarfard S.H., Askari M., Kargarpour H. (2021): Forces and loosening characteristics of a new win-ged chisel plough. *Res. Agr. Eng.*, 67: 17–25. <https://doi.org/10.17221/71/2020-RAE>.

22. Al-Najjar, S. Q. J., & Jasim, H. A. (2024). Analysis of Chisel Plough Shovel Designs Using Finite Element Methods. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 11(2), 41–52. <https://doi.org/10.53523/ijoirVol11I2ID393>.
23. Fielke, J., & Desbiolles, J. (2009). The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2009.01.003>.
24. Al-Suhaibani, S. & Ghaly, A. (2010). Effect of Plowing Depth of Tillage and Forward Speed on the Performance of a Medium Size Chisel Plow Operating in a Sandy Soil. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(3), 247-255. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.247.255>.
25. Saleh, A.W., Tahir, H.T. & Mohammed, T.J. (2025). Comparative Study of Chisel Plough Types and Their Effect on Some Performance Characteristics. *Acta Technologica Agriculturae*, 28(4), 212-219. <https://doi.org/10.2478/ata-2025-0027>.
26. Soane, B.D. and Van Ouwerkerk, C., Eds. (1994) *Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering Series, Volume 11.* Elsevier Science, Amsterdam, 662.
27. ДСТУ 4521:2006. Машини для обробітку ґрунту. Методи оцінювання якості роботи. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 24 с.
28. 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.
29. Michalowski, R.L. (2005). Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Geotechnical Correlations for Soils and Rocks*. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1429).
30. Hettiaratchi, D. R. P., and A. R. Reece. 1974. "The calculation of passive soil resistance." *Géotechnique* 24 (3): 289–310. <https://doi.org/10.1680/geot.1974.24.3.289>.
31. Ucgul, M., Fielke, J.M., & Saunders, C. (2014). Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and

- parameters for a cohesionless soil. *Biosystems Engineering*, 121, 105-117.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.005>.
32. Stafford, J. V., & Tanner, D. W. (1983). Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction. *Soil & Tillage Research*, 3(4), 321–330.
[https://doi.org/10.1016/0167-1987\(83\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(83)90034-X).
33. Salar M.R., Karparvarfard S.H., Askari M., Kargarpour H. (2021): Forces and loosening characteristics of a new winged chisel plough. *Res. Agr. Eng.*, 67: 17–25. <https://doi.org/10.17221/71/2020-RAE>.
34. Box G.E.P., Hunter J.S., Hunter W.G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2005. 664 p.
35. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки: Навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, К.В. Васильковська, Д.І. Петренко. – Харків: Мачулін, 2019. – 164 с. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10486>.
36. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності G11 «Машинобудування (за спеціалізаціями)», спеціалізація G11.03 «Технологічні машини та обладнання», освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування» / уклад.: Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, С.М. Мороз, Ю.В. Мачок, О.В. Нестеренко. М-во освіти і науки Укр., Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2026.– 46 с.
37. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / [Войтюк Д. Г. та ін.]; за ред. С. С. Яцуна. – [2-ге вид., перероб. і допов.]. – Суми: Сумський нац. аграр. ун-т, 2011. – 444 с.
38. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. *Основи охорони праці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. За редакцією М.П. Гандзюка.* – К.: Каравела, 2003. – 408 с.

ДОДАТКИ