

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Підвищення ефективності основного обробітку ґрунту в системі
органічного землеробства шляхом модернізації роторного плуга»**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Свічка Євгеній Юрійович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: "Магістр"

208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„_____” _____ 20__ р.

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

Свічка Євгеній Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності основного обробітку ґрунту в системі органічного землеробства шляхом модернізації роторного плуга керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“24” жовтня 2025 року №3182

2. Строк подання студентом роботи 27.11.2025 р

3. Вихідні дані до роботи 1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку органічного землеробства в Україні, аналіз джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз сучасного стану органічного землеробства. 2. Теоретичне обґрунтування дипломної роботи. 3. Обґрунтування методики проведення та результатів експериментальних досліджень 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленого комбінованого агрегату. Висновок. Список літератури.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).

2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуш, А4). 3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Експериментальні дослідження (2 аркуші А4)
 5. Економічна частина. (1 аркуш 4А)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В. , доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Теслюк Г.В., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання 30.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 27.05.25 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30. 06.25 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 8.09.25 р.	
4	Охорона праці	до 06.11.25 р.	
5	Економічна частина	до 20.11.25 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 23.11.25 р.	

Студент _____
(підпис)

Свічка Є.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Золотовська О.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Свічкарь Є.Ю. Підвищення ефективності основного обробітку ґрунту в системі органічного землеробства шляхом модернізації роторного плуга / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025

У роботі розглянуто вдосконалення технології основного обробітку ґрунту в умовах органічного землеробства. Запропоновано новий технічний засіб – комбінований агрегат із роторним плугом, обладнаним активними (сферичними дисками) та пасивними (ґрунтопоглиблювачами) робочими органами. Таке поєднання забезпечує одночасне виконання кількох технологічних операцій: заорювання органічних решток, розпушування ущільнених шарів ґрунту та покращення структури орного горизонту. Установка ґрунтопоглиблювачів у колії трактора дозволяє зменшити боковий увод машино-тракторного агрегату, стабілізувати глибину обробітку і підвищити рівномірність розпушування. Проведено аналіз конструктивно-режимних параметрів, що впливають на тягові та енергетичні показники агрегату, а також визначено умови, за яких забезпечується найвища ефективність роботи. Застосування розробленого комбінованого агрегату сприятиме зниженню енергетичних витрат, покращенню екологічного стану ґрунтів та підвищенню продуктивності сільськогосподарського виробництва в системі біологізованого землеробства.

Ключові слова: роторний плуг, ґрунтопоглиблювач, енергоефективність, органічне землеробство, основний обробіток ґрунту, комбінований агрегат.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 ОБГРУНТУВАННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗЕМЛЕРОБСТВА	10
1.1 Аналіз способів використання органічного землеробства	10
1.2 Вибір способу основного обробітку ґрунту та підбір сільськогосподарських агрегатів у технології органічного землеробства	13
1.2.1 Загальні підходи до основного обробітку ґрунту	13
1.2.2 Раціоналізація технологічних операцій	14
1.2.3 Позитивний вплив дрібного та смугового обробітку	15
1.2.4 Вимоги до розроблюваного агрегата	15
1.3 Аналіз конструкцій ґрунтообробних машин для альтернативного землеробства	16
1.4 Аналіз теоретичних досліджень щодо удосконалення та оцінки тягово-приводних агрегатів у агротехнологіях	26
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ АГРЕГАТА	32
2.1 Критерії оцінювання продуктивності та енергетичної ефективності тягово-привідного агрегату	32
2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів тягово-приводного агрегату	39
2.3 Визначення оптимальної швидкості роботи агрегату за критерієм енергоефективності	42
3 ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
3.1 Модель роторного плуга для органічного землеробства	46
3.2 Методика визначення фізико-механічних властивостей ґрунту	47
3.2.1 Визначення об'ємної маси ґрунту	47
3.2.2 Визначення твердості ґрунту	49
3.3 Методика визначення тягового опору модернізованого роторного плуга	50
3.4 Планування багатофакторного експерименту в польових умовах	57
3.5 Результати експериментальних досліджень тягового опору роторного плуга	59
3.6 Результати випробувань агрегата з модернізованим плугом	62
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	67
4.1 Екологічні аспекти застосування роторного плуга	68
4.2 Рекомендації з екологічної безпеки	69
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ	71
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

Вступ

Сучасний розвиток агропромислового комплексу України вимагає впровадження таких технологій вирощування сільськогосподарських культур, які забезпечують не лише високу продуктивність, а й збереження та відтворення родючості ґрунтів, зниження техногенного навантаження на довкілля та виробництво екологічно безпечної продукції. У цьому контексті особливого значення набуває органічне землеробство, яке базується на принципах біологізації технологій та виключає використання синтетичних мінеральних добрив, пестицидів і генетично модифікованих організмів.

Перехід на органічне виробництво в Україні є стратегічним напрямом розвитку аграрної сфери. Біологізація землеробства передбачає застосування сидеральних культур, органічних добрив, короткоротаційних сівозмін, а також заходів, спрямованих на зниження ущільнення ґрунту та раціональне використання поживних решток. Такі прийоми дають можливість підтримувати природну родючість ґрунтів, підвищувати їх біологічну активність і забезпечувати сталий розвиток агросистем.

Кліматичні умови України сприятливі для поширення органічного землеробства. Лісостеп і Полісся мають оптимальні параметри зволоження та температурного режиму для вирощування зернових, зернобобових і картоплі, тоді як у степовій зоні існують передумови для ефективного виробництва кукурудзи, соняшнику та сої. Водночас актуальною проблемою залишається деградація чорноземів, зниження вмісту гумусу та періодичні прояви посухи, що потребує пошуку альтернативних систем ведення господарства.

Зростаючий попит на органічну продукцію на внутрішньому і зовнішньому ринках створює додаткові економічні стимули для розвитку цього напрямку. Водночас важливою умовою підвищення ефективності органічного виробництва є вдосконалення технічного забезпечення, зокрема застосування енергозберігаючої техніки, яка мінімізує негативний вплив на ґрунт і забезпечує якісне виконання агротехнологічних операцій.

Отже, органічне землеробство в Україні є одним із пріоритетних напрямів сталого розвитку сільського господарства, що поєднує екологічні, економічні та соціальні аспекти. Дослідження його теоретичних основ та практичних шляхів удосконалення є надзвичайно актуальним і має важливе значення для формування конкурентоспроможного аграрного сектору країни. Актуальність теми обумовлена необхідністю переходу аграрного виробництва України на екологічно безпечні та ресурсозберігаючі технології, що дозволяють підвищити продуктивність сільськогосподарських культур, зберегти родючість ґрунтів та забезпечити зростаючий попит на органічну продукцію як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності використання колісних тракторів під час основної обробки ґрунту є удосконалення їх тягово-зчіпних властивостей. Це може бути досягнуто за рахунок застосування активних робочих органів ґрунтообробних машин, кінематична енергія яких використовується як додаткове джерело рушійної сили, що виконує роль допоміжного ведучого моста. Такий підхід забезпечує одночасне виконання технологічного процесу та переведення машинно-тракторного агрегату у раціональний тяговий режим роботи.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності використання ґрунтообробних машинно-тракторних агрегатів шляхом удосконалення технологічних і технічних рішень основної обробки ґрунту з одночасною заробкою органічної маси в системі органічного землеробства.

Об'єктом дослідження є процес основної обробки ґрунту в умовах органічного землеробства.

Предметом дослідження є технологічні та конструктивно-режимні параметри роботи ґрунтообробних машинно-тракторних агрегатів при заробці сидеральних культур, стерні та пожнивних решток у ґрунт.

Завдання дипломної роботи:

Обґрунтувати критерії оцінки ефективності роботи, конструктивно-технологічну схему та режимні параметри тягово-приводного агрегату для

виконання операції основного обробітку ґрунту в технології біологізованого (органічного) землеробства.

Розробити методику розрахунку конструктивно-режимних параметрів та продуктивності тягово-приводного агрегату за критерієм удельних енергетичних витрат з урахуванням ключових факторів, що впливають на ефективність роботи агрегату: режими руху агрегату та тяговий опір; ширина захвату та робоча швидкість; маса енергетичного засобу та робочої машини; кривизна траєкторії руху та сили, що діють на агрегат; енергетичні витрати на виконання робочого процесу.

1 ОБГРУНТУВАННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗЕМЛЕРОБСТВА

1.1 Аналіз способів використання органічного землеробства

Органічне землеробство – це система ведення сільськогосподарського виробництва, яка передбачає вирощування продукції без застосування синтетичних мінеральних добрив, пестицидів та регуляторів росту, що негативно впливають на довкілля. Його основою є використання природних біологічних процесів, що забезпечують підтримання і відновлення родючості ґрунту, підвищення біологічної активності агроценозів та формування екологічно безпечної продукції.

В умовах України розвиток органічного землеробства має особливе значення, адже країна володіє значним потенціалом родючих чорноземів, сприятливими кліматичними умовами та високим попитом на органічну продукцію як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Одним із найважливіших елементів органічного землеробства є застосування органічних добрив, до яких належать гній, компости, біогумус, торф та пожнивні рештки. Вони сприяють:

- збагаченню ґрунту органічною речовиною;
- підвищенню вмісту гумусу;
- покращенню водно-фізичних властивостей;
- активізації ґрунтової мікрофлори.

На відміну від мінеральних добрив, органічні діють комплексно, забезпечуючи довготривалий ефект і відновлення природної структури ґрунту. Однак їх недоліком є потреба у значних обсягах та складності транспортування і внесення.

Посів сидеральних культур (гірчиці, фацелії, ріпаку, вики, люпину тощо) з подальшою заробкою у ґрунт є одним із найбільш ефективних прийомів органічного землеробства. Сидерати:

- збагачують ґрунт азотом і мінеральними елементами;

- покращують його структуру та водопроникність;
- пригнічують розвиток бур'янів;
 - зменшують ерозійні процеси.

Особливо ефективним є використання сидератів у короткоротаційних сівозмінах, коли вони виступають альтернативою мінеральним добривам.

Сівозміна є важливою складовою органічного виробництва. Раціональне чергування культур дозволяє підтримувати баланс поживних речовин, зменшувати поширення хвороб і шкідників та забезпечувати стійкість агроecosystem. У практиці органічного землеробства застосовують короткоротаційні сівозміни з включенням зернобобових культур та багаторічних трав.

Вони забезпечують:

- насичення ґрунту азотом;
- зниження фітосанітарного навантаження;
- підвищення продуктивності полів у довготривалій перспективі.

У системі органічного землеробства важливим напрямом є зменшення кількості механічних обробіток. Використання технологій мінімального обробітку та No-Till дозволяє:

- знизити енергетичні витрати;
- зберегти природну структуру ґрунту;
- мінімізувати його ущільнення;
- зменшити ерозійні процеси.

Водночас такі технології потребують спеціалізованої техніки та ретельного підбору культур, що може ускладнювати їх впровадження у невеликих господарствах.

Органічне землеробство відмовляється від застосування хімічних пестицидів, натомість використовуються:

- біопрепарати на основі мікроорганізмів;
- ентомофаги;
- біоінсектициди та біофунгіциди.

Це дозволяє зменшити пестицидне навантаження на довкілля та забезпечити екологічну чистоту продукції.

Солома, стерня та інші рештки врожаю в системі органічного землеробства застосовуються як органічне добриво або мульча. Це забезпечує:

- поповнення органічної речовини в ґрунті;
- збереження вологи;
- регуляцію температурного режиму верхнього шару ґрунту;
- захист від бур'янів та ерозії.

Проведений аналіз показує, що способи використання органічного землеробства в Україні базуються на комплексному поєднанні біологічних, агротехнічних та екологічно безпечних прийомів. Їх ефективність значною мірою залежить від кліматичних умов, типу ґрунтів та рівня технічного забезпечення господарства. Раціональна інтеграція зазначених методів дозволяє отримувати стабільні врожаї, підвищувати родючість ґрунтів і водночас мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 1.1

Характеристика способів органічного землеробства

Спосіб	Переваги	Недоліки
Використання органічних добрив (гній, компости, біогумус, торф)	Підвищення вмісту гумусу. Активізація ґрунтової мікрофлори. Покращення водно-фізичних властивостей ґрунту. Довготривалий ефект	Потреба у великих обсягах. Високі витрати на транспортування і внесення. Ризик поширення бур'янів та патогенів
Сидерація (зелене добриво)	Збагачення ґрунту азотом і поживними елементами. Поліпшення структури ґрунту. Пригнічення бур'янів. Зменшення ерозії	Займає час і площу. Потребує додаткових витрат на посів та заробку сидератів
Раціональна сівоzmіна	Зменшення хвороб і шкідників. Збереження родючості ґрунту. Підвищення	Необхідність чіткого планування. Потреба у великому земельному банку

	продуктивності у довгостроковій перспективі	
Мінімізація механічного обробітку (Mini-Till, No-Till)	Збереження структури ґрунту. Зменшення ерозії. Зниження енергетичних витрат. Збереження вологи	Висока вартість спеціалізованої техніки. Складність боротьби з бур'янами без гербіцидів
Біологічний захист рослин (біопрепарати, ентомофаги, біофунгіциди)	Відсутність пестицидного навантаження. Екологічна безпечність продукції. Збереження корисної фауни	Менша ефективність порівняно з хімічними препаратами. Залежність від погодних умов
Використання поживних решток і мульчування	Поповнення органічної речовини. Збереження вологи. Захист від бур'янів та перегріву ґрунту. Зменшення ерозії	Можливість поширення хвороб та шкідників. Потреба у спеціальних знаряддях для рівномірного розподілу

1.2 Вибір способу основного обробітку ґрунту та підбір сільськогосподарських агрегатів у технології органічного землеробства

1.2.1 Загальні підходи до основного обробітку ґрунту

Вибір способу основного обробітку ґрунту в технології органічного землеробства з одночасним закладенням сидератів у верхній шар ґрунту та підбір відповідних сільськогосподарських агрегатів визначаються структурою сівозміни та пріоритетами розробників органічного землеробства. Найчастіше обробіток проводиться за схемами, представленими на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Схема обробітку ґрунту в органічному землеробстві

1.2.2 Раціоналізація технологічних операцій

Зменшення кількості технологічних операцій у процесі обробітку ґрунту безпосередньо сприяє зниженню виробничих витрат і собівартості продукції. У контексті органічного землеробства доцільним є застосування нового прийому та агрегата для основного обробітку ґрунту (рис. 1.3, схема 4), який забезпечує одночасне виконання таких операцій:

- закладення сидератів;
- обробіток стерні та пожнивних залишків;
- основний обробіток ґрунту без формування плужної підшви на глибину до 0,15 м.

Крім того, агрегат дозволяє здійснювати смугове заглиблення ґрунту на глибину орного горизонту – від 0,2 до 0,25 м, що запобігає надмірному зволоженню ґрунту у другій половині літа та восени, що підтверджено дослідженнями українських та зарубіжних авторів (Hobbs et al., 2008; Lal, 2015).

1.2.3 Позитивний вплив дрібного та смугового обробітку

Поєднання дрібного основного обробітку та смугового заглиблення ґрунту:

- сприяє формуванню більшої рослинної маси;
- покращує динаміку переносу вологи у ґрунті;
- забезпечує підтримання продуктивності культур в умовах органічного землеробства.

1.2.4 Вимоги до розроблюваного агрегата

Для забезпечення високої ефективності агрегат повинен відповідати наступним критеріям:

Універсальність – адаптація агрегата до різних сівозмін та можливість використання на всіх етапах технологічного процесу основного обробітку ґрунту;

Комбінованість – поєднання декількох технологічних операцій, зокрема одночасна обробка сидератів та ґрунту, стерні та ґрунту із заглибленням на глибину орного горизонту;

Раціональна компоновка – ефективне використання активних та пасивних робочих органів для обробітку сидератів, стерні та ґрунту;

Агроекологічна сумісність – дотримання допустимого тиску на ґрунт, мінімізація буксування, оптимальний тяговий режим та робочі швидкості;

Енергетична ефективність – зменшення витрат пального та енергії на одиницю продуктивності.

Таким чином, впровадження комбінованого агрегата у технології органічного землеробства дозволяє:

- підвищити продуктивність культур;
- знизити витрати ресурсів;
- посилити агроекологічну стійкість ґрунтового покриву.

1.3 Аналіз конструкцій ґрунтообробних машин для альтернативного землеробства

Одним із основних видів ґрунтообробних машин, що застосовуються в технологіях альтернативного землеробства, є дискові борони та дискатори. Вони виготовляються у навісному та причіпному виконанні, з робочою шириною захвату від 3 до 8 м. Такі агрегати застосовують як для основного, так і для передпосівного обробітку ґрунту, а також для заробки пожнивних решток. Основними робочими органами цих машин є сферичні диски, які забезпечують перевертання та подрібнення верхнього шару ґрунту, що сприяє підготовці посівного ложа.

Аналіз наукових досліджень в Україні показує, що модернізація дискових борін та дискаторів здебільшого зосереджена на удосконаленні конструкції пасивних дискових робочих органів, зокрема на зміні їх розташування та способів навішування. При цьому дослідження щодо підвищення курсової та поздовжньої стійкості агрегатів з дисковими роторними робочими органами зустрічаються рідше. Так, для поліпшення стійкості навісних дискових борін пропонується з'єднувати секції між собою пружними елементами, що дозволяють взаємний поворот і регулювання кута атаки. У причіпних дискових боронах застосовують шарнірно-важільні механізми, які дають змогу регулювати положення борони як у поздовжній, так і в поперечній площині.

До основних недоліків дискових борін і дискаторів на важких ґрунтах слід віднести:

- недостатнє подрібнення оброблюваного шару;
- низьку якість вирівнювання поверхні поля;
- неповну заробку сидератів та високих пожнивних решток за один прохід;
- забивання робочих органів органічними залишками та ґрунтом при підвищеній вологості;
- значні енергетичні витрати під час роботи агрегата.

Активні ротаційні робочі органи мають власний привід від вала відбору потужності трактора, гідросистеми або автономного двигуна, встановленого

безпосередньо на агрегаті. Такі робочі органи не лише виконують обробіток ґрунту, але можуть також слугувати рушійми, забезпечуючи покращення прохідності агрегата. До них належать різноманітні ротаційні плуги, просапні фрези та інші роторні машини, які забезпечують обробіток ґрунту на глибину від 10 до 45 см.

Порівняльний аналіз пасивних і активних робочих органів наведено в таблиці 1.2:

Таблиця 1.2

Тип робочих органів	Переваги	Недоліки
Пасивні дискові (борони, дискатори)	простота конструкції та відносно невисока вартість; можливість одночасного обробітку та часткової заробки пожнивних решток; ефективні на легких і середніх ґрунтах	недостатнє подрібнення важких ґрунтів; незадовільна якість вирівнювання поверхні; погана заробка сидератів та високої стерні за один прохід; забивання органічними рештками у вологих умовах; високі витрати енергії на важких ґрунтах
Активні ротаційні (фрези, ротаційні плуги, робочі органи-рушії)	висока якість подрібнення ґрунту; можливість регулювання глибини (10–45 см); краще перемішування ґрунту з органічними рештками; виконують функцію рушіїв; висока продуктивність у передпосівному обробітку	висока вартість та складність конструкції; потребують потужного трактора; складність технічного обслуговування; швидкий знос робочих органів на твердих і кам'янистих ґрунтах; великі енергетичні витрати

Фрезерування ґрунту активними ротаційними органами позитивно впливає на фізичні властивості ґрунту, покращує водний та поживний режими росту рослин, а інтенсивне перемішування ґрунтової маси підвищує активність

грунтової біоти на всій глибині оброблюваного шару. Одним із провідних виробників роторних та фрезерних плугів є компанія FALC, техніка якої забезпечує якісний обробіток ґрунту на глибину 35–45 см та відзначається високою експлуатаційною надійністю (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Роторний плуг Free Land 3000 та Falc Falcland

Ротаційні плуги при основному обробітку ґрунту дозволяють підвищити продуктивність приблизно на 30% порівняно з традиційними лемішними плугами. Водночас такі агрегати мають певні недоліки: вони відзначаються високою матеріаломісткістю, потребують тракторів високого тягового класу, не забезпечують повного обороту пласта ґрунту та працюють на невеликих швидкостях — до 6 км/год. Закордонні дослідження показали, що під час роботи ротаційні органи піддаються ударним навантаженням від взаємодії з ґрунтом, що викликає появу невірноважених моментів на роторі і знижує надійність експлуатації таких машин.

Перспективним напрямом розвитку ґрунтообробної техніки є використання ротаційних машин із двопотоковим використанням потужності. Такий підхід дозволяє підвищити якість обробітку ґрунту, зменшити кількість операцій із підготовки поля до посіву та більш ефективно використовувати потужність двигуна.

Прикладом подібних машин є комбіноване знаряддя «Вібро-тіллер» (компанія Standen, Велика Британія), яке конструктивно складається з культиватора з пружинними лапами та легкої фрези. Воно застосовується для

передпосівного обробітку ґрунту після оранки плугом. За один прохід «Вібротіллер» виконує три функції одночасно: лапами розпушує ґрунт, фрезою подрібнює грудки, а відкидний щиток з регулюванням по висоті вирівнює поверхню поля.

Сучасним прикладом двопотокових машин є також комбіновані фрези з розпушувальними стійками. Використання таких стійок забезпечує рівномірну глибину обробітку та поздовжню стійкість агрегата. Водночас на глинистих і суглинкових ґрунтах лапи стійок можуть сприяти утворенню «плужної підшви».

Літературний аналіз показав, що момент, необхідний для приводу фрези у попередньо розпушеному ґрунті, у три рази менший, а при комбінуванні з лемішним плугом — у п'ять разів менший, ніж під час роботи фрези в монолітному ґрунті. Водночас комбіновані знаряддя потребують значного тягового зусилля, яке лише частково компенсується підштовхувальною дією активного роторного органа.

Таким чином, застосування ротаційних ґрунтообробних машин із двопотоковим використанням потужності дозволяє ефективніше використовувати енергію двигуна та скоротити кількість операцій із підготовки ґрунту до посіву. Проте на важких ґрунтах такі агрегати менш ефективно подрібнюють ґрунтові грудки порівняно з окремими фрезами. (таблиця 1.3)

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика

Характеристика	Ротаційний плуг	Двопотокове комбіноване знаряддя (фреза + лапи)
Продуктивність	+30 % порівняно з лемішним плугом	Вища ефективність за рахунок одночасного виконання декількох операцій
Глибина обробітку	До 35–40 см	Регульована, зазвичай 10–45 см
Витрати енергії	Високі, потребує потужного трактора	Ефективніше використовує потужність двигуна

Якість обробітку	Недостатній оборот пласта ґрунту	Краща подрібнювальна здатність, вирівнювання поверхні поля
Недоліки	Матеріаломісткість, ударні навантаження на ротор, низька швидкість (до 6 км/год)	Менше подрібнює ґрунтові грудки на важких ґрунтах; потребує значного тягового зусилля
Особливості	Використовується для основного обробітку ґрунту	Виконує одночасно розпушення лапами, подрібнення фрезою та вирівнювання щитком; можливість двопотокового використання потужності



a)



b)

Рисунок 1.8 – Приклади конструкцій комбінованих тягово-привідних фрезерних машин

а) комбінована фреза «Вібро-тіллер»; б) комбінована фреза з розпушувальними стійками

Одним із істотних недоліків фрезерних ґрунтообробних машин є наявність значних реактивних сил, що виникають у процесі роботи ротаційних органів. Горизонтальна складова реакції ґрунту, спрямована вперед за ходом руху агрегата, у певних умовах може досягати значних величин і призводити до втрати керованості трактора. Вертикальна ж складова часто спричиняє підйом фрези з ґрунту, що негативно позначається на стабільності та рівномірності обробітку.

Незважаючи на високу якість подрібнення, фрезерні агрегати не набули широкого поширення у господарствах через низку причин: підвищену енергоємність процесу, нижчу продуктивність порівняно з лемішними плугами, а також надмірно інтенсивне руйнування ґрунтової структури. Останнє особливо небезпечно для важких суглинкових і глинистих ґрунтів, де відбувається швидке повторне ущільнення, погіршення водно-повітряного режиму та зниження активності ґрунтової біоти.

У системі біологізованого землеробства перспективним напрямом розвитку вважається застосування плугів із ротаційними активними сферичними дисками. У цьому контексті особливий інтерес становлять дослідження інженерів Південної Азії, які оцінили енерговитрати машин із дисковими та фрезерними робочими органами. Запропоновані ними моделі дозволяють прогнозувати ефективність дискових систем порівняно з фрезерними залежно від конкретних умов роботи.

Значний внесок у цей напрям зробили також далекосхідні науковці, які працювали над створенням агрегатів для технологій біологічного відтворення родючості ґрунту. Результатом цих досліджень стало розроблення ротаційних плугів для основного обробітку та заробки рослинних решток. Такі плуги мали робочу ширину захвату 1,3–2,4 м і приводилися в дію від вала відбору потужності трактора.

Одним із найперспективніших зразків став навісний ротаційний плуг ПРН-1,8, призначений для тракторів класу 1,4. Машина пройшла багаторічні випробування в умовах органічного землеробства, де підтвердила свою функціональність. Конструктивні особливості плуга передбачали підтримання глибини обробітку 15–20 см за допомогою копіювальних коліс, вирівнювання поверхні за рахунок зубчастого пристрою та стабілізацію курсової стійкості дисковим стабілізатором із регулюванням кута установки. Робота плуга відзначалася якісним розпушенням ґрунту та стабільністю руху на другій і третій передачах трактора.

Разом із тим експлуатаційні випробування виявили низку недоліків конструкції. Серед них – нерівномірність обробітку по глибині, погіршення курсової стійкості на підвищених швидкостях, явище самовикопування на твердих ґрунтах, а також порівняно невисока надійність під час тривалого використання.



Рисунок 1.9 – Плуг марки Плуq-322

Важливою особливістю конструкції є оригінальне інженерне рішення проблеми курсової стійкості. Воно реалізується шляхом вибору оптимального кута атаки дисків (18°) та застосування задніх кутів різання з від'ємним значенням (-12°), що дозволяє взаємно урівноважити поперечні сили, які виникають у процесі роботи на дискову батарею. Завдяки цьому забезпечується стабільність руху агрегата під час основної обробки ґрунту.

Розроблений роторний плуг успішно пройшов виробничі випробування в системі біологізованого землеробства, зокрема на базі Амурської МІС у технологічно-технічних умовах вирощування зернових культур і сої. Результати досліджень засвідчили високу ефективність застосування плуга, проте виявили й певні обмеження. Зокрема, під час роботи на підвищених швидкостях через використання дисків із від'ємним значенням заднього кута різання спостерігалось порушення процесу обробки ґрунту, що проявлялось у виглибленні робочих органів.



Рисунок 1.10 – Модернізований плуг під час обробітку сидеральних культур

Розроблений агрегат призначений для виконання поверхневого та основного обробітку ґрунту з одночасним загортанням біомаси сидеральних культур, що є важливим елементом органічних технологій збереження та відтворення родючості. Конструктивною особливістю є інженерне рішення проблеми курсової стійкості [111], яке реалізоване завдяки вибору оптимального кута атаки дисків (18°) та використанню від'ємних задніх кутів різання (-12°). Це забезпечує урівноваження поперечних сил, що виникають під час роботи, та підвищує стабільність агрегата в енергозберігаючих і ґрунтозахисних технологіях органічного виробництва. Разом із тим, випробування показали, що при роботі на підвищених швидкостях установка дисків із від'ємним заднім кутом різання спричиняє виглиблення робочих органів, що може негативно впливати на якість обробітку.

У ході експлуатаційних досліджень також встановлено, що на високих швидкостях виникають труднощі з курсовою стійкістю агрегата, а в окремих випадках спостерігається пробуксовування коліс трактора. Згідно з теорією тракторів, у подібних ситуаціях у машинно-тракторному агрегаті (МТА) формується паразитна потужність, яка циркулює в системі. Вона виникає внаслідок дії від'ємної дотичної сили, додатково навантажує трансмісію та зумовлює механічні втрати (Білецький, 2019; Wong, 2010).

Аналіз сучасних тенденцій розвитку сільськогосподарської техніки свідчить, що роторні плуги є одними з найбільш ефективних і перспективних знарядь у технологіях органічного (біологізованого) землеробства (Кириченко, 2020; Patel et al., 2018). Вони забезпечують якісне проведення основного обробітку у визначені агротехнічні строки, характеризуються прийнятними енергетичними та експлуатаційними показниками, а також сприяють відтворенню родючості завдяки рівномірному загортанню органічних решток і сидеральних культур.

Застосування активних сферичних дисків у складі роторних плугів має додаткову перевагу – відсутність формування плужної підшви. Це дозволяє виконати повноцінний основний обробіток із загортанням сидератів чи стерні у верхній шар ґрунту за один прохід агрегата (Демиденко, 2021; Lal, 2015). Така технологія сприяє покращенню структури орного шару, активізації обмінних процесів, мінералізації органіки та, як наслідок, підвищенню урожайності культур. Дослідження зарубіжних науковців (Kerper et al., 2013; Godwin, 2007) підтверджують, що роторні плуги, порівняно з пасивними знаряддями, відзначаються нижчими енерговитратами при виконанні аналогічних операцій.

Водночас виявлено низку характерних недоліків існуючих конструкцій роторних плугів (Кириченко, 2020; Kushwaha & Zhang, 2008):

- обертальний момент ротора за певних умов створює додаткові навантаження на трансмісію трактора, що зумовлює підвищені механічні втрати;
- вертикальна складова реакції ґрунту може спричинити самовиглиблення робочих органів;
- встановлення ротора під кутом атаки викликає бічний зсув МТА, що знижує курсову стійкість і керованість;
- для усунення цього ефекту застосовують стабілізатори у вигляді дискових елементів або польових дощок;
- недостатнє заглиблення робочих органів у щільні ґрунти вимагає використання баластних вантажів;

– спостерігається нерівномірність обробітку, відносно низька надійність, а також обмеження за робочою швидкістю (не більше 6–7 км/год).

Таким чином, удосконалення конструкцій роторних плугів є актуальним і перспективним напрямом розвитку ґрунтообробної техніки в органічному землеробстві, оскільки їхнє ефективне застосування дає змогу поєднувати якісний обробіток із відновленням родючості ґрунту.

1.4 Аналіз теоретичних досліджень щодо удосконалення та оцінки тягово-приводних агрегатів у агротехнологіях

У теорії тракторів та експлуатації машинно-тракторного парку енергетичні витрати зазвичай оцінюють за величиною загального коефіцієнта корисної дії (ККД) або на основі балансу потужностей, тобто енергетичного ККД агрегата [1, 2]. Енергетичний ККД характеризує співвідношення корисно використаної енергії до загальної енергії, отриманої внаслідок згорання палива в двигуні [3]:

$$\eta_{\text{енерг}} = \frac{N_p}{N_z} = \eta_e \cdot \eta_z, \quad (1.1)$$

де η_e - ефективний ККД двигуна;

η_z - загальний ККД енергетичного засобу.

Для тягово-приводного агрегата загальний ККД можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} \eta_o &= \eta_{\text{тяг}} \cdot \eta_{\text{ВВП}}, \\ \eta_{\text{енерг}} &= \eta_e \cdot \eta_{\text{тяг}} \cdot \eta_{\text{ВВП}} \cdot \eta_f \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \delta, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де $\eta_{\text{тяг}}, \eta_{\text{ВВП}}, \eta_f, \eta_{\text{тр}}$ - відповідні коефіцієнти використання потужності; δ - поправочний коефіцієнт.

Таким чином, енергетичний ККД забезпечує достатню оцінку ефективності роботи енергетичного засобу в агрегаті, проте не відображає

повної картини його функціонування у виробничих умовах. Це пояснюється тим, що розрахунки проводяться в умовах рівномірного руху на горизонтальній поверхні без урахування зупинок, перемикань передач та підворотів трактора [2, 4].

Втрати курсової стійкості та необхідність постійного коригування напрямку призводять до збільшення буксування рушіїв і зростання бічних реакцій ґрунту. Це підвищує витрати потужності на подолання сил тертя при зсуві та збільшує опір робочих органів унаслідок зміни швидкості й напрямку руху трактора [1, 5]. Дослідження свідчать, що динамічні втрати енергії в процесі експлуатації агрегатів можуть становити від 14 до 16 % від загальних витрат [3]. Наприклад, за даними експериментів, потужність на кріюку трактора може зменшуватися на 15–50 к.с. залежно від тягового зусилля та режиму руху [4]. Для підтримання прямолінійності під час оранки при швидкості 5–7 км/год оператор здійснює до 500–600 втручань у роботу органів керування за годину, що займає близько 20–25 % робочого часу, а при швидкості 9–11 км/год ця частка зростає до 30 % [5].

Вітчизняні дослідження [1, 2] показали, що курсову стійкість агрегатів визначають кінематична довжина, опір робочих органів та ширина захвату робочої машини. Подальший розвиток теорії керованості та курсової стійкості в процесі роботи агрегатів представлений у працях українських науковців [3, 4, 5].

У цих роботах надано теоретичне обґрунтування впливу конструктивно-експлуатаційних (потужність двигуна, колісна формула та зчіпний вага трактора, продуктивність агрегата) та технологічних (робоча швидкість агрегата, тяговий опір та ширина захвату робочої машини) параметрів на енергетичні витрати під час виконання польових робіт та курсову стійкість агрегата.

Основними показниками, що характеризують курсову стійкість агрегата, є:

- кривизна траєкторії руху, що вказує на положення агрегата на полі;

- вагові та геометричні параметри агрегата та його частин, взаємне переміщення (положення) останніх;
- керуючі впливи під час руху агрегата;
- режими руху агрегата: швидкість переміщення та навантаження (сили, що діють на агрегат та його частини);
- енергетичні витрати на самопереміщення та виконання робочого процесу.

Для оцінки енергетичних витрат на самопереміщення та виконання робочого процесу українські науковці [6] пропонують використовувати критерій енергетичних витрат при робочому ході агрегата:

$$E_n = \frac{N_H \varepsilon_N}{Bv} \rightarrow \min \quad (1.4)$$

Цей критерій враховує вплив на енергетичні витрати достатній комплекс експлуатаційно-технологічних властивостей: питомий тяговий опір на одиницю ширини захвату робочої машини, робочу швидкість агрегата, масу енергетичного засобу та робочої машини тощо. Загалом цей критерій оцінює як тягово-зчіпні властивості енергетичного засобу, так і ефективність роботи агрегата.

Комплексний підхід до оцінки ефективності технології виробництва сільськогосподарської продукції з урахуванням роботи вдосконалених агрегатів запропонований українським науковцем [7], який включає показники енергетичних витрат, тягово-зчіпних властивостей рушіїв та механічного впливу рушіїв енергетичних засобів та машин на ґрунт. Вдосконалена машинна технологія буде ефективною у разі досягнення мінімальних енергетичних витрат при виконанні технологічних операцій.

Пропонується використовувати критерій - максимум питомої чистої продуктивності агрегату в розрахунку на одиницю потужності або споживаної енергії P_N , м²/Дж:

$$P_N = \frac{B_{HN}}{E_N} \quad (1.5)$$

Цей критерій дозволяє точно оцінити ефективність агрегату за ступенем реалізації потужності трактора в режимі робочого ходу. Оскільки в обох критеріях використовується чиста продуктивність агрегату (м²/Дж), вони придатні для порівняльної оцінки агрегатів у будь-яких ґрунтово-кліматичних умовах. Завдання адаптації до технології полягає в обґрунтуванні конструктивно-режимних параметрів агрегату при заданій потужності двигуна за мінімуму енергетичних витрат [Щитов, 2020].

Комплексний підхід до оцінки ефективності технології виробництва сільськогосподарської продукції з урахуванням роботи вдосконалених агрегатів запропонований С.В. Щитовим, який включає показники енергетичних витрат, тягово-зчіпні властивості рушіїв та механічний вплив рушіїв енергетичних засобів і машин на ґрунт. Удосконалена машинна технологія вважається ефективною, якщо дотримані умови:

$$\Delta E_{mn} = E_{mn\delta} - E_{mnn} \geq 1 \quad (1.6)$$

Ефективність технології з позиції енергозбереження оцінюється за критерієм:

$$k_E = \frac{E_{mn\delta} - E_{mnn}}{E_{mn\delta}} \quad (1.7)$$

де:

ΔE_{mn} - економія повних енергетичних витрат у технології, МДж/га;

$E_{mn\delta}$ - повні енергетичні витрати в базовому та новому варіантах технологій, МДж/га.

Аналіз теоретичних досліджень щодо вдосконалення та оцінки ефективності агрегатів дозволив визначити основні фактори, що визначають

тягово-зчіпні властивості та курсову стійкість агрегату, які впливають на якість виконання технологічних операцій та енергетичну ефективність роботи:

- режими руху агрегату (тяговий опір);
- ширина захвату та робоча швидкість;
- маса енергетичного засобу та робочої машини;
- кривизна траєкторії руху, сили, що діють на агрегат;
- енергетичні витрати на виконання робочого процесу.

Водночас, розглянуті підходи не в повній мірі враховують питання інженерної агроєкології. Вдосконалення машин проявляється в зростанні їх експлуатаційної маси, а підвищення продуктивності не враховує адаптивність до альтернативних технологій отримання екологічно безпечної продукції [Петренко та ін., 2018; Щитов, 2020]

В результаті аналізу літературних джерел та теоретичних досліджень щодо вдосконалення машин з активними робочими органами висунуто наукову гіпотезу: для підвищення експлуатаційно-технологічних показників ґрунтообробного агрегату та зменшення енергетичних витрат при основному обробітку ґрунту в технології органічного (біологізованого) землеробства доцільно застосовувати новий технологічний прийом та комбіновану машину, оснащену як активними робочими органами — сферичними дисками, так і пасивними робочими органами — ґрунтоуглиблювачами.

Встановлення ґрунтоуглиблювачів на роторний плуг по сліду коліс трактора дозволяє поєднати в технології органічного землеробства операції основного обробітку ґрунту із заробкою органічної маси та смуговим розпушенням ґрунту на глибину орного горизонту, а також виключити боковий зсув машинно-тракторного агрегату під час роботи. Такий підхід забезпечує рівномірність заглиблення сферичних робочих органів, а також роботу трактора у діапазоні тягових режимів з високим тяговим коефіцієнтом корисної дії та енергетичною ефективністю.

Висновки

1. Існуючі конструкції ротаційних плугів для технології органічного землеробства мають ряд суттєвих недоліків, серед яких: додаткове навантаження на трансмісію трактора, занурення робочих органів під дією вертикальної складової реакції ґрунту, бокове відхилення МТА, недостатнє заглиблення робочих органів, нерівномірність обробітку ґрунту та обмеження робочої швидкості.

2. Додаткові механічні втрати та самовиглиблення робочих органів підвищують енергетичні витрати агрегату та знижують ефективність виконання технологічних операцій.

3. Основними факторами, що визначають тягово-зчіпні властивості та курсову стійкість агрегату, є режими руху та тяговий опір, ширина захвату і робоча швидкість, маса енергетичного засобу та робочої машини, кривизна траєкторії руху, сили, що діють на агрегат, та енергетичні витрати на виконання робочого процесу.

4. Для підвищення ефективності роботи ротаційних плугів доцільно враховувати зазначені фактори при проектуванні конструкцій та визначенні режимних параметрів агрегату, що дозволить покращити якість обробітку ґрунту та знизити енергетичні витрати в технологіях органічного землеробства.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ АГРЕГАТА

2.1 Критерії оцінювання продуктивності та енергетичної ефективності тягово-привідного агрегату

В якості критерію оцінки ефективності роботи енергетичного засобу обираємо мінімізацію енергетичних витрат під час робочого ходу агрегату:

$$E_n = \frac{N_H \varepsilon_N}{Bv} \rightarrow \min \quad (2.1)$$

Bv – продуктивність агрегату, $\text{м}^2/\text{с}$

Зворотна величина також має важливе значення – питомої чистої продуктивності агрегату на одиницю потужності:

$$P_N = B \cdot v \frac{1}{N_H \cdot \varepsilon_N} \rightarrow \max, \quad (2.2)$$

де:

- P_N – питома продуктивність, $\text{м}^2/\text{Дж}$;
- N_H – ефективна номінальна потужність двигуна, Вт;
- ε_N – коефіцієнт використання номінальної потужності двигуна.

Вибір такого критерію дозволяє одночасно забезпечити високу продуктивність та відповідність сучасним вимогам енергозбереження. При цьому повинні виконуватися умови:

$$\delta \leq \delta_q \leq \delta_n; v \leq v_q \leq v_n,$$

де $\delta, \delta_q, \delta_n$ – поточне, допустиме та номінальне значення буксування, %;
 v, v_q, v_n – відповідно поточне, допустиме та номінальне значення чистої продуктивності.

Для підтвердження правильності вибору наведених критеріїв використовують визначення енергетичного ККД агрегату:

$$\eta_{енерг} = \frac{N_p}{N_3} = \eta_e \cdot \eta_3 \quad (2.3)$$

де:

η_e – ефективний ККД двигуна;

η_0 – загальний ККД трактора під час виконання роботи в складі агрегату.

Відповідно, η_e показує ефективність використання теплотворної здатності палива:

$$\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^3}{g_e \cdot Q} \quad (2.4)$$

де:

Q – теплота згоряння палива, Дж/кг;

g_e – питомий ефективний витрата палива, кг/Вт·год.

Загальний ККД трактора визначається як відношення корисно використаної потужності до затраченої. Для тягово-привідного агрегату це має вигляд:

$$\eta_0 = \frac{N_{кр} + N_{впн}}{N_e} \quad (2.5)$$

де:

$N_{кр}$ – потужність на гаку, Вт;

$N_{впн}$ – потужність, витрачена на привід робочих органів від вала відбору потужності, Вт;

N_e – ефективна потужність двигуна, Вт.

Позначимо витрати ефективної потужності двигуна на створення дотичної сили тяги в тягово-привідному агрегаті як $N_{e(\text{ТЯГ})}$, а витрати ефективної потужності, що йдуть на вал відбору потужності, як $N_{e(\text{ВВП})}$.

Тоді:

$$\frac{N_{\text{кр}}}{N_{e(\text{ТЯГ})}} = \eta_{\text{ТЯГ}} \quad (2.6)$$

$$\frac{N_{\text{ВОМ}}}{N_{e(\text{ВВП})}} = \eta_{\text{ВВП}} \quad (2.7)$$

де $\eta_{\text{ТЯГ}}$ – тяговий ККД, а $\eta_{\text{ВВП}}$ – ККД вала відбору потужності.

Після деяких перетворень отримаємо:

$$\eta_0 = \eta_{\text{тяг}} (1 - \xi_{\text{ввп}}) + \eta_{\text{ввп}} \cdot \xi_{\text{ввп}}, \quad (2.8)$$

де $\xi_{\text{ввп}}$ – коефіцієнт, що відображає частку потужності, використаної на привід робочих органів від вала відбору потужності (ВВП):

$$\xi_{\text{ввп}} = \frac{N_{e(\text{ввп})}}{N_e} \quad (2.9)$$

тоді енергетичний ККД агрегату визначається як:

$$\eta_{\text{енерг}} = \eta_e [\eta_{\text{тяг}} (1 - \xi_{\text{ввп}}) + \eta_{\text{ввп}} \cdot \xi_{\text{ввп}}] \quad (2.10)$$

Таким чином, для підвищення енергетичного ККД під час робочого ходу агрегату доцільно прагнути до збільшення частки потужності, яка витрачається на привід робочих органів від ВВП. Позначимо частку потужності на створення дотичної сили тяги коефіцієнтом e_N :

$$e_N = \frac{N_{e(\text{тяг})}}{N_{\text{He}} \cdot \xi_N} \quad (2.11)$$

де N_{He} – ефективна номінальна потужність двигуна, Вт;

ξ_N - коефіцієнт використання номінальної потужності.

Тоді тяговий ККД трактора у складі тягово-привідного агрегату можна подати у вигляді:

$$\eta_{тяг} = \frac{\varphi_{кр} \cdot G_m \cdot v_p}{N_{He} \cdot \xi_N \cdot e_N}, \quad (2.12)$$

де:

$\varphi_{кр}$ – коефіцієнт використання ваги;

G_T – вага трактора, Н;

v_p – робоча швидкість руху, м/с.

Відповідно, загальний ККД трактора у складі тягово-привідного агрегату можна представити як:

$$\eta_0 = \frac{\varphi_{кр} \cdot G_m \cdot v_p}{\xi_N \cdot N_{He} \cdot e_N} \cdot (1 - \xi_{всп}) + \eta_{всп} \cdot \xi_{всп}. \quad (2.13)$$

Номінальну ефективну потужність двигуна N_{He} доцільно виразити наступним чином:

$$N_{He} = \frac{(P_{крH} + G_m \cdot f_m) \cdot v_H}{\eta_{тр} (1 - \delta_H)}, \quad (2.14)$$

де індекс «н» означає номінальні значення тягового опору, робочої швидкості та буксування;

f_T – коефіцієнт опору коченню трактора;

$\eta_{тр}$ – ККД трансмісії.

У свою чергу, величина тягового опору визначається за відомими залежностями:

$$P_{кр} = (K_v + m_{pm} \cdot f_m) \cdot B_p \quad (2.15)$$

де:

K_v – питомий тяговий опір робочих органів машини, Н/м;

m_{pm} – питома маса робочої машини на одиницю робочої ширини захвату, Н/м;

f_m – коефіцієнт опору коченню робочої машини;

B_p – робоча ширина захвату, м.

Тоді загальний ККД агрегату можна подати у вигляді:

$$\eta_0 = \frac{(K_v + m_{pm} \cdot f_m) \cdot B_p \cdot v_p \cdot \eta_{tr} (1 - \delta_H)(1 - \xi_{вoм})}{G_T (\varphi_{кр} + f_T) \cdot v_{He} \cdot N + \eta_{вoм} \cdot \xi_{вoм}}, \quad (2.16)$$

де:

η_{tr} – ККД трансмісії; v_H – номінальна робоча швидкість, м/с;

G_T – вага трактора, Н.

Чисту продуктивність у формулі (2.8) можна виразити через загальний ККД агрегату:

$$B_p \cdot v_p = \frac{v_H (\eta_0 - \eta_{вoм} \cdot \xi_{вoм}) \cdot G_T (\varphi_{кр} + f_m) e_N}{(K_v + m_{pm} f_m) \eta_{mp} (1 - \delta_H)(1 - \xi_{вoм})} \quad (2.17)$$

Тоді питома продуктивність на одиницю потужності визначається:

$$\Pi_N = \frac{e_N (\eta_0 - \eta_{вoм} \xi_{вoм})}{(K_v + m_{pm} f_m) (1 - \xi_{вoм})} \rightarrow \max. \quad (2.18)$$

Звідси отримаємо обмеження по питомому опору робочих органів агрегату:

$$K_v \leq \frac{N_H \cdot \xi_N (\eta_0 - \eta_{вoм} \cdot \xi_{вoм}) \cdot e_N}{B_p \cdot v_p (1 - \xi_{вoм})} m_{pm} f_m \quad (2.19)$$

Підставивши у (2.19) значення η_0 і помноживши на $V_p \cdot G_T$, отримаємо:

$$\frac{R_{кр}}{G_T} \leq \frac{E_T \cdot \eta_{тяг} \cdot e_N}{v_p} \quad (2.20)$$

$$\eta_{мяг} = \frac{\varphi_{кр} \cdot v_p}{E_m \cdot e_N} \rightarrow \max, \quad (2.21)$$

де E_T – питома енергонасиченість трактора, Вт/Н, аналогічна показнику у Вт/кг:

$$E_m = \frac{N_u}{G_m} = \frac{N_k \cdot \eta_{mp}}{G_m} \quad (2.22)$$

Аналіз виразів (2.18) та (2.21) показує, що для досягнення високих значень питомої продуктивності та тягового ККД при заданій енергонасиченості трактора необхідно підвищувати робочі швидкості за рахунок зниження питомого опору робочих органів. Це можливо шляхом зменшення частки потужності e_N , яка витрачається на подолання тягового опору робочої машини. Виконання цієї умови досягається використанням активних робочих органів, які створюють додаткову рушійну силу (штовхаючу реакцію ротора).

Підставляючи відомі співвідношення у формулу (2.22):

$$N_k = \eta_{мяг} N_{кр} \quad (2.23)$$

$$N_{(тяг)} = R_{кр} \cdot v_p \quad (2.24)$$

N_k – потужність, підведена до колеса, Вт.

Отримаємо вираз для робочої швидкості трактора:

$$v_p = \frac{E_m \cdot \eta_{мяг} \cdot \eta_{mp}}{G_m \cdot R_{кр}} \quad (2.25)$$

Вирішуючи (2.25) з урахуванням зміни робочої швидкості агрегату в тяговому та тягово-привідному режимах, маємо:

$$\eta'_{тяг} = \frac{R'_{кр}}{R_{кр}} \frac{1 - \delta'}{1 - \delta} \eta_{тяг}, \quad (2.26)$$

де:

$R_{кр}, \delta$ – тяговий опір та буксування трактора у звичайному тяговому агрегаті;

$R'_{кр}, \delta'$ – тяговий опір та буксування у тягово-привідному агрегаті з додатковою рушійною силою від технологічного модуля.

Таким чином отримаємо:

$$\eta'_{тяг} = \eta_{тяг} \cdot k_v \cdot k_{кр}. \quad (2.27)$$

У результаті проведених аналітичних досліджень встановлено, що при виборі критеріїв оцінки ефективності роботи тягово-привідного машинно-тракторного агрегату доцільно орієнтуватися на такі показники: тяговий коефіцієнт корисної дії ($\eta_{тяг}$), який залежить від коефіцієнта використання ваги трактора, енергозабезпеченості та буксування; чиста продуктивність агрегату, яка визначається через загальний коефіцієнт корисної дії й пов'язана з робочою швидкістю та шириною захвату знаряддя; енергетичні витрати при робочому ході, що відображають співвідношення між потужністю, витраченою на подолання тягового опору, та корисною потужністю, переданою робочим органам.

Аналіз отриманих виразів показав, що підвищення ефективності роботи можливе за рахунок: зниження питомого тягового опору робочих органів; оптимізації частки потужності, яка витрачається на привід від ВВП; збільшення робочої швидкості енергетичного засобу; застосування активних робочих органів, що створюють додаткову рухому силу (наприклад, реакцію ротора).

Таким чином, ефективність тягово-приводного агрегату визначається комплексним урахуванням конструктивних і режимних параметрів, серед яких ключовими є робоча швидкість енергетичного засобу та ширина захвату машини.

2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів тягово-приводного агрегату

При виборі робочої швидкості та ширини захвату для роботи енергетичного засобу з високим тяговим ККД можливо вирішення компромісної задачі.

Потужнісний баланс тягово-приводного агрегату можна подати у вигляді:

$$N_{en} \cdot \xi_N = N_{ввм} + N_{тяг} \quad (2.28)$$

$$N_{ввм} = B_p \cdot v_p \cdot \alpha_N \quad (2.29)$$

де α_N – питома потужність на одиницю подачі, Вт·м²/с.

Для горизонтальної ділянки потужність двигуна, що йде на тягу, визначається:

$$N_{тяг} = K_{v(тяг)} \cdot \eta_{mp} (1 - \delta) B_p v_p + \frac{G_m f_m}{\eta_{mp} (1 - \delta)} v_p, \quad (2.30)$$

$$N_{en} \cdot \xi_N = \alpha_N B_p v_p + K_{v(тяг)} \eta_{mp} (1 - \delta) B_p v_p + \frac{G_m f_m}{\eta_{mp} (1 - \delta)} v_p \quad (2.31)$$

$$N_{en} \cdot \xi_N - \eta_{mp} (1 - \delta) G_m f_m v_p = \alpha_N B_p v_p + K_{v(тяг)} \eta_{mp} (1 - \delta) B_p v_p \quad (2.32)$$

Представимо розв'язання останнього рівняння у вигляді системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} N_{ен} \cdot \xi_N - \eta_{mp}(1-\delta)G_m f_m \nu_p = y_1 \\ \nu_p B_p (\alpha_N + K_{v(тяг)} \eta_{mp}(1-\delta)) = y_2 \end{cases} \quad (2.34)$$

Буксування виразимо через коефіцієнт використання ваги за допомогою емпіричної формули:

$$\delta = a \cdot \varphi_{кр} \beta - \varphi_{кр}, \quad (2.35)$$

де a і β емпіричні коефіцієнти, що залежать від агрофону та умов випробувань.

Геометричне розв'язання системи рівнянь: при $\nu_p=0$ буксування також дорівнює нулю, $y_1=\xi_N N_{ен}$; при $y_1=0$, $\varphi_{кр}=0$, $\nu_p=N_k/G_t f_t$, де N_k – потужність, підведена до ведучих коліс.

$$N_k = \eta_{mp} N_{ен} \xi_N \quad (2.36)$$

Визначимо початкові умови для другого рівняння системи:

$$y_2 = \nu_p B_p (\alpha_N + K_{v(тяг)} \eta_{mp}(1-\delta)). \quad (2.37)$$

Питоме тягове опір $K_{v(тяг)}$ визначається як:

$$K_{v(тяг)} = a(k_0 + z\nu_p^2) \quad (2.38)$$

при початкових умовах: $\nu_p=0$; $y_2=0$.

Для розв'язання другого рівняння системи будуються потенційні криві зміни буксування, відносної робочої швидкості (ν – відношення поточної робочої швидкості до розрахункової, що розвивається при тязі з гранично допустимим буксуванням) та тягового ККД залежно від коефіцієнта використання ваги $\varphi_{кр}$ для трактора МТЗ-82 (рис. 2.1).

Для розрахунку прийнято: агрофон–терня зернових ($a=0,208$, $\beta=0,757$).

З рисунка 2.1 випливає, що максимальні значення тягового ККД відповідають інтервалу відносної робочої швидкості рівному 1,0...1,5, що відповідає робочим швидкостям у діапазоні 2,4...3,6 м/с.

Використовуючи значення v_p та $\varphi_{кр}$ (рис. 2.1), при зміні ширини захвату робочої машини B_p від 1,8 до 3,0 м, систему рівнянь розв'язуємо графічним методом (рис. 2.2).

При цьому прийнято: $N_{ен}=58,8$ кВт; КПД трансмісії $\eta_{тр}=0,92$; коефіцієнт опору коченню $f_t=0,15$; питома вага робочої машини, приведена до одиниці ширини захвату, $m_{рм}=3,5$ кН/м; питома опір $k_0=20$ кН/м²; швидкісний коефіцієнт $\zeta=1,8$ кН·с²/м⁴; питома потужність на одиницю подачі $\alpha_N=2,5$ кВт/(м²·с) при глибині обробітку 0,15 м.

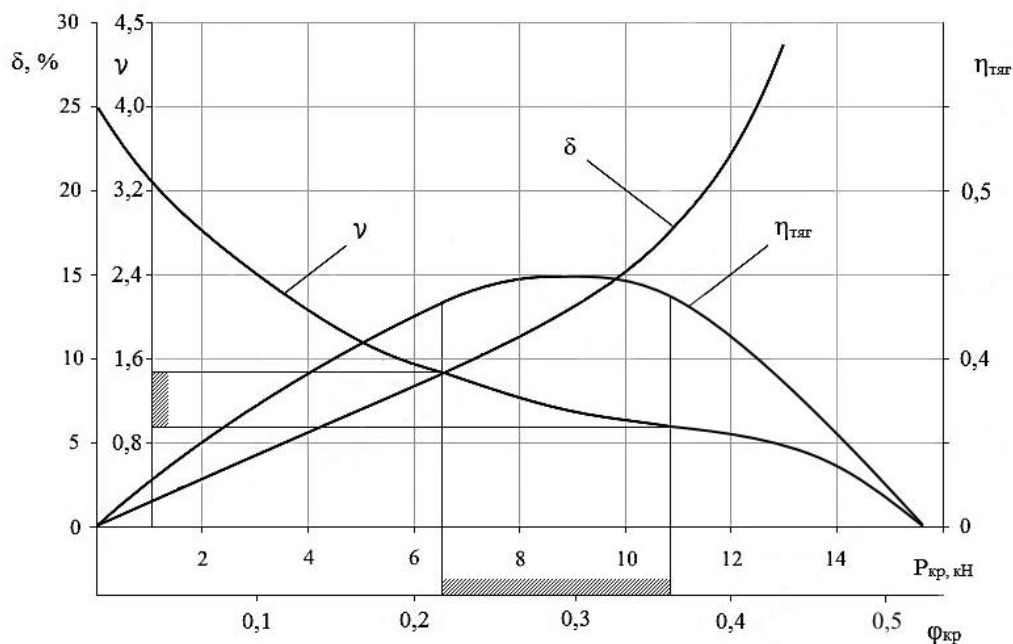


Рисунок 2.1 - Зміна буксування, відносної робочої швидкості та тягового ККД залежно від коефіцієнта використання ваги

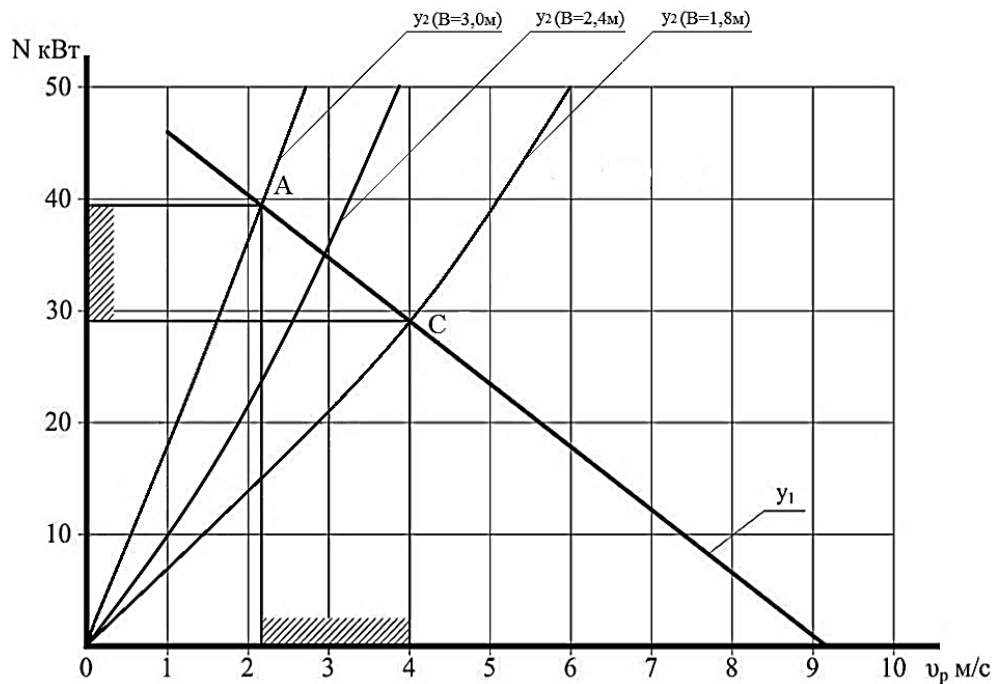


Рисунок 2.1 - Графічне розв'язання системи рівнянь для визначення чистої продуктивності агрегату

Розрахунковому максимальному значенню тягового коефіцієнта корисної дії відповідають оптимальні параметри: ширина захвату агрегату $B_p = 2,4 \pm 0,2$ м та робоча швидкість $v_p = 3,1 \pm 0,2$ м/с, що забезпечує чисту продуктивність у межах $7,20-7,44$ м²/с. Таким чином, спільне геометричне розв'язання рівнянь y_1 та y_2 дозволяє визначити чисту продуктивність ($B_p \cdot v_p$). При цьому встановлено, що досягти однакових показників продуктивності за максимального тягового ККД можливо як за умови роботи з високими швидкостями та меншою шириною захвату, так і при малих швидкостях у поєднанні з більшою шириною захвату.

2.3 Визначення оптимальної швидкості роботи агрегату за критерієм енергоефективності

Для встановлення оптимальної робочої швидкості агрегату використаємо критерій мінімальних енергетичних витрат при робочому ході агрегату, що характеризуються питомими витратами енергії, Дж/м²:

$$E_n = \frac{N_{ен} \cdot \xi_N}{B_p \cdot v_p} \rightarrow \min, \quad (2.38)$$

де $N_{ен}$ - ефективна потужність двигуна; ξ_N - коефіцієнт використання потужності; B_p - ширина захвату, м; v_p - робоча швидкість агрегату, м/с.

Використовуючи обмеження за питомим тяговим опором робочої машини K_v кН/м² (2.19), чиста продуктивність визначається за виразом:

$$B \cdot v = \frac{N_{не} \cdot \xi_N (\eta_0 - \eta_{ввн} \cdot \xi_{ввн})}{e_N \cdot K_v + m_{рм} \gamma_m (1 - \xi_{ввн})} \quad (2.39)$$

Тоді

$$E_n = \frac{N_{не} \cdot \xi_N \cdot (K_v + m_{рм} \gamma_m) (1 - \xi_{ввн})}{N_n \cdot \xi_N (\eta_0 - \eta_{ввн} \cdot \xi_{ввн}) \cdot e_N} \quad (2.40)$$

Оскільки

$$N_{не} \cdot \xi_N \cdot e_N = N_{тяг} = K_v \cdot B \cdot v, \quad (2.41)$$

Таким чином:

$$E_n = \frac{N_{не} \cdot \xi_N (K_v + m_{рм} \gamma_m) (1 - \xi_{ввн})}{K_v \cdot B \cdot v (\eta_0 - \eta_{ввн} \cdot \xi_{ввн})} \quad (2.42)$$

Для визначення обмеження робочої швидкості за мінімумом енергетичних витрат необхідно знайти диференціал функції та прирівняти його до нуля:

$$\frac{dE_n}{dv} = 0.$$

Для тягово-приводних роторних машин питомий тяговий опір робочої машини описується залежністю:

$$K_v = \alpha_N v + h_{ром} (k_0 + z v_p^2), \quad (2.43)$$

тоді умова мінімуму набуває вигляду:

$$\frac{dE_n}{dv} = \frac{N_{не} \cdot \xi_N (1 - \xi_{ввн}) (\alpha_N + 2h_{ром} z v_p)}{K_v \cdot B \cdot v} - \frac{N_{не} \cdot \xi_N (1 - \xi_{ввн}) K_v^2}{B (K_v B v)^2} = 0. \quad (2.44)$$

Розв'язавши останнє рівняння, отримаємо:

$$(\alpha_N + 2h_{pom} z v_p) K_v B_v = K_v^2 B. \quad (2.45)$$

Звідси обмеження робочої швидкості за критерієм мінімальних енергетичних витрат при робочому ході агрегату, м/с:

$$v_p^{(opt)} \leq \sqrt{\frac{K_0}{z}} \quad (2.46)$$

Виконаний розрахунок для робочої ширини машини $B_p=2,4$ м при питомому опорі $k_0=20$ кН/м² та швидкісному коефіцієнті $z=1,8$ кН·с²/м⁴ дає значення робочої швидкості:

$$v_p^{(opt)} \leq 3,33 \text{ м / с}$$

Отримані результати узгоджуються з графоаналітичним методом визначення діапазону робочих швидкостей за потужнісним балансом, що підтверджує коректність запропонованого підходу до обґрунтування конструктивно-режимних параметрів агрегату.

Висновки

1. Встановлено критерії оцінки роботи тягово-приводного агрегату з роторним плугом у технології органічного (біологізованого) землеробства під час проведення основного обробітку ґрунту із суміщенням операцій. До таких критеріїв належать: тяговий ККД, чиста продуктивність та енергетичні витрати при робочому ході агрегату, які залежать від правильно підібраних робочої швидкості енергозасобу та ширини захвату робочої машини.
2. Для досягнення високих значень чистої продуктивності на одиницю потужності та тягового ККД тягово-приводного агрегату з роторним плугом за умови заданої питомої енергонасиченості трактора необхідно підвищувати робочі швидкості за рахунок зниження питомого тягового опору робочих органів. Це можливо шляхом зменшення частки потужності (e_N), що витрачається на подолання тягового опору робочої машини. Дане

положення є досяжним за умови застосування активних робочих органів, які створюють додаткову рушійну силу (штовхаючу реакцію ротора).

3. Методика та графоаналітичний метод розрахунку на основі потужнісного балансу тягово-приводного агрегату дозволяють визначити розрахунковий тяговий діапазон ($\varphi_{кр}=0,22\dots0,36$) та інтервал робочих швидкостей від 2,4 до 3,6 м/с, при яких забезпечуються максимальні значення тягового ККД та питомої продуктивності на одиницю потужності.

3 ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Модель роторного плуга для органічного землеробства

Модернізований роторний плуг являє собою навісну ґрунтообробну машину, конструктивна схема якої включає такі основні вузли та механізми (рис.3.1):

Рама (1) – зварна металева конструкція, що забезпечує жорсткість агрегата та є несучою основою для встановлення всіх робочих і приводних вузлів.

Батарея з активними сферичними дисками (6) – робочий орган плуга, який здійснює різання, подрібнення та перемішування ґрунту. Диски мають сферичну форму, що створює додаткову горизонтальну складову сили, формуючи так звану «штовхаючу реакцію ротора».

Циліндричний редуктор (4) – призначений для передавання та зниження частоти обертання від вала відбору потужності трактора до батареї дисків, забезпечуючи необхідний крутний момент.

Проміжна опора (8) – виконує функцію опори для карданних передач та зменшує вібраційні навантаження на вал редуктора.

Карданні передачі (2 і 3) – передають крутний момент від ВОМ трактора до редуктора. Конструкція закрита захисним кожухом (5), що відповідає вимогам безпеки експлуатації.

Опорне колесо (9) – регулює робочу глибину обробітку ґрунту та забезпечує стабільність агрегата у процесі руху.

Ґрунтопоглиблювачі (7) – додаткові робочі органи, які встановлюються у міждисковому просторі та забезпечують розпушування ґрунту на задану глибину, зменшуючи ущільнення орного шару.

Крутний момент від вала відбору потужності трактора передається через карданні вали (2, 3) до проміжної опори (8), а далі – на циліндричний редуктор (4). Редуктор знижує частоту обертання і збільшує крутний момент, що передається на батарею активних дисків (6). Така схема забезпечує суміщення

тягового й приводного впливу на ґрунт, підвищуючи ефективність виконання основного обробітку.

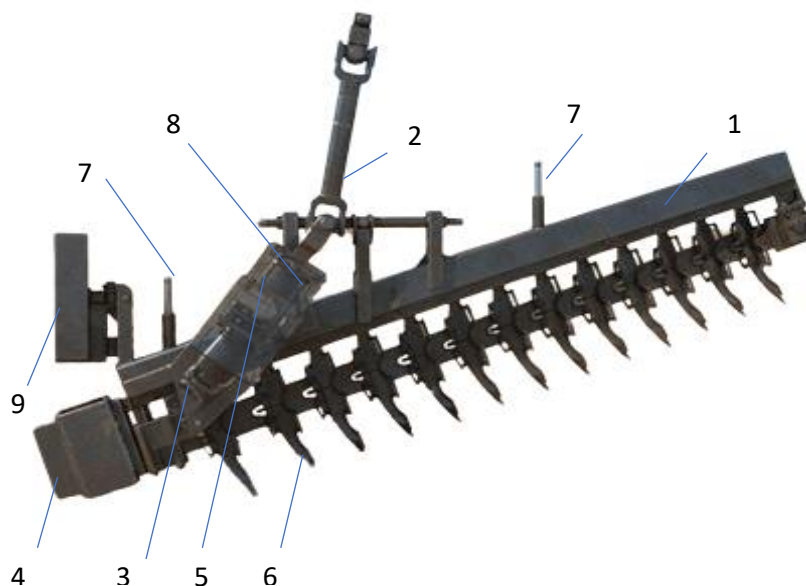


Рисунок 3.1 – Модель плуга

3.2 Методика визначення фізико-механічних властивостей ґрунту

3.2.1 Визначення об'ємної маси ґрунту

Об'ємну масу ґрунту визначали методом ріжучого циліндра. Для цього за допомогою ґрунтового бура вирізали зразки ґрунту з ненарушеною структурою визначеного об'єму (рис.3.2). Відбір здійснювався на трьох глибинах орного шару: 0,05–0,10 м; 0,10–0,15 м; 0,15–0,20 м.

Повторність дослідів становила п'ять раз. Відібрані ґрунтові зразки поміщали у попередньо пронумеровані та зважені алюмінієві бюкси, після чого проводили зважування з точністю до 0,01 г.



Рисунок 3.2 – Прилади для визначення об'ємної маси та вологості ґрунту

Об'ємна маса (щільність) ґрунту ρ , кг/м³, розраховувалася за формулою:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

де

M - маса абсолютно сухого ґрунту у циліндрі, кг; V – об'єм циліндра, м³.

Для визначення вологості ґрунту бюкси з пробами після початкового зважування поміщали у сушильну шафу де підтримувалася температура 105 °С.

Сушіння проводили протягом 5 годин до досягнення постійної маси (рис. 3.3).

Рисунок 3.3 – Сушильна шафа



Масове відношення води у ґрунті, виражене у відсотках, визначали за формулою:

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0 - M} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де:

M_1 – маса вологої ґрунтової проби з бюксою та кришкою, кг;

M_0 – маса абсолютно сухої ґрунтової проби з бюксою та кришкою, кг;

M – маса порожньої бюкси з кришкою, кг.

Таким чином, вологість ґрунту визначали як відносну величину, що показує відсотковий вміст води у зразку ґрунту відносно його сухої маси.

3.2.2 Визначення твердості ґрунту

Твердість ґрунту – це здатність ґрунту чинити опір проникненню в нього деформатора. Універсальним методом визначення твердості є вимірювання опору ґрунту при заглибленні плунжера твердоміра конструкції Ревякіна.

Вимірювання твердості виконували у тих самих місцях, де відбирали зразки для визначення об'ємної маси та вологості ґрунту. Досліди проводили у п'ятикратній повторності на глибину до 0,25 м.

Твердість ґрунту H , МПа, розраховували за формулою:

$$H = \frac{h_{cp} \cdot m}{F} \quad (3.4)$$

де:

h_{cp} – середнє значення ординати на твердограмі за п'ятьма вимірюваннями, м;

m – масштаб пружини твердоміра, Н/м;

F – площа основи плунжера твердоміра, м².

Середнє значення ординати h_{cp} обчислювалося за формулою:

$$h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^5 F_i \cdot l_i}{5} \quad (3.5)$$

де:

F_i – площа діаграми в i -му досліді, м²;

l_i – довжина діаграми в i -му досліді, м.

Отримані значення твердості дозволяють оцінити механічний опір ґрунту під час роботи робочих органів роторного плуга та визначити оптимальні параметри обробітку.

3.3 Методика визначення тягового опору модернізованого роторного плуга

Під час проведення експериментальних досліджень виконували заміри основних параметрів роботи трактора з модернізованим роторним плугом. Фіксувалося число обертів ведучого та вимірювального колеса для визначення пройденого шляху, який встановлений по осі сліду колеса трактора, величина тягового опору та тривалість досліду при сталому русі агрегата на передачах V–VII. Глибина обробітку ґрунту роторним робочим органом становила 0,15 м, а ґрунтопоглиблювачами – 0; 0,20 та 0,25 м у тяговому та тягово-приводному режимах роботи. Частота обертання вала відбору потужності підтримувалася на рівні 540 об/хв. Для забезпечення стабільності контакту з ґрунтом та підвищення точності вимірювань вимірювальне колесо було оснащено пружинним підтиском (рис. 3.4).

Заміри кількості обертів ведучого та вимірювального коліс проводилися за допомогою спеціальних пристроїв, змонтованих на півосі та маточині. Кожен оберт колеса супроводжувався формуванням восьми періодичних імпульсів, які передавалися на реєструючу апаратуру. Реєстрація сигналів виконувалася електромагнітним імпульсним лічильником.

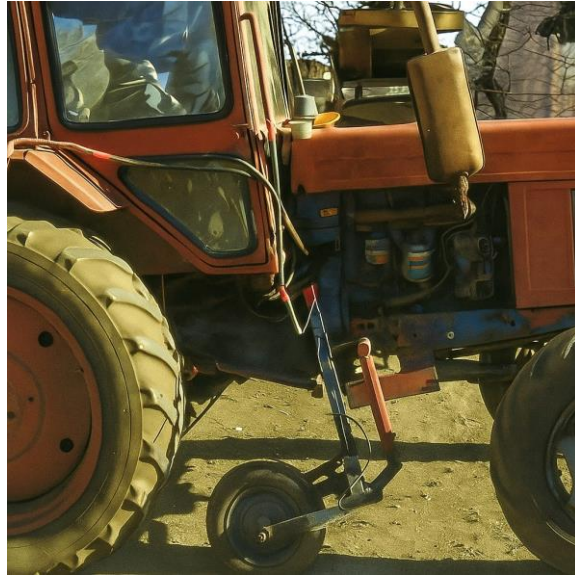


Рисунок 3.4 – Вимірювальне колесо

Пройдений за дослід шлях обчислюється за формулою, м:

$$L = 2\pi r_k n \quad (3.6)$$

де r_k – радіус вимірювального колеса для визначення пройденого шляху, м;

n – кількість обертів вимірювального колеса.

$$n = \frac{N_i}{8} \quad (3.7)$$

де N_i – кількість електромагнітних імпульсів за даними лічильника.

Тарування датчиків обертів вимірювального колеса для визначення радіуса кочення проводилось за формулою:

$$R_k = \frac{S}{2\pi n_k} \quad (3.8)$$

S – вимірний шлях, м; n_k – кількість обертів вимірювального колеса.

Теоретична швидкість руху трактора, м/с:

$$v_t = \frac{2\pi n_k R_k}{t} \quad (3.9)$$

де R_k – радіус кочення ведучого колеса, м; t – час дослід, с;
 n_k – кількість обертів ведучого колеса трактора.

Робоча швидкість, м/с:

$$v_p = \frac{L}{t} = \frac{2\pi r_k n}{t} \quad (3.10)$$

Відповідно, буксування ведучих коліс трактора визначається за виразом:

$$\delta = \frac{v_t - v_p}{v_t} \quad (3.11)$$

Для визначення тягового опору використовували два трактора. Перший трактор застосовувався як тягове енергетичне засоб, тоді як другий виконував функцію платформи для навішування та забезпечення роботи агрегату для обробітку ґрунту (рис. 3.5).

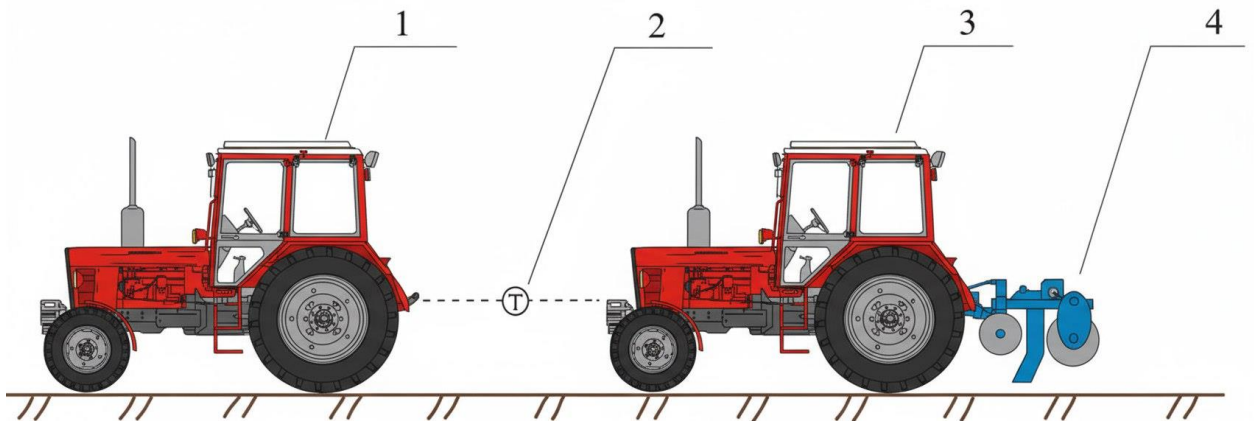


Рисунок 3.5 – Схема проведення експерименту з визначення тягового опору:

- 1 – «ведучий» трактор, що виконує роль тягового енергетичного засобу;
- 2 – тензозвено;
- 3 – трактор, використовуваний для навішування та роботи ґрунтообробного агрегату;
- 4 – ґрунтообробна машина.

1. Визначення зусилля на перекочування: до «ведучого» трактора через тензозвено буксирним тросом приєднували другий трактор із навішеним роторним плугом у транспортному положенні. Під

час буксирування фіксувалися показники зусилля на перекочування МТА за допомогою реєструючої апаратури. Тяговий опір перекочування визначали за формулою:

$$P_{кр} = P_f,$$

де P_f – зусилля на перекочування трактора, Н.

2. Визначення тягового опору роторного плуга з відключеним приводом ВВП: на цьому етапі роторний плуг імітував роботу дискової борони. Щоб підвищити точність вимірювань, плуг від'єднували від бортового редуктора, що дозволяло виключити вплив зусиль, необхідних для приводу трансмісійних вузлів ротора, на показання тензометричного обладнання.

До «ведучого» трактора через тензозвено буксирним тросом приєднували трактор із агрегованим роторним плугом у робочому положенні в режимі дискової борони. Тяговий опір визначали за формулою:

$$P_{кр} = P_{ізм(д.б.)} - P_f$$

де $P_{ізм(д.б.)}$ – значення тягового зусилля роторного плуга в режимі дискової борони, Н.

3. Визначення тягового опору роторного плуга з приводом ротора від ВОМ трактора. На цьому етапі досліджень ґрунтообробний агрегат працював у режимі роторного плуга. Вимірювання проводили при заглибленому в робоче положення роторі та включеному ВВП трактора ($n = 540$ об/хв). Тяговий опір визначали за формулою:

$$P_{кр} = P_{ізм(р.п.)} - P_f,$$

де $P_{ізм}$ – значення тягового опору агрегату, що працює в режимі роторного плуга, Н.

4. Визначення тягового опору роторного плуга у комбінованому режимі. Дослідження проводили при заглибленому роторі, включеному ВВП трактора (540 об/хв) та встановлених по колії трактора почвоуглибителях на глибину 0,2 м і 0,25 м. Тяговий опір агрегату визначали за формулою:

$$P_{кр} = P_{ізм(р.п.)} + P_{п.у.} - P_f,$$

де $R_{п.у}$ – величина тягового опору, створюваного заглибленими почвоуглибителями, H .

Після розгону та виходу агрегату на робочий режим за командою сигнальника оператор включав тензометричну та іншу реєструючу апаратуру. Після закінчення досліду оператор фіксував показання приладів у журналі. Для вимірювання тягового опору використовувалося кільцевий тяговий динамометр (рис. 3.6).

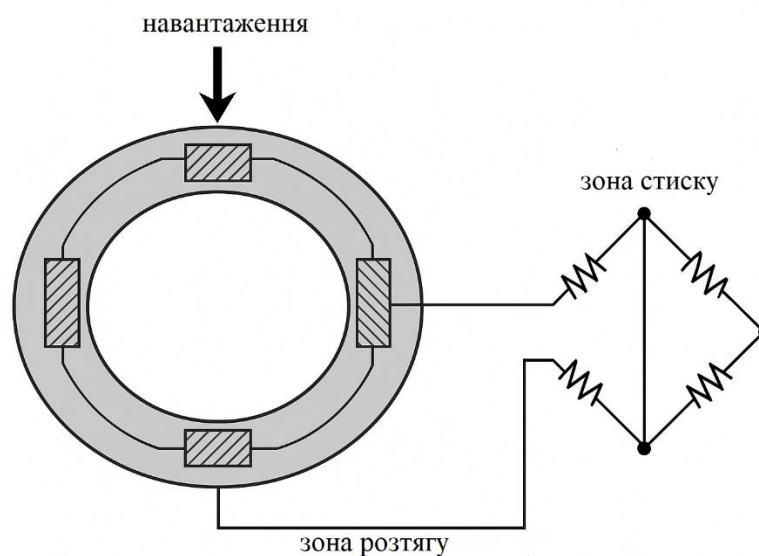


Рисунок 3.6 – Схема вимірювання тягового динамометра

У кільцевому тяговому звені на внутрішній поверхні сталевого кільця закріплено чотири тензорезистори, які підключені до чотирьох плечей вимірювального моста. Два з них розташовані в зоні стиснення, а два – у зоні розтягу. При прикладанні навантаження тензорезистори деформуються, що супроводжується зміною їх електричного опору залежно від величини пропущеного через них струму.

Зміна напруги у вимірювальній діагоналі через комутаційний блок реєструвалася бортовим вимірювальним комплексом одночасно з показаннями електромеханічних безконтактних датчиків ведучого та путевимірювального колеса. Подальша обробка результатів здійснювалася програмним забезпеченням АСTest-Pro, встановленим на ноутбук вимірювального комплексу (рис. 3.7).

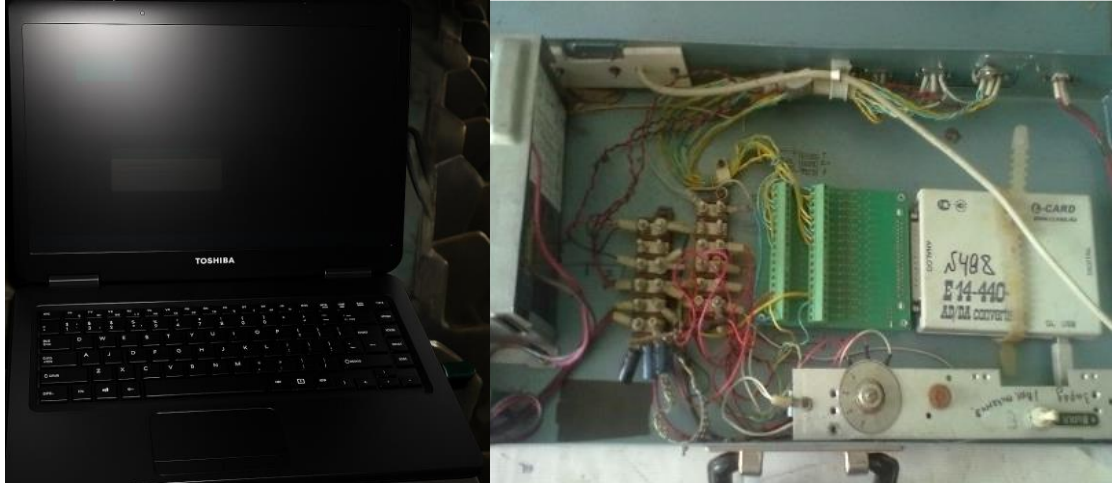


Рисунок 3.7 – Вимірювальний комплекс

Під час проведення дослідів реєстрація сигналів по всіх каналах здійснювалася в безперервному режимі (рис. 3.8). Перетворення отриманих сигналів у дійсні величини виконувалося програмним комплексом шляхом множення усередненого за час дослідження значення сигналу на градувальний коефіцієнт:

$$P_{ar} = k_{grad} \cdot U_{cp},$$

де k_{grad} – градувальний коефіцієнт,

U_{cp} – середнє значення сигналу за час дослідження.



Рисунок 3.8 – Блок вимірювального комплексу

де P_{ar} – середнє значення параметра за дослїд; k_{grad} – градуювальний коефіцієнт; U_{cp} – усереднене значення сигналу за час дослїду.

Тарування тензозвена виконували перед початком та після завершення польового експерименту за допомогою еталонного динамометра (рис. 3.9).

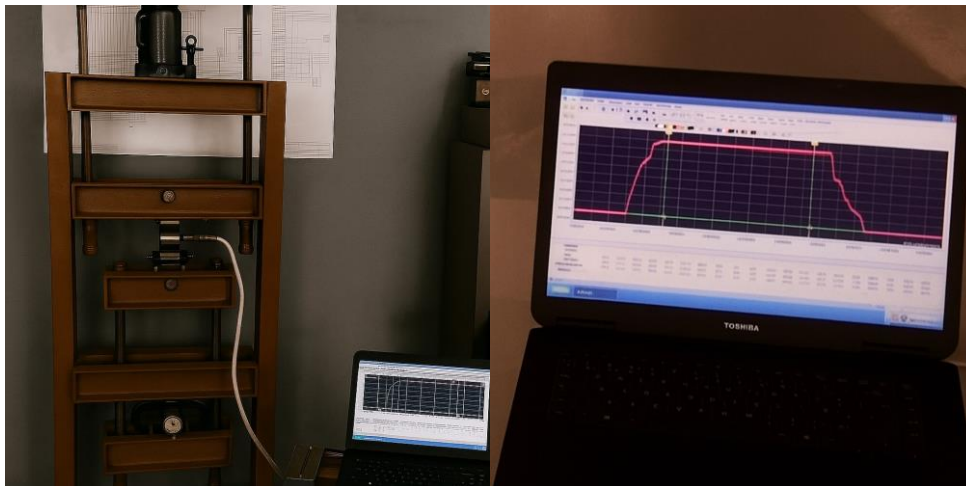


Рисунок 3.9 - Тарування тензозвена на стенді

Для проведення тарування застосовувалася вбудована конфігурація бортового вимірювального комплексу. З метою визначення градуювального коефіцієнта тензозвено та еталонний динамометр вмикали в одну силову схему з передачею сигналу на комутаційний блок вимірювального комплексу. Навантаження та розвантаження тензозвена здійснювалися з трикратною прямою та зворотною повторністю. За результатами зареєстрованих сигналів вимірювальний комплекс формував на екрані графік навантаження.

Для забезпечення необхідної точності градуювальний коефіцієнт визначався за формулою:

$$\mu = \frac{\Delta P_i}{h_i}$$

де ΔP_i – значення навантажень під час тарування, кН;
 h_i – відповідне середнє значення ординати на екрані, мм.

З метою усунення можливої похибки, що виникає внаслідок явища пружного гістерезису при навантаженні та розвантаженні тензозвена, середнє значення ординати обчислювали за формулою:

$$h_i = \frac{h_i^H + h_i^P}{2}$$

де h_i^H – значення ординати при навантаженні тензозвена, мм;
 h_i^P – відповідне значення ординати при розвантаженні тензозвена, мм.

3.4 Планування багатofакторного експерименту в польових умовах

Теоретичні дослідження показали, що на якісні показники роботи агрегату найбільший вплив мають кут атаки роторного плуга, глибина обробітку ґрунту та робоча швидкість руху.

Метою планування експерименту є отримання уявлення про відгук досліджуваних факторів [3], який у загальному вигляді можна подати функцією:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (3.11)$$

де Y – вихідний параметр оптимізації, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – вибрані фактори, якими можна керувати в процесі експерименту.

Результати експерименту найчастіше подаються у вигляді полінома (рівняння регресії), який відповідає відрізку ряду Тейлора:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2,$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії.

На базі аналітичних розрахунків та попередніх результатів польових експериментів визначено діапазони варіювання факторів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Керовані фактори та рівні їх варіювання

Назва фактора та його кодування	Рівень фактору
Угол атаки (α), град	x1
Глибина обробки ґрунту, м	x2
Робоча швидкість (v_p), м/с	x3
Верхній рівень	30
Нульовий рівень	24
Нижній рівень	18

Для визначення коефіцієнтів рівняння регресії складено матрицю багатofакторного експерименту (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Матриця багатofакторного експерименту

№ дослідю	x0	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3	Y _γ	Y _{Up}
1	+	-	-	-	+	+	+	-	Y _{γ1}	Y _{Up1}
2	+	+	-	-	-	-	+	+	Y _{γ2}	Y _{Up2}
3	+	-	+	-	-	+	-	+	Y _{γ3}	Y _{Up3}
4	+	+	+	-	+	-	-	-	Y _{γ4}	Y _{Up4}
5	+	-	-	+	+	-	-	+	Y _{γ5}	Y _{Up5}
6	+	+	-	+	-	+	-	-	Y _{γ6}	Y _{Up6}
7	+	-	+	+	-	-	+	-	Y _{γ7}	Y _{Up7}
8	+	+	+	+	+	+	+	+	Y _{γ8}	Y _{Up8}

В якості критеріїв оптимізації обрано:

- Y_γ - збереження курсової стійкості;
- Y_{Up} - рівномірність глибини проходження сферичних дисків.

Польовий експеримент проводився з дотриманням загальноприйнятих та спеціальних методик при довірчій ймовірності α = 95 %.

Обробка результатів здійснювалась за наступною методикою.

Коефіцієнти рівняння регресії b₀, b_i, b_{ij}, b_{ii} розраховуються за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}$$

де N - кількість дослідів;

j - номер рядка матриці;

y_j - значення відгуку по j-му дослідю.

Коефіцієнт b₀ визначається:

$$b_0 = \bar{y} - \sum b_i \bar{x}_i$$

Дисперсія для b₀ обчислюється за формулою:

$$S_{b_0}^2 = S^2 + \sum x_i^2 S_{b_i}^2$$

Значущість коефіцієнтів перевіряють за критерієм Стюдента:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{bi}}$$

де при 4 ступенях свободи та довірчому рівні 95 % $t = 2,77$.

Адекватність рівнянь регресії оцінюється за критерієм Фішера:

$$F_{розр} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_{табл}$$

Дисперсія адекватності визначається:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - n - 1}$$

де y_j - значення вихідного параметра з експерименту, \hat{y}_j - розраховане значення за рівнянням регресії.

Дисперсію відтворюваності обчислюють аналогічно. F-критерій розраховується як відношення дисперсії адекватності до дисперсії відтворюваності.

3.5 Результати експериментальних досліджень тягового опору роторного плуга

Для перевірки теоретичних положень моделювання та пошуку оптимальних рішень у розподілі потужності трактора МТЗ-82 з роторним плугом шириною захвату 2,4 м проведено тягові випробування на п'ятій, шостій та сьомій передачах у різних режимах роботи з різною глибиною обробки та включенням/відключенням ВВП та почвоуглиблювачів.

За результатами визначено буксування трактора та побудовано залежність тягового опору від критичної потужності. Режим P_3 забезпечує робочу швидкість 2,4 - 3,6 м/с, що відповідає агротехнічним вимогам щодо якості обробки ґрунту та загортання органічної маси, а також максимальній курсовій стійкості агрегату.

Зміна робочої швидкості по передачах показує вплив опору роторного плуга на режим роботи. Дані експерименту підтверджують адекватність моделі оптимізації тягового діапазону та робочої швидкості агрегату за рівнянням потужнісного балансу (рис. 3.10 - 3.12).

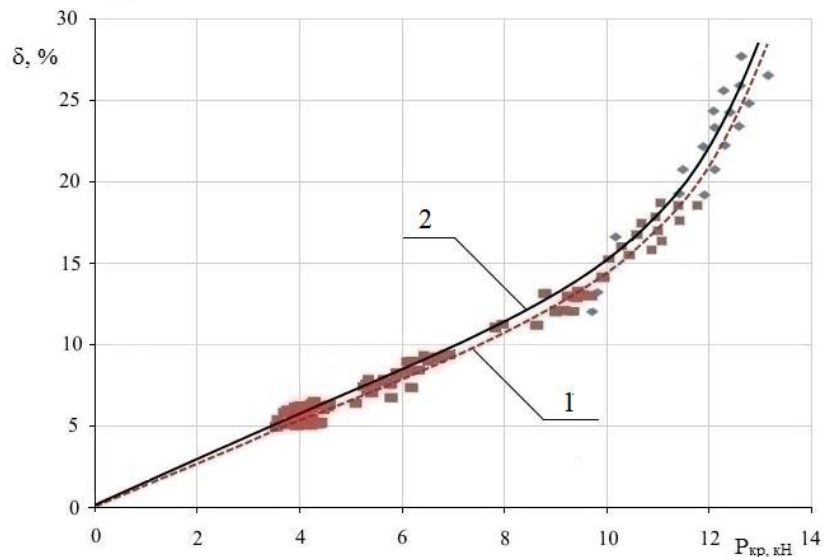


Рисунок 3.10 - Перевірка адекватності моделі оптимізації тягового діапазону та робочої швидкості: 1 - експериментальні дані; 2 - розрахункові значення за рівнянням потужнісного балансу.

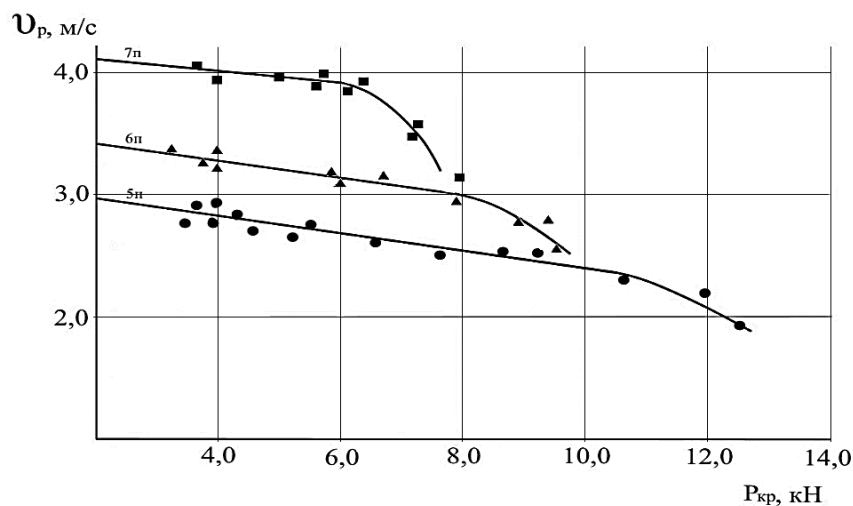


Рисунок 3.11 - Зміна робочої швидкості агрегату залежно від опору робочого органу (експериментальні дані)

Теоретична та експериментальна криві зміни буксування і відносної робочої швидкості знаходяться в межах довірчого інтервалу з ймовірністю 0,95.

Таким чином, отримані значення тягового діапазону $f_{кр}$ у межах 0,22 - 0,36 та робочої швидкості v_p у межах 2,4–3,6 м/с ($v = 1,0 - 1,5$) є достовірними і можуть бути використані для визначення конструктивно-режимних параметрів тягово-привідного агрегату.

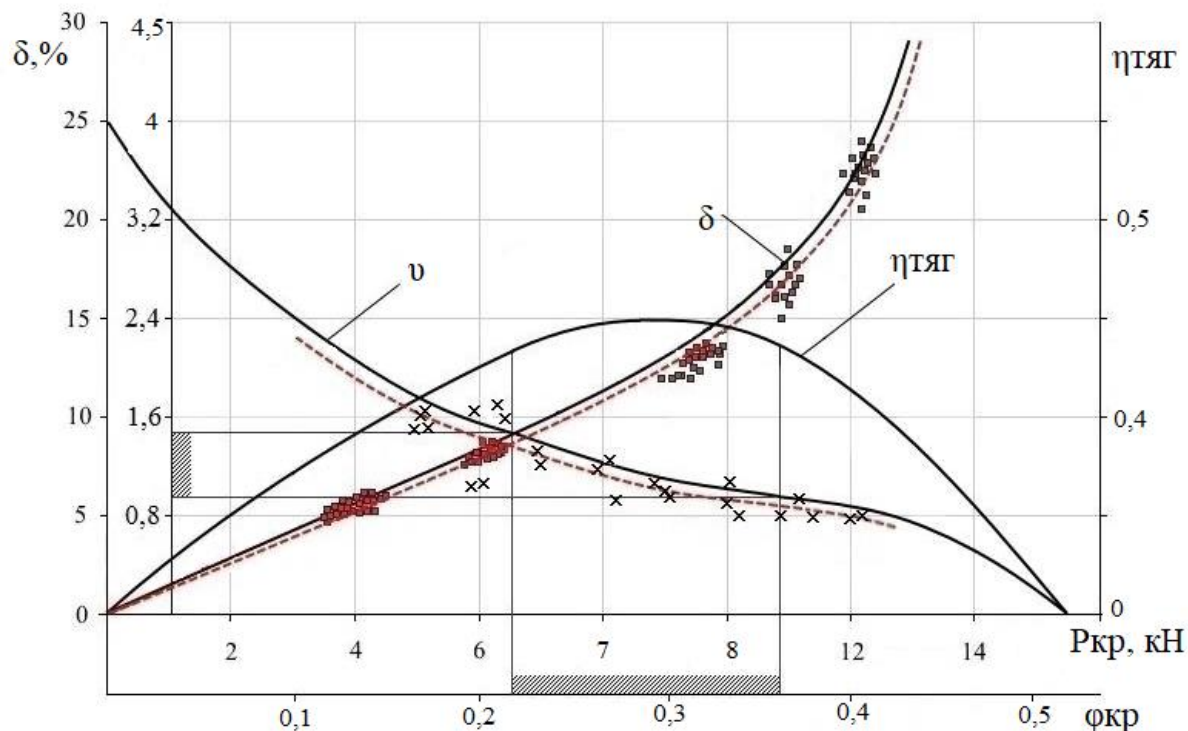


Рисунок 3.12 - Теоретичні та експериментальні криві зміни буксування, відносної робочої швидкості та тягового ККД агрегату.

За результатами досліджень побудовано тягову характеристику трактора МТЗ-82 в агрегаті з роторним плугом при використанні почвоуглиблювачів на глибину 0,25 м на трьох основних передачах (рис. 3.13).

Вихідні дані для побудови тягової характеристики подані у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Основні тягові показники трактора на різних передачах

Параметр	Передача 5	Передача 6	Передача 7
Швидкість трактора, v_T , м/с	2,93	3,43	4,20
Критичне тягове зусилля, $R_{кр}$, кН	10,50	8,75	6,50
Буксування, δ , %	16,5	11,0	8,0
Робоча швидкість, v_p , м/с	2,44	3,02	3,86
Потужність, $N_{кр}$, кВт	25,69	26,42	25,09

Тяговий ККД	0,437	0,449	0,426
-------------	-------	-------	-------

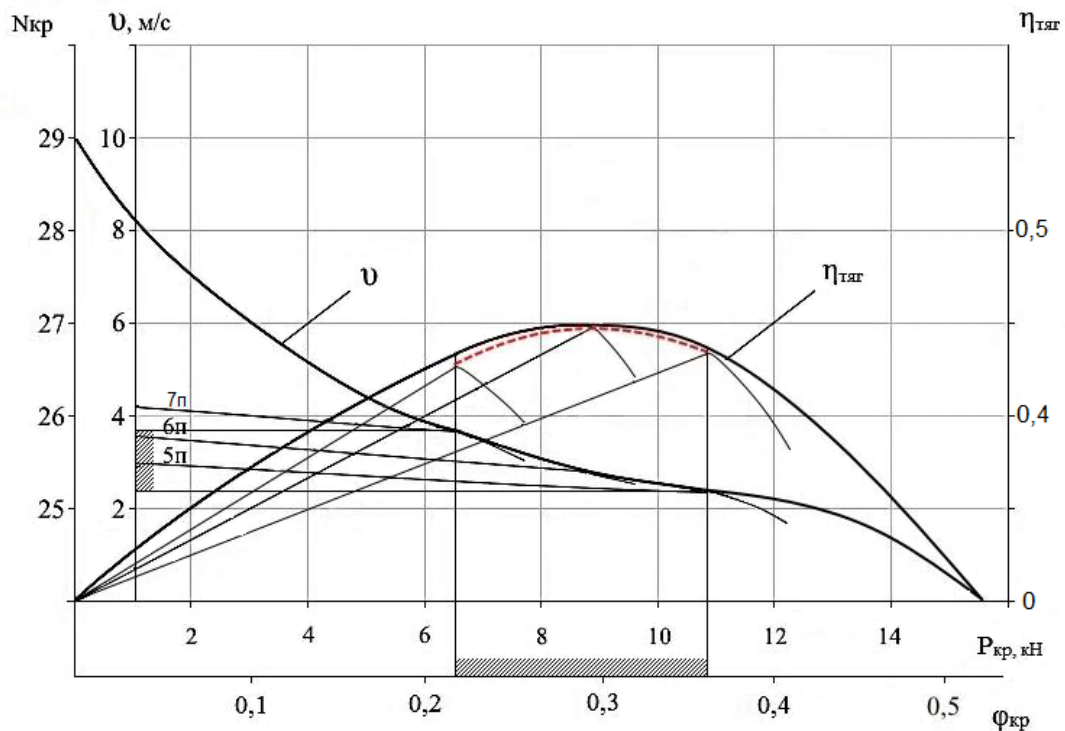


Рисунок 3.13 - Розрахункова та експериментальна тягові характеристики трактора в агрегаті з роторним плугом і почвоуглиблювачами при $h_{п}=0,25$ м.

Максимальні значення тягового ККД у діапазоні $\phi_{кр}=0,22 - 0,36$ трактор досягає на VI передачі при робочій швидкості 3,02 м/с та буксуванні рушія 16,5%. Ці показники відповідають агротехнічним вимогам до обробітку ґрунту ротаційними робочими органами та допустимим межах буксування колісного трактора. На VII передачі робота трактора в розрахунковому тяговому діапазоні $\phi_{кр}$ відбувається на коректорній ділянці швидкісної характеристики дизеля. Основними робочими передачами, залежно від умов експлуатації, слід вважати V та VI, які забезпечують робочі швидкості у межах 2,44 - 3,02 м/с (режим 3).

3.6 Результати випробувань агрегата з модернізованим плугом

Метою дослідження було оцінити ефективність модернізованого роторного плуга в умовах основного обробітку ґрунту по стерні зернових

культур із одночасним закладенням рослинних решток у верхні шари ґрунту та локальним поглибленням. Завданням випробувань було визначення агротехнічних, експлуатаційно-технологічних та виробничих показників агрегату в реальних польових умовах. Основні умови випробувань наведено в таблиці.

Таблиця 3.4

Умови проведення дослідів

Вид роботи	Обробіток ґрунту	Обробіток ґрунту
Обсяг робіт, га	35	22
Енергозасіб	МТЗ-82	МТЗ-82
Тип ґрунту (за механічним складом)	Лугово-черноземовидний, важкосуглинистий	Лугово-черноземовидний, важкосуглинистий
Рельєф	Рівний	Рівний
Мікрорельєф	Рівний	Хвилястий
Вологість ґрунту, % (шар, см)	0–5: 25,5 5–10: 25,3 10–15: 23,1 15–20: 22,9 20–25: 22,3	0–5: 21,81 5–10: 21,75 10–15: 22,34 15–20: 22,9 20–25: н/д
Твердість ґрунту, МПа (шар, см)	0–5: 0,37 10–20: 1,28 20–30: 1,59	0–5: 0,34 10–20: 1,03 20–30: 1,34
Попередня операція	Уборка пшениці	Дискання
Висота стерні, см	38,1	5,8
Маса стерні, г/м ²	300,7	128,4

Агрегат для обробітку ґрунту складався з трактора класу 1,4, оснащеного навісним роторним плугом. Привід ротора здійснювався від вала відбору потужності (ВВП) трактора. Попереду ротора, по слідах ведучих коліс, були встановлені два почвоуглибники з глибиною обробки 0,25 м. Ротор плуга був розташований під кутом атаки 24°, а його глибина обробки становила 0,15 м.

Під час випробувань агрегат працював на швидкостях від 2,2 до 3,3 м/с, при цьому якість технологічного процесу контролювали за частоти обертання ВВП 540 об/хв. Встановлені на роторному плузі почвоуглибники забезпечували стабілізацію робочого ходу агрегату.

Результати випробувань показали, що при швидкості до 3,0 м/с агрегат якісно обробляв ґрунт. Робочі органи роторного плуга забезпечували розпушування ґрунту на глибину 0,149 м (стандартне відхилення $\pm 0,01$ м, коефіцієнт варіації 13%). Середнє значення гребнистості поверхні становило 0,042 м (стандартне відхилення 0,015 м, коефіцієнт варіації 19%). Почвоуглибники забезпечували середню глибину обробки 0,24 м (стандартне відхилення 0,026 м, коефіцієнт варіації 22%).

Активні диски роторного плуга повністю підрізали стерню. Після обробки на поверхні залишалося не більше 25–27 % пожнивних решток. Розмір ґрунтових фракцій відповідав агротехнічним вимогам: комки понад 100 мм не спостерігалися, а крошіння до фракції 50–100 мм становило 79 %. При цьому не спостерігалось залипання ґрунту або забивання робочих органів рослинними залишками.

(табл.3.5)

Показник	Free Land	Модернізований роторний плуг
1. Параметри агрегату		
Середня експлуатаційна швидкість на загоні, м/с	2,22	2,45
Робоча ширина захвату, м	2,34	2,36
2. Глибина обробки		
Ротор, м	0,143 \pm 0,035	0,149 \pm 0,010
Почвоуглибники, середня, м	–	0,24 \pm 0,026
3. Крошіння ґрунту (%)		
<1,0 мм	0	0
1–50 мм	82	79
50–100 мм	18	21
>100 мм	0	0
4. Якість поверхні		
Гребнистість, м	0,047 \pm 0,025	0,042 \pm 0,015
Підрізання стерні, %	95	100
Залипання дисків/почвоуглибників	не спостерігалось	не спостерігалось
5. Витрати та продуктивність		
Витрата пального, кг/га	7,2	7,5
Продуктивність за годину основного часу, га/год	1,85	1,99

Експлуатаційна продуктивність, га/год	1,52	1,87
------------------------------------------	------	------

За результатами експлуатаційно-технологічної оцінки, експлуатаційна продуктивність агрегату становила 1,87 га/год при питомій витраті пального 8,5 кг/га.

При збільшенні швидкості руху від 3,0 до 3,3 м/с якість виконання технологічного процесу погіршувалася: частка підрізаних рослин знизилася до 92 %. Таким чином, робочу швидкість агрегату слід обмежити межами $3,0 \pm 0,2$ м/с.

Роторний плуг Free Land 3000 не відповідав агротехнічним вимогам: при збільшенні швидкості понад 4,2 км/год спостерігалось заглиблення робочих органів машини та нерівномірність обробки по ширині захвату. Якщо ліва сторона агрегату забезпечувала розпушування ґрунту на 5–6 см, права залишала необроблені ділянки.

Висновки

1. Модернізований роторний плуг є навісною ґрунтообробною машиною з рамою, батареєю активних сферичних дисків, редуктором, карданными передачами, опорним колесом та ґрунтопоглиблювачами. Конструкція забезпечує ефективне суміщення тягового та приводного впливу на ґрунт і стабілізацію робочого ходу агрегату.
2. Під час експлуатаційних випробувань агрегат забезпечував рівномірне розпушування ґрунту на глибину 0,149 м (ротор) та 0,24 м (почвоуглибники), повне підрізання стерні та крошіння ґрунту до агротехнічних норм.
3. Експлуатаційна продуктивність агрегату становила 1,87 га/год при питомих витратах пального 8,5 кг/га. Оптимальна робоча швидкість визначена в межах $3,0 \pm 0,2$ м/с, оскільки при її перевищенні якість обробки знижувалася.

4. Роторний плуг Free Land 3000 показав нерівномірність обробки та заглиблення робочих органів при швидкості понад 4,2 км/год, що підтверджує перевагу модернізованого плуга для органічного землеробства.
5. Тягові випробування підтвердили ефективність конструкції: робочий діапазон тягового коефіцієнта $\phi_{кр}$ становить 0,22–0,36, а робоча швидкість – 2,4–3,6 м/с, що забезпечує відповідність агротехнічним вимогам та стабільну роботу агрегату.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Експлуатація роторного плуга відноситься до робіт із підвищеним рівнем потенційної небезпеки через наявність рухомих та обертових робочих органів, великої маси агрегату та необхідності роботи з трактором. Основні вимоги охорони праці включають:

дотримання правил безпеки при роботі з трактором і навісними ґрунтообробними машинами;

використання засобів індивідуального захисту (захисні рукавиці, взуття, окуляри, навушники при роботі в шумному середовищі);

забезпечення надійного огороження рухомих частин, включаючи карданні вали та редуктор, захисними кожухами;

контроль технічного стану трактора та плуга перед початком робіт (відсутність тріщин, надійність кріплень, справність ВВП та гідравлічних систем).

Перед початком роботи необхідно:

Перевірити кріплення плуга до трактора та стан навісного механізму;

Оцінити стан ґрунту на полі (відсутність каміння та сторонніх предметів, які можуть пошкодити диски);

Перевірити наявність та справність захисних кожухів та огорожень;

Забезпечити безпечний доступ до ВВП та редуктора для обслуговування, уникаючи контакту з рухомими частинами.

Під час технічного обслуговування забороняється працювати під піднятим плугом без встановлених опорних упорів або страхувальних елементів.

При роботі агрегату на полі слід дотримуватися наступних правил:

Рухатися робочим агрегатом тільки за відсутності сторонніх осіб у зоні дії плуга;

Не перевищувати рекомендовану робочу швидкість $3,0 \pm 0,2$ м/с, щоб уникнути погіршення якості обробки та перевантаження механізмів;

Регулювати глибину обробітку тільки при повністю зупиненому тракторі;

Забороняється виконувати будь-які роботи з усунення забивання або обслуговування дисків під час руху агрегату;

Контролювати стан ґрунтопоглиблювачів та дисків, уникати роботи на кам'янистих або надмірно твердих ділянках без попередньої підготовки.

Контакт з обертовими дисками та карданними валами може призвести до серйозних травм;

Порушення електричних з'єднань датчиків і вимірювальної апаратури при проведенні тягових випробувань може викликати електротравму;

Слід регулярно перевіряти цілісність електропроводки та заземлення приладів.

Тракторист та обслуговуючий персонал повинні пройти інструктаж з охорони праці та бути навчені роботі з навісними роторними плугами;

Робоча зона повинна бути позначена сигналами та попереджувальними знаками, особливо при випробуваннях на полі;

Забезпечити наявність аптечки, засобів зв'язку та інструментів для швидкого усунення дрібних несправностей.

4.1 Екологічні аспекти застосування роторного плуга

Модернізований роторний плуг застосовується для обробітку ґрунту з одночасним закладенням рослинних решток, що відповідає принципам органічного землеробства. Екологічно ефективне використання агрегату дозволяє:

зберігати органічну масу у верхньому шарі ґрунту, що покращує структуру та родючість ґрунту;

зменшувати ерозійні процеси завдяки рівномірному розпушуванню та збереженню рослинних решток на поверхні;

мінімізувати використання хімічних добрив та пестицидів, оскільки покращення аерації ґрунту та закладення органіки підвищує природну родючість.

Зменшення шкідливого впливу на ґрунт

При правильному регулюванні глибини обробітку (ротор – 0,15 м, ґрунтопоглиблювачі – 0,20–0,25 м) агрегат не порушує ґрунтовий профіль і зменшує ущільнення орного шару. Це дозволяє:

- підвищити водопроникність і аерацію ґрунту;
- зменшити втрати вологи та ризик утворення поверхневої кірки;
- запобігти деградації структури ґрунту при повторних проходах агрегату.

Зниження шкідливих викидів

Модернізований роторний плуг агрегується з трактором МТЗ-82, який працює на дизельному паливі. Для мінімізації негативного впливу на атмосферу слід дотримуватися наступних заходів:

Використовувати агрегат у оптимальному режимі експлуатації (робочі швидкості 2,4–3,0 м/с), що зменшує перевитрату пального та викиди CO₂;

Регулярно проводити технічне обслуговування двигуна трактора, фільтрів та системи ВВП;

Уникати роботи агрегату в умовах сильного пиління та сухого ґрунту без попереднього зволоження.

Використання рослинних залишків

Закладення стерні та рослинних решток у верхні шари ґрунту забезпечує: відновлення органічного вмісту ґрунту;

зменшення викидів парникових газів у атмосферу при спалюванні залишків на полі;

поліпшення біологічної активності ґрунту за рахунок розвитку мікроорганізмів.

4.2 Рекомендації з екологічної безпеки

1. Дотримуватися режиму глибини обробітку, щоб уникнути руйнування ґрунтового горизонту;

2. Використовувати агрегат у комбінації з органічними добривами та сидератами для підвищення родючості без хімії;

3. Планувати обробіток ґрунту залежно від вологості та типу ґрунту, щоб уникнути ерозії та надмірного пиління;

4. Проводити моніторинг стану ґрунту та водних об'єктів на території господарства, щоб оцінювати вплив агротехніки на екологію.

Висновок

Використання модернізованого роторного плуга у технології органічного землеробства дозволяє поєднати ефективну механічну обробку ґрунту з екологічно безпечними методами ведення господарства. Дотримання регламентованих режимів роботи агрегату, контроль глибини обробітку та використання рослинних залишків забезпечують збереження структури ґрунту, підвищення його родючості та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище.

Дотримання вимог охорони праці при експлуатації модернізованого роторного плуга забезпечує безпечну роботу тракториста та обслуговуючого персоналу, підвищує ефективність обробітку ґрунту та знижує ризик травматизму. Рекомендується систематично проводити технічний контроль агрегату та навчання персоналу для мінімізації аварійних ситуацій.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Площа досліджуваного поля дорівнює 10 га. Ціна пального — 60 грн за 1 кг. Робочий день триває 8 годин, заробітна плата тракториста становить 350 грн на день. Кількість робочих днів на 1 га визначатиметься на підставі продуктивності агрегату. Вартість базового (Free Land 3000) плуга — 120 000 грн, модернізованого — 180 000 грн. Норма річної амортизації — 10%.

Визначимо витрати часу на 10 га:

$$T = \frac{Q_{\text{експл}}}{S}$$

Плуг HARD

$$T_{\text{HARD}} = \frac{10}{1,52} \approx 6,58 \text{ год}$$

Модернізований плуг

$$T_{\text{модерн}} = \frac{10}{1,87} \approx 5,35 \text{ год}$$

Економія часу

$$\Delta T = 6,58 - 5,35 = 1,23 \text{ год}$$

1. Визначимо витрату пального

$$G_{\text{поля}} = G_{\text{га}} \cdot S$$

Плуг Free Land 3000: $7,2 \cdot 10 = 72$ кг

Модернізований: $7,5 \cdot 10 = 75$ кг

Вартість пального:

Плуг Free Land 3000: $72 \cdot 60 = 4320$ грн

Модернізований: $75 \cdot 60 = 4500$ грн

Витрати пального незначно зросли, але за рахунок економії часу ефективність зростає.

2. Визначимо трудові витрати.

$$C_{\text{труд}} = 3 \cdot \frac{T}{8}$$

$$C_{\text{труд, HARD}} = 350 \cdot \frac{6,58}{8} \approx 288 \text{ грн}$$

$$C_{\text{труд, модерн}} = 350 \cdot \frac{5,35}{8} \approx 234 \text{ грн}$$

$$\Delta C_{\text{труд}} = 288 - 234 = 54 \text{ грн}$$

3. Визначимо амортизаційні витрати:

$$C_{\text{амор}} = C_{\text{пл}} \cdot A \cdot \frac{T}{2000 \text{ год} / \text{рік}}$$

Вважаємо, що річний фонд часу – 2000 годин

$$C_{\text{амор, Free Land 3000}} = 120000 \cdot 0,1 \cdot 6,58 / 2000 \approx 39,5 \text{ грн}$$

$$C_{\text{амор, модерн}} = 180000 \cdot 0,1 \cdot 5,235 / 2000 \approx 48,2 \text{ грн}$$

4. Загальні витрати на обробіток 10 га.

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{паливо}} + C_{\text{труд}} + C_{\text{амор}}$$

$$\text{Плуг Free Land 3000: } 4320 + 288 + 39,5 \approx 4647,5 \text{ грн}$$

$$\text{Модернізований: } 4500 + 234 + 48,2 \approx 4782,2 \text{ грн}$$

Загальні витрати зросли в незначній мірі через вищу вартість пального та амортизації, але продуктивність модернізованого плуга на 23% вища, що зменшує витрати на 1 га:

$$\text{Плуг Free Land 3000: } 4647,5 / 10 \approx 464,8 \text{ грн/га}$$

$$\text{Модернізований: } 4782,2 / 10 \approx 478,2 \text{ грн/га}$$

Таким чином економічна ефективність:

Приріст продуктивності:

$$\Delta Q_{\text{експл}} = 1,87 - 1,52 = 0,35 \text{ га/год} \approx 23\%$$

Економія часу на 10 га:

$$\Delta T = 1,5 \text{ год}$$

Показник	Плуг Free Land 3000	Модернізований роторний плуг	Економія
----------	---------------------	------------------------------	----------

Площа обробітку, га	10	10	–
Експлуатаційна продуктивність, га/год	1,52	1,87	+0,35 га/год (23%)
Час роботи на 1 га, год	0,658	0,535	-0,123 год (7,4 хв)
Час роботи на 10 га, год	6,58	5,35	-1,23 год
Витрати пального, кг/га	7,2	7,5	+0,3 кг/га
Витрати пального на 10 га, кг	72	75	+3 кг
Вартість пального на 1 га, грн	432	450	+18 грн/га
Вартість пального на 10 га, грн	4320	4500	+180 грн
Вартість праці, грн	288	234	-54 грн
Амортизаційні витрати, грн	39,5	48,2	+8,7 грн
Загальні витрати на 10 га, грн	4647,5	4782,2	+134,7 грн
Загальні витрати на 1 га, грн	464,8	478,2	+13,4 грн
Глибина обробітку ротором, м	0,143	0,149	+0,006 м
Середня глибина обробітку ґрунтоуглиблювачами, м	–	0,24	–
Гребнистість поверхні, м	0,047	0,042	-0,005 м
Підрізання стерні, %	95	100	+5 %

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих конструкцій ротаційних плугів, що застосовуються у технологіях органічного землеробства, показав наявність суттєвих недоліків: надмірне навантаження на трансмісію трактора, бокове відхилення агрегату, недостатнє заглиблення робочих органів, нерівномірність обробітку ґрунту та обмеження робочої швидкості.
2. Встановлено, що додаткові механічні втрати та самовиглиблення робочих органів під дією реакції ґрунту призводять до підвищення енергетичних витрат і зниження ефективності виконання технологічного процесу.
3. До основних факторів, що впливають на тягово-зчіпні властивості агрегату, віднесено: тяговий опір, масу та ширину захвату машини, швидкість руху, енергетичні витрати, а також сили, що діють на агрегат.
4. Для підвищення ефективності роботи роторних плугів запропоновано враховувати зазначені фактори при розробці конструкцій та виборі режимних параметрів роботи, що дає змогу покращити якість обробітку ґрунту та знизити енергетичні витрати.
5. Встановлено критерії оцінки роботи тягово-приводного агрегату з роторним плугом: тяговий ККД, чиста продуктивність і питомі енергетичні витрати. Ці показники залежать від раціонального поєднання швидкості руху трактора та ширини захвату робочої машини.
6. Методика графоаналітичного розрахунку тягово-приводного агрегату дозволила визначити оптимальний робочий діапазон коефіцієнта зчеплення $f_{кр} = 0,22-0,36$ та швидкість 2,4-3,6 м/с, при яких досягається максимальний тяговий ККД і питома продуктивність на одиницю потужності.
7. Конструктивні особливості модернізованого роторного плуга (рама, активні сферичні диски, карданні передачі, редуктор, ґрунтопоглиблювачі та опорне колесо) забезпечують стабільність робочого ходу, рівномірне розпушування та якісне підрізання стерні.

8. Результати експлуатаційних випробувань показали, що модернізований роторний плуг забезпечує глибину обробітку до 0,24 м, рівномірність розпушування та відповідність агротехнічним вимогам. Продуктивність агрегату становить 1,87 га/год при питомих витратах пального 8,5 кг/га.
9. Оптимальна робоча швидкість становить $3,0 \pm 0,2$ м/с, при перевищенні якої знижується якість обробки. Для базового плуга ОВПП-2,4 спостерігається нерівномірність заглиблення та нестабільність роботи при швидкості понад 4,2 км/год, що підтверджує переваги модернізованої конструкції.
10. В результаті техніко-економічного аналізу встановлено, що модернізований роторний плуг забезпечує підвищення продуктивності на 23%, скорочення часу роботи на 12 га на 1,5 год, а також покращення якості обробітку ґрунту (зменшення гребнистості, покращене підрізання стерні, стабільна глибина).
11. Незважаючи на незначне збільшення витрат на паливо та амортизацію, за рахунок економії робочого часу та підвищення продуктивності модернізований агрегат є економічно доцільним і енергетично ефективним рішенням для впровадження в технологіях органічного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kumar, A., Singh, R., & Yadav, S. (2022). Energy Saving Performance of Agricultural Tractor Equipped with Mechanic-Electronic-Hydraulic Powertrain System. *Agriculture*, 12(3), 436.
2. Roslavtsev, A. V. (2019). Headland Turning Optimisation for Agricultural Vehicles and Those with Towed Implements. *Applied Sciences*, 9(12), 2541.
3. Zhang, H., Wang, X., & Chen, J. (2019). Simulation Study for Overturning and Rollover Characteristics of a Tractor with an Implement on a Hard Surface. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(4), 515–524.
4. Lateral Overturning and Backward Rollover of Agricultural Tractors: A Review (2024). *Agriculture*, 14(3), 334. Energy Consumption Studies of Machine-Tractor Aggregate for Staggered Sowing of Hoeing Crops on Calcic Chernozem (2025). *Acta Technologica Agriculturae*, 28(2), 135–142.
5. Авдеєнко А. П. Біологізація землеробства як фактор підвищення ефективності агровиробництва // Вісник аграрної науки. – 2018. – Т. 96, №7. – С. 25–31.
6. Кириленко Ю. П., Русаков В. В. Ресурсозберігаючі технології у системі сучасного землеробства України // Аграрний вісник Причорномор'я. – 2019. – №1. – С. 72–79.
7. Довбан К. І. Біологічні основи сталого землеробства : монографія. – Київ : ННЦ «Інститут землеробства НААН», 2020. – 214 с.
8. Камбулов С. І. Послойний безвідвальний обробіток ґрунту комбінованими робочими органами // Наукові праці Інституту механізації та електрифікації сільського господарства. – 2017. – №5. – С. 15–21.
9. Щегорець О. В. Сівозміна як основа підвищення ефективності біологізованого землеробства // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2019. – №2. – С. 41–47

10. Орешкін М. В. Застосування біологічних методів захисту рослин у системі органічного землеробства // *Агробіологія*. – 2021. – Т. 1, №2. – С. 55–62.
11. Камчадалов Є. П., Рубан Ю. М., Липкань А. В. Концепція техногенно-нормованої експлуатації машинно-тракторного парку // *Техніка і технології АПК*. – 2015. – №3. – С. 22–29.
12. *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. – Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. – 224 p.
13. Popescu S., Rusu T., Moraru P. I. Conservation tillage in crop rotation and its effect on soil quality // *Romanian Agricultural Research*. – 2016. – Vol. 33. – P. 123–130.
14. Lal R. Regenerative agriculture for food and climate // *Journal of Soil and Water Conservation*. – 2020. – Vol. 75, No. 5. – P. 123–129.
15. Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global spread of Conservation Agriculture // *International Journal of Environmental Studies*. – 2019. – Vol. 76, No. 1. – P. 29–51.
16. Gomiero T. Food quality assessment in organic vs. conventional agricultural produce: Findings and issues // *Applied Soil Ecology*. – 2018. – Vol. 123. – P. 714–728.
17. Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 1435–1446. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
18. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
19. Oliveira, E. M., et al. (2024). Effects of conventional, organic and conservation tillage systems on soil structure and microbial biomass in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 215, 105232. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105232>
20. Krauss, M., et al. (2017). Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil organic carbon under organic farming. *Soil and Tillage Research*, 165, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>

21. Gadermaier, F., et al. (2012). Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(3), 201–211. <https://doi.org/10.1017/S1742170512000106>
22. Cooper, J., et al. (2016). Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains soil organic carbon and improves soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.008>
23. Lorenz, K., & Lal, R. (2015). Environmental impact of organic agriculture. *Advances in Agronomy*, 130, 1–63. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.11.001>
24. Palm, C., et al. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
25. Haddaway, N. R., et al. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
26. Pearsons, K. A., et al. (2023). A tale of two systems: Does reducing tillage affect soil health in organic systems? *Soil and Tillage Research*, 222, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>
27. Білецький В. С. Теорія та конструкція сільськогосподарських машин. – К.: Аграрна освіта, 2019.
28. Кириченко В. В. Ґрунтообробні машини для органічного землеробства. – Харків: ХНАУ, 2020.
29. Демиденко О. О. Агротехнічні аспекти використання роторних плугів. // Вісник аграрної науки. – 2021.
30. Wong J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. – Wiley, 2010.
31. Lal R. *Soil and Sustainable Agriculture*. – Springer, 2015.