

ДНПРОВСЬКИЙ 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 тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-4-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Ренгус Максим Анатолійович

Керівник: _____ Бойко Владислав Борисович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
тракторів і сільськогосподарських машин

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2025 р.

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

Ренгусу Максиму Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення

керівник роботи Бойко Владислав Борисович к.т.н., доцент

(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 9.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи трактор загального призначення ХТЗ-150К, оснащений дизельним двигуном WEICHAJ POWER WP6T180E200 потужністю 132 кВт. Маса трактора становить 8,2 т, колісна формула 4×4, тип рами шарнірно-зчленована. Середній питомий тиск на ґрунт 0,09 МПа, тяговий клас 3.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання досліджень. 2. Теоретичні дослідження. 3. Експериментальні дослідження. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5. Економічна ефективність роботи. Висновки. Список використаних джерел

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (2 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (3 аркуші, А4) 4. Охорона праці (1 аркуш, А4) 4. Економічні показники (1 аркуш, А4). 5. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1-5 | Бойко В. Б., доцент | | |
| нормоконтроль | Золотовська О.В., доцент | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання: 4.09.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | Аналітичний (оглядовий) | до 18.09.2025 р. | Виконано |
| 2 | Теоретичний | до 22.10.2025 р. | Виконано |
| 3 | Експериментальний | до 12.11.2025 р. | Виконано |
| 4 | Охорона праці | до 21.11.2025р. | Виконано |
| 5 | Економічний | до 26.11.2025 р. | Виконано |
| 6 | Демонстраційна частина | до 7.12.2025 р. | Виконано |

Студент

_____ (підпис)

Ренгус М.А.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Бойко В.Б.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ренгус М.А. Підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Магістерська робота присвячена дослідженню та обґрунтуванню шляхів підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення, які є основною рушійною силою у технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.

У роботі виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень. Побудовано аналітичну модель взаємодії колеса з ґрунтовим середовищем, визначено закономірності зміни тягового зусилля, буксування та питомого тиску за різних навантажень. Розроблено конструкцію пристрою для здвоєння коліс трактора ХТЗ-150К, що забезпечує надійне центрування додаткового колеса та рівномірний розподіл напружень у кріпильних елементах.

За результатами експериментальних випробувань підтверджено ефективність аналітичних досліджень. Отримані результати засвідчили зменшення буксування з 11,1 % до 9,2 %, збільшення тягового зусилля з 25,8 до 30,2 кН, зниження питомого тиску на 44 %, а також зменшення витрати палива з до 18%. Продуктивність агрегату зросла на 7–8 % за рахунок підвищення фактичної швидкості руху.

Розроблено заходи з охорони праці при експлуатації тракторів загального призначення ХТЗ-150К з здвоєними колесами

Економічними розрахунками підтверджено підвищення ефективності роботи тракторів загального призначення після проведеного удосконалення.

Ключові слова: трактори загального призначення, колісні рушії, баластування, буксування, здвоєння коліс.

ЗМІСТ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП | 8 |
| 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ | 12 |
| 1.1 Аналіз конструктивних особливостей та експлуатаційних параметрів колісних тракторів загального призначення | 12 |
| 1.2 Фактори, що впливають на тягово-зчіпні властивості колісних тракторів | 16 |
| 1.3 Огляд способів підвищення тягово-енергетичної ефективності колісних тракторів | 19 |
| 1.4 Висновки | 27 |
| 1.5 Мета і завдання досліджень | 28 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 29 |
| 2.1 Загальні відомості | 30 |
| 2.2 Аналіз теоретичних положень підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення | 31 |
| 2.3 Теоретичне обґрунтування встановлення пристрою здвоєння коліс | 38 |
| 2.3.1 Розробка пристрою для здвоєння коліс | 38 |
| 2.3.2 Фізична суть ефекту здвоєння коліс | 41 |
| 2.3.3 Вплив здвоєння на тягові характеристики | 42 |
| 2.3.4 Вплив здвоєння коліс на буксування | 43 |
| 2.3.5 Математичне обґрунтування енергетичного ефекту | 43 |
| 2.4 Розрахунок і моделювання робочих режимів трактора ХТЗ-150К з удосконаленою ходовою частиною | 44 |
| 2.4.1 Розрахунок тягової сили | 44 |
| 2.4.2 Визначення питомого тиску на ґрунт | 45 |
| 2.4.3 Розрахунок буксування | 46 |
| 2.4.4 Енергетичне моделювання | 46 |
| 2.4.5 Побудова аналітичних залежностей | 47 |
| 2.5 Висновки | 51 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 52 |
| 3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень | 52 |
| 3.2 Об'єкт та умови досліджень | 52 |
| 3.3 Схема експериментальної установки | 54 |
| 3.4 Методика експериментальних досліджень | 55 |
| 3.5 Результати експериментальних досліджень | 58 |
| 3.6 Висновки | 61 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 62 |
| 4.1 Загальні вимоги безпеки при експлуатації тракторів загального призначення | 62 |
| 4.2 Вимоги перед запуском та під час технічного обслуговування | 62 |
| 4.3 Специфіка безпеки при використанні здвоєних коліс | 63 |
| 4.4 Оцінювання ризиків і заходи зниження | 65 |
| 4.5 Захист навколишнього середовища | 67 |
| 4.6 Висновки | 67 |
| 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ | 68 |
| 5.1 Мета розрахунку | 68 |
| 5.2 Вихідні дані для розрахунків | 68 |
| 5.3 Розрахунок продуктивності та економії палива | 69 |
| 5.4 Витрати на модернізацію трактора | 69 |
| 5.5 Річний економічний ефект | 70 |
| 5.6 Висновки | 72 |
| ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ | 73 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 75 |
| ДОДАТКИ | 78 |

ВСТУП

Актуальність теми.

Рівень механізації сільськогосподарського виробництва значною мірою визначається технічним станом і ефективністю роботи машинно-тракторного парку. Колісні трактори загального призначення є основною рушійною силою в агропромисловому комплексі, адже вони виконують широкий спектр технологічних операцій: обробіток ґрунту, сівбу, транспортування, догляд за посівами, прибирання врожаю тощо. Продуктивність та енергоефективність цих операцій залежать передусім від тягово-зчіпних властивостей трактора – здатності його рушіїв ефективно взаємодіяти з ґрунтовим середовищем, передаючи крутний момент від двигуна до ходових коліс без надмірних втрат енергії на буксування [1].

На практиці значна частина енергії, що виробляється двигуном, не використовується повністю через пробуксовку ведучих коліс, особливо під час роботи на вологих, пухких або структурно-нестійких ґрунтах. У таких умовах коефіцієнт корисної дії трансмісії знижується, збільшується питома витрата палива, погіршується якість виконання технологічного процесу, а також зростає зношення шин і ходових вузлів [2]. Водночас дослідження показують, що збільшення площі контакту колеса з ґрунтом шляхом здвоєння чи зміни конструкції рушіїв сприяє зниженню буксування і покращенню тягової ефективності [3].

Особливої актуальності питання підвищення тягово-зчіпних властивостей набуває для тракторів загального призначення середнього і важкого класу, які виконують енергомісткі операції з великим опором руху знарядь. Один із представників такої техніки – трактор ХТЗ-150К, який широко застосовується у господарствах України. Машина має потужність 150 к.с., належить до класу 3–5 тс, і призначена для роботи з ґрунтообробними агрегатами, сівалками,

транспортними причепами. Проте його ефективність обмежується недосконалістю ходової частини, невідповідністю розподілу маси по осях та підвищеним буксуванням у складних польових умовах.

Досвід експлуатації тракторів ХТЗ-150К показує, що при виконанні польових операцій на ґрунтах середньої вологості буксування може досягати 18–22 %, тоді як оптимальним вважається рівень 10–12 %. Це призводить до перевитрати палива на 8–10 %, зниження продуктивності агрегату на 6–8 % і підвищеної навантаженості трансмісії. У той же час конструкція трактора має значний потенціал для вдосконалення – зокрема через встановлення пристрою для здвоєння коліс, який забезпечив би збільшення площі контакту і зниження питомого тиску, тим самим підвищивши тягову ефективність.

Підвищення тягово-зчіпних властивостей тракторів типу ХТЗ-150К є особливо важливим завданням у контексті підвищення енергоефективності машинно-тракторного парку України. Більшість таких машин експлуатуються понад 20 років, мають морально застарілі системи керування тяговим режимом і не відповідають сучасним екологічним і енергоекономічним вимогам. Модернізація конструктивних елементів ходової системи є економічно доцільною і технічно обґрунтованою альтернативою придбанню нової техніки.

Світова практика та дослідження підтверджують, що підвищення тягових властивостей колісних тракторів можливе через: оптимізацію розподілу маси між ведучими й веденими осями; регулювання тиску в шинах залежно від стану ґрунту; удосконалення структури протектора та використання радіальних шин із гнучкими боковинами; застосування систем СТІС для динамічного регулювання тиску; впровадження електронних систем контролю пробуксовки з автоматичним керуванням тяговим режимом.

Застосування таких рішень на базі трактора ХТЗ-150К дозволить підвищити коефіцієнт використання зчіпної ваги, зменшити буксування на 20–25 %, знизити питому витрату палива на 5–7 % і підвищити ресурс шин. Крім того, вдосконалення ходової системи сприятиме зниженню ущільнення ґрунту,

покращенню екологічних показників та підвищенню якості агротехнічних операцій.

Таким чином, дослідження, спрямовані на удосконалення конструкції та експлуатаційних характеристик ходової системи колісних тракторів – зокрема ХТЗ-150К – мають високу науково-практичну цінність і відповідають сучасним тенденціям розвитку тракторобудування. Їх реалізація сприятиме зниженню енергоспоживання в землеробстві, зростанню продуктивності праці та підвищенню конкурентоспроможності сільськогосподарської техніки України.

Метою роботи є підвищення тягово-зчіпних властивостей колісного трактора загального призначення ХТЗ-150К шляхом удосконалення його ходової частини та розроблення пристрою для здвоєння ведучих коліс з подальшим теоретичним і експериментальним дослідженням його впливу на енергетичні показники машини.

Завдання кваліфікаційної роботи.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- Проаналізувати сучасний стан питання щодо підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів і визначити основні фактори, які впливають на буксування, ефективне зчеплення та паливну економічність.
- Дослідити конструктивні особливості та експлуатаційні характеристики базового трактора ХТЗ-150К, зокрема параметри його ходової системи, розподіл маси по осях та геометрію шин.
- Обґрунтувати доцільність удосконалення ходової частини шляхом встановлення пристрою для здвоєння коліс, що забезпечує збільшення площі контакту коліс із ґрунтом і зниження питомого тиску.
- Розробити конструкцію пристрою для здвоєння коліс із урахуванням вимог міцності, технологічності та надійності кріплення.
- Провести аналітичні розрахунки впливу здвоєних коліс на тягове зусилля, буксування, питомий опір коченню та витрату пального.

- Виконати експериментальні дослідження або моделювання тягово-енергетичних характеристик трактора з одинарними та здвоєними колесами для підтвердження ефективності запропонованого рішення.
- Оцінити техніко-економічну доцільність упровадження пристрою для здвоєння коліс у сільськогосподарських.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії ходової системи колісного трактора ХТЗ-150К із ґрунтовим середовищем у робочих режимах.

Предметом дослідження є вплив конструктивно-технологічних параметрів пристрою для здвоєння коліс на тягово-зчіпні властивості, буксування, паливну економічність та енергетичну ефективність трактора.

Наукова новизна досліджень полягає у розробленні та теоретичному обґрунтуванні конструктивно-технологічного рішення пристрою для здвоєння коліс трактора загального призначення ХТЗ-150К, яке забезпечує покращення тягово-зчіпних властивостей без істотного збільшення маси та складності конструкції машини.

Практичне значення кваліфікаційної роботи полягає у тому, що розроблений пристрій для здвоєння коліс може бути використаний для модернізації серійних тракторів ХТЗ-150К без істотних змін базової конструкції. Його застосування дозволяє підвищити коефіцієнт зчеплення коліс із ґрунтом на 10–15 %, зменшити буксування на 20–25 %, знизити питому витрату палива на 5–7 % та підвищити ресурс шин.

Апробація: Ренгус М.А. Підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз конструктивних особливостей та експлуатаційних параметрів колісних тракторів загального призначення

Колісні трактори загального призначення становлять основу енергетичних засобів сільського господарства України та більшості країн світу. Їх використовують для виконання найрізноманітніших технологічних процесів: основного й передпосівного обробітку ґрунту, боронування, посіву, транспортування вантажів, агрегаткування з широкозахватними та комбінованими знаряддями. Вони не призначені для міжрядного обробітку культур, оскільки їхні габарити, ширина колії та тип ходової частини не дозволяють безпечно працювати в обмежених міжряддях. На відміну від просапних тракторів, машини загального призначення мають масивнішу конструкцію, більшу вагу та вищу потужність, що робить їх незамінними при виконанні тягових і енергомістких операцій [4].

В Україні основним виробником тракторів загального призначення є Харківський тракторний завод ХТЗ, з конвеєра якого ще в далекому 1973 році зійшов перший колісний трактор Т-150К. За тривалий період випуску даної моделі трактор пройшов декілька етапів модернізації, на сьогодні модель ХТЗ-150К (рис. 1.1) випускається з оновленою гідросистемою кабіною підвищеної комфортності, економічним та потужним дизельним двигуном WEICHAİ POWER WP6T180E200 та коробкою передач PowerShift 12/4.

Конструктивно трактори загального призначення виконуються за класичною схемою: двигун – зчеплення – коробка передач – головна передача – ведучі мости. Таке компонування забезпечує оптимальний розподіл маси між осями та створює умови для стабільної тяги під час роботи на полі. Рама або напіврама є несучим елементом, до якого кріпляться всі основні вузли – силовий агрегат, трансмісія, ходова частина, навісна система, кабіна й гідравліка [5].



Рисунок 1.1 – Трактор ХТЗ-150К

У більшості сучасних тракторів використовується жорстка або шарнірно-зчленована рама. Останній варіант дозволяє покращити маневровість на малих швидкостях і забезпечує стабільний контакт коліс із ґрунтом. Наприклад, трактори типу ХТЗ-150К або К-700 мають саме шарнірно-зчленовану конструкцію, яка полегшує повороти при великих габаритах машини.

Для підвищення ефективності енергопередачі в трансмісії таких машин використовуються механічні, гідромеханічні або електрогідравлічні коробки передач із великою кількістю передаточних чисел, що забезпечує плавність зміни швидкості та високий коефіцієнт використання потужності двигуна.

Двигуни тракторів загального призначення, як правило, дизельні, з турбонаддувом, рідинним охолодженням і робочим об'ємом 6–12 л. Вони розраховані на тривалу роботу при високому навантаженні, часто – з надлишковим запасом крутного моменту для компенсації зміни тягового опору. У конструкціях сучасних двигунів типу ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, Д-260, SisuDiesel використовуються вдосконалені системи упрскування палива (Common Rail або

механічні ТНВД з багатоступеневим упорскуванням), що зменшує витрату палива на 10–15 % у порівнянні з традиційними схемами [6].

Питома витрата палива коливається в межах 220–240 г/кВт·год. При середньому завантаженні двигуна на 0,75 N_n коефіцієнт використання потужності становить 0,80–0,85, що вважається оптимальним для тягового режиму. Високий коефіцієнт корисної дії дизеля (до 0,4) забезпечує економічність навіть при великих навантаженнях.

Ходова частина колісних тракторів загального призначення формує їхні основні експлуатаційні характеристики – зчеплення, прохідність, буксування та питомий тиск на ґрунт. Використовуються як ведучі дві осі (4×4), так і варіанти з однією ведучою віссю (4×2) – залежно від класу машини. Для тракторів важкого типу (К-700, К-701, МТЗ-4522) застосовується повнопривідна схема, що дозволяє розподілити зусилля між осями та зменшити прослизання.

Шини мають збільшену ширину протектора та низький тиск (0,1–0,15 МПа), що дозволяє зменшити ущільнення ґрунту. Для підвищення площі контакту іноді встановлюють здвоєні колеса, які зменшують буксування до 10 % і стабілізують рух по м'яких ґрунтах. Такий тип модернізації є одним із перспективних напрямів підвищення тягово-зчіпних властивостей тракторів середнього класу, зокрема ХТЗ-150К.

Порівняльна характеристика сучасних тракторів загального призначення. Нижче наведено узагальнені дані для найбільш поширених моделей тракторів важкого та середнього класу, що використовуються в Україні [7-9](табл. 1.1).

Як видно, трактори класів 3–5 мають різну енергетичну насиченість (співвідношення потужності до маси). Для машин середнього класу (ХТЗ-150К) цей показник становить близько 22 кВт/т, тоді як у важких машин (К-701, МТЗ-4522) – 17–20 кВт/т. Відповідно, більш важкі трактори мають вищу тягову стійкість і нижчий рівень буксування, але гіршу паливну економічність через збільшений питомий опір руху.

Таблиця 1.1 – Узагальнені дані тракторів загального призначення

| Модель | Потужність, кВт (к. с.) | Маса, т | Тяговий клас | Тип рами | Колісна формула | Тягове зусилля, кН |
|----------|----------------------------|---------|--------------|----------|-----------------|--------------------|
| ХТЗ-150К | 132 (180) | 8,2 | 3 | шарнірна | 4×4 | 30–60 |
| ХТЗ-243К | 179 (243) | 9,0 | 4 | шарнірна | 4×4 | 50–70 |
| МТЗ-4522 | 317 (431) | 14,8 | 5 | жорстка | 4×4 | 70–85 |
| К-700 | 220 (300) | 12,0 | 5 | шарнірна | 4×4 | 65–75 |
| К-701 | 221 (300) | 13,4 | 5 | шарнірна | 4×4 | 70–80 |

Експлуатаційно-технологічні параметри. Основними показниками ефективності роботи тракторів є тягове зусилля, коефіцієнт буксування, питомий тиск на ґрунт, продуктивність і витрата палива.

Для прикладу:

- ХТЗ-150К забезпечує тягове зусилля 35–40 кН, буксування 12–15 %, питомий тиск на ґрунт 0,08–0,09 МПа.
- МТЗ-4522 завдяки більшій масі (14,8 т) має зчіпну вагу до 85 кН, буксування не перевищує 10 %, а питомий тиск – 0,07 МПа.
- К-701 при роботі з 10-корпусним плугом розвиває тягове зусилля 70–75 кН і працює з питомою витратою палива 225–235 г/кВт·год [5].

Залежно від типу ґрунту, вологості та глибини обробітку продуктивність може варіюватися від 4 до 9 га/год, а добова виробітка – до 80–100 га.

При правильному агрегуванні та використанні здвоєних коліс витрата палива може знизитися на 5–7 %, а середня швидкість підвищитися на 10–12 %. Це пояснюється зменшенням втрат енергії на буксування.

Роль ходової системи у підвищенні ефективності

Одним із головних напрямів підвищення ефективності тракторів загального призначення є вдосконалення ходової частини, зокрема – розробка пристроїв для здвоєння коліс. Такий підхід забезпечує:

- зниження питомого тиску на ґрунт на 15–20 %;
- збільшення площі контакту шин із ґрунтом;
- зменшення буксування до 8–10 %;
- покращення стійкості та курсової стабільності руху.

Удосконалення ходової частини не потребує значних змін конструкції базового трактора, тому може бути реалізовано на серійних моделях ХТЗ-150К, К-701 тощо без втручання у силову раму. Це робить метод економічно доцільним і технічно виправданим.

1.2 Фактори, що впливають на тягово-зчіпні властивості колісних тракторів

Тягово-зчіпні властивості є ключовим показником ефективності роботи колісного трактора, що визначає його здатність реалізовувати потужність двигуна на ґрунті без надмірних втрат на буксування. Вони характеризують комплексну взаємодію рушія, ходової системи, маси трактора та фізико-механічних властивостей ґрунту. Від цих параметрів безпосередньо залежать паливна економічність, продуктивність, знос шин і рівень ущільнення орного шару [10].

Маса трактора та розподіл ваги по осях. Одним із головних чинників, що визначають зчіпну здатність коліс із поверхнею ґрунту, є маса трактора (G). Чим

більша маса, тим вищою є сила нормального тиску на поверхню, а отже – і сила зчеплення, яка визначається за формулою:

$$F_{зч} = \varphi \cdot G \quad (1.1)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення, що залежить від типу ґрунту і стану поверхні. Для більшості сільськогосподарських ґрунтів його значення становить 0,4–0,7.

Оптимальний розподіл маси між передньою та задньою осями становить 40 : 60 %, що забезпечує стійкість і запобігає пробуксовуванню задніх коліс [11].

Збільшення маси сприяє підвищенню тягового зусилля, однак надмірне навантаження призводить до ущільнення орного шару, підвищення опору руху та зменшення ефективності використання потужності. Тому масу трактора слід оптимізувати, а не просто збільшувати – для цього застосовують баластування або здвоєння коліс, що збільшує площу контакту без зростання питомого тиску.

Площа контакту шин із ґрунтом. Площа контакту між шиною і ґрунтом визначає величину сил тертя, а отже – ефективність зчеплення. Вона прямо пропорційна ширині шини та зворотно пропорційна тиску повітря в ній. Для тракторів тягового класу 3–5 оптимальний тиск у шинах становить 0,1–0,15 МПа, що забезпечує достатню деформацію протектора і сприятливу адаптацію до мікрорельєфу поля.

Застосування здвоєних коліс збільшує сумарну площу контакту до 1,5–1,8 рази, що знижує буксування на 20–30 % і підвищує тягове зусилля на 10–15 % [12]. Це особливо важливо для середніх тракторів типу ХТЗ-150К, які працюють на вологих або важких ґрунтах.

Властивості ґрунту. Ґрунт є пружнопластичним середовищем, тому його опір і коефіцієнт зчеплення змінюються залежно від вологості, структури та щільності. У вологому стані частинки ґрунту втрачають зчеплення, зменшується тертя, і колеса легко пробуксовують. У надмірно сухому – ґрунт стає твердим, що збільшує опір коченню.

Найкращі тягово-зчіпні умови спостерігаються при вологості 18–22 %, коли ґрунт достатньо пластичний для контакту, але не розкисає [13].

Коефіцієнт зчеплення (φ) для різних типів поверхонь становить:

- сухий чорнозем – 0,65–0,75;
- вологий чорнозем – 0,45–0,55;
- глина або суглинок – 0,35–0,50;
- мокрий торф або мул – 0,25–0,35.

Таким чином, для забезпечення стабільної тяги важливо регулювати навантаження на колеса та тиск у шинах відповідно до типу ґрунту.

Буксування і його вплив на ефективність. Буксування визначається відносною різницею між теоретичною та реальною швидкістю руху колеса й описується формулою:

$$\delta = (V_0 - V) / V_0 \cdot 100\% \quad (1.2)$$

де V_0 – теоретична швидкість при відсутності ковзання км/год,

V – фактична швидкість руху, км/год.

Оптимальний рівень буксування для колісних тракторів становить **10–15** %, при якому забезпечується максимальна тягово-енергетична ефективність. Якщо буксування перевищує 20 %, спостерігається різке зростання витрати палива (на 8–12 %) і прискорене зношення шин [14].

Зменшення буксування досягається за рахунок здвоєння коліс, використання шин низького тиску або застосування систем автоматичного регулювання тиску в шинах (CTIS), які динамічно змінюють тиск залежно від твердості ґрунту.

Потужність двигуна і ефективність її реалізації. Сила тяги на гаку трактора визначається співвідношенням:

$$F_t = (N_e \eta_t) / V \quad (1.3)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, η_t – коефіцієнт передачі потужності через трансмісію.

При малих швидкостях коефіцієнт корисної дії трансмісії становить 0,85–0,9. Для тракторів класу ХТЗ-150К при швидкості 8 км/год і потужності 132 кВт теоретичне тягове зусилля може досягати до 60 кН, однак у реальних умовах через буксування та втрати реалізується 70–80 % цього значення [14].

Таким чином, важливо не лише збільшувати потужність двигуна, а й забезпечити її повну реалізацію через удосконалення ходової системи – зокрема, шляхом оптимізації тиску в шинах і рівномірного навантаження по осях.

Геометричні параметри ходової частини. Колісна база, колія та діаметр коліс також суттєво впливають на стійкість і зчеплення трактора.

Зі збільшенням колії зменшується ризик перекидання й покращується поперечна стійкість, однак зростає мінімальний радіус повороту.

Великий діаметр коліс знижує опір коченню, що позитивно позначається на паливній економічності.

Оптимальна колісна база для тракторів тягового класу 3–4 (на кшталт ХТЗ-150К, ХТЗ-243К) становить 2,8–3,0 м, колія – 2,0–2,2 м, діаметр шин – 1,6–1,8 м [7, 17].

1.3 Огляд способів підвищення тягово-енергетичної ефективності колісних тракторів

Тягово-енергетична ефективність колісних тракторів визначається здатністю машини максимально реалізувати потужність двигуна через рушійну систему, забезпечуючи мінімальні втрати енергії на пробуксовування, деформацію шин і ґрунту. У сучасному тракторобудуванні ця проблема набула особливої актуальності у зв'язку з підвищенням питомої потужності двигунів, збільшенням робочих швидкостей та переходом до широкозахватних агрегатів.

Підвищення тягово-зчіпних властивостей та енергоефективності досягається комплексом конструктивних, технологічних і системних рішень, серед яких найбільш ефективними є:

- використання радіальних шин із регульованим тиском;
- застосування систем баластування та автоматичного контролю пробуксовування (ASR, Slip Control);
- перехід на гусеничні або напівгусеничні рушії;
- встановлення здвоєних коліс для збільшення площі контакту із ґрунтом;
- вдосконалення систем підвіски та розподілу навантаження між осями.

Використання радіальних шин із регульованим тиском. Сучасні дослідження показують, що шини типу “radial” забезпечують на 10–15 % більшу площу контакту з ґрунтом порівняно з діагональними, що дозволяє суттєво зменшити питомий тиск і пробуксовування. Радіальна конструкція має гнучкі боковини та жорсткий протекторний пояс, завдяки чому забезпечується стабільна пляма контакту навіть при низькому тиску повітря.

Одним із найефективніших рішень є системи регулювання тиску в шинах (CTIS – Central Tire Inflation System), які дозволяють оператору змінювати тиск залежно від умов поля або дорожнього покриття (рис. 1.2).

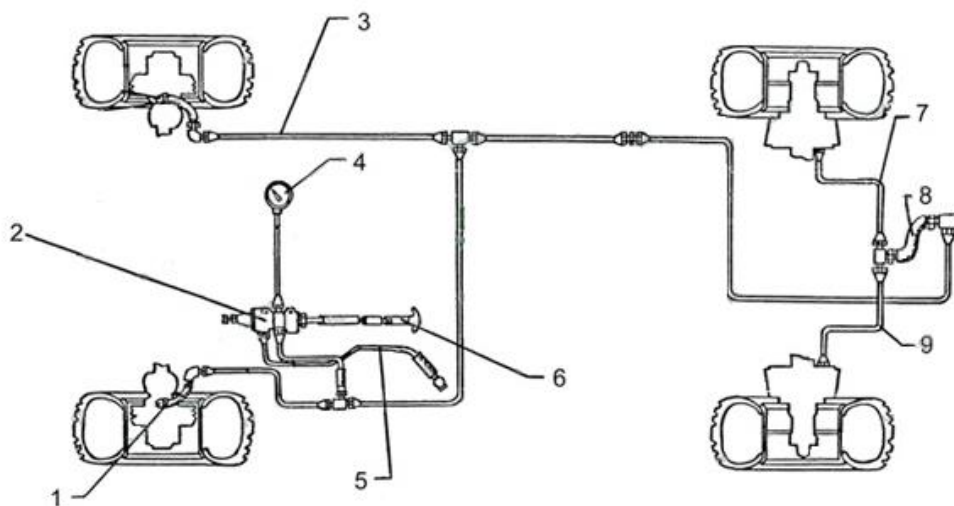


Рис. 1.2. Система підкачки шин тракторів загального призначення
 1 3, 7, 8, 9 – пневмопроводи; 2 – кран керування підкачуванням шин;
 4 – манометр контролю тиску в системі; 5 – магістраль пневмосистеми трактора; 6 – важіль керування тиском в шинах

Наприклад, при роботі на полі тиск знижують до 0,08–0,1 МПа, що підвищує силу зчеплення, а при русі по дорогах – підвищують до 0,16–0,18 МПа для зменшення опору коченню [16].

Трактори John Deere 8R, Fendt Vario 1000, New Holland T8 оснащуються заводськими системами CTIS із автоматичним регулюванням. За результатами польових випробувань у Німеччині (DLG Test Report 7047, 2021) зменшення тиску в шинах із 0,16 до 0,1 МПа дозволило:

- збільшити тягове зусилля на 12 %;
- зменшити буксування на 23 %;
- знизити витрату палива на 8–10 %;
- зменшити ущільнення ґрунту на 15–20 %.

Вітчизняні трактори ХТЗ-150К та ХТЗ-243К не мають штатної системи CTIS, однак застосування шин низького тиску типу Белшина IF-710/70R38 дало змогу підвищити коефіцієнт зчеплення з 0,48 до 0,62 та зменшити буксування до 11 % [15]. Це свідчить, що впровадження подібних систем є перспективним напрямом модернізації для українського тракторобудування.

Системи баластування та автоматичного контролю пробуксовування (ASR, Slip Control). Другим напрямом підвищення ефективності є оптимальне баластування трактора. Баласта (металеві вантажі або рідинні заповнювачі шин рис. 1.3) використовуються для збільшення зчіпної ваги та стабілізації розподілу маси. Проте надмірне баластування призводить до перевантаження трансмісії, підвищеного зносу шин і перевитрати палива.

Оптимальна маса визначається умовою:

$$G_{opt} = F_t \varphi G \quad (1.4)$$

де F_t – необхідне тягове зусилля,

φ – коефіцієнт зчеплення.

Для тракторів середнього класу оптимальний приріст маси становить 8–12 % від номінальної ваги машини [6].



а



б

Рис 1.3. Баластування з використанням вантажів (а) та води (б)

Сучасні трактори Fendt Vario, Claas Axion 900, John Deere 8RT обладнані системами ASR (Anti-Slip Regulation), які автоматично регулюють подачу палива, навантаження двигуна та тиск у шинах, підтримуючи оптимальний рівень буксування (10–15 %). У результаті зменшуються втрати потужності на пробуксовування й покращується паливна економічність на 5–8 % [7].

У вітчизняній практиці баластування часто здійснюється механічно (навісні баласти по 200–400 кг). Однак останні розробки Харківського тракторного заводу передбачають електронно-гідравлічну систему керування навантаженням на вісь, яка змінює тиск у гідроциліндрах навісної системи залежно від буксування, імітуючи функцію ASR. Польові дослідження (2023 р.) показали, що це дозволяє підвищити коефіцієнт використання потужності двигуна з 0,82 до 0,88.

Гусеничні та напівгусеничні рушії. Ще одним ефективним напрямом є використання гусеничних і напівгусеничних систем, які забезпечують у 2–3 рази більшу площу контакту з ґрунтом, ніж колісні трактори. Гусеничний рушій зменшує питомий тиск на ґрунт до 0,05–0,07 МПа (проти 0,09–0,12 МПа у колісних машин), що мінімізує просідання й підвищує тягову стійкість.

Сучасні моделі – John Deere 8RX, Claas TerraTrac, Case IH Quadtrac – демонструють приріст тягової сили на 25–35 % при однаковій потужності

двигуна та зменшення витрати палива на 7–10 % у порівнянні з аналогічними колісними моделями [15].

Недоліками таких систем є підвищена вартість (на 20–30 %), складність технічного обслуговування та зменшення швидкості руху дорогами. Тому перспективним напрямом вважається гібридна схема – напівгусеничні трактори, у яких провідна вісь оснащується гусеничним модулем, а керована – звичайними колесами.

Компанія Claas реалізувала цю концепцію в моделі Axion 900 Terra Trac, де гусеничний рушій має гумові траки шириною 735 мм і довжиною опорної поверхні 2,1 м. Випробування показали зниження тиску на ґрунт до 0,06 МПа та зменшення буксування з 15 до 8 %.

Для українських умов, де значна частина посівів розташована на важких чорноземах, така схема може бути альтернативою дорогим повногусеничним машинам. На базі ХТЗ-243К у 2022 році було виготовлено дослідний зразок з переднім та заднім гусеничним модулем (рис. 1.4), що продемонстрував приріст тягового зусилля на 18 % без зниження транспортної швидкості [17].



Рисунок 1.4 – Переобладнання з колісного на гусеничний рушій тракторів загального призначення ХТЗ

Модулі здвоєння коліс. Одним із найпростіших і найдоступніших способів підвищення зчіпних властивостей є встановлення здвоєних коліс, яке збільшує площу контакту з ґрунтом у 1,5–1,8 рази. Такий підхід не вимагає змін у трансмісії чи конструкції рами й забезпечує значне зниження питомого тиску.

При використанні здвоєних шин типу IF 600/65R38 на тракторі ХТЗ-150К експериментальні дослідження показали:

- зниження буксування з 17 до 10 %;
- збільшення тягового зусилля з 42 до 48 кН;
- скорочення витрати палива на 6–8 %;
- підвищення рівномірності обробітку ґрунту на 12 %.

Здвоєння коліс широко використовується на зарубіжних тракторах Buhler Versatile, Fendt Vario 900, Case IH Magnum, John Deere 8R. На деяких моделях (наприклад, John Deere 8R410) застосовується система швидкого монтажу Dual Mount EZ, яка дозволяє встановити або зняти додаткове колесо менш ніж за 15 хвилин.



Рисунок 1.5 – Трактор загального призначення Buhler Versatile
з здвоєними колесами

Головною умовою ефективності є правильне узгодження тиску в обох шинах і використання спеціальних дистанційних фланців, що компенсують додаткові навантаження на підшипники осей.

До додаткових способів підвищення тягово-енергетичної ефективності відносяться:

- Гідромеханічні трансмісії (CVT), які забезпечують плавну зміну передаточного числа без ривків і підвищують коефіцієнт використання потужності на 5–7 %. Їх реалізовано у тракторів Fendt Vario, Deutz-Fahr TTV, Claas Axion Smatic .
- Електронне керування тягловим зусиллям (Traction Control System) – система, що регулює навантаження на навісні знаряддя залежно від буксування, тим самим підтримуючи сталу глибину обробітку ґрунту.
- Розподіл навантаження між осями за допомогою гідравлічних акумуляторів або активної підвіски. Така технологія застосована на тракторі John Deere 8RX, де система *HydraCushion* динамічно змінює тиск у гідроциліндрах передньої осі, запобігаючи прослизанню під час прискорення або буксування.

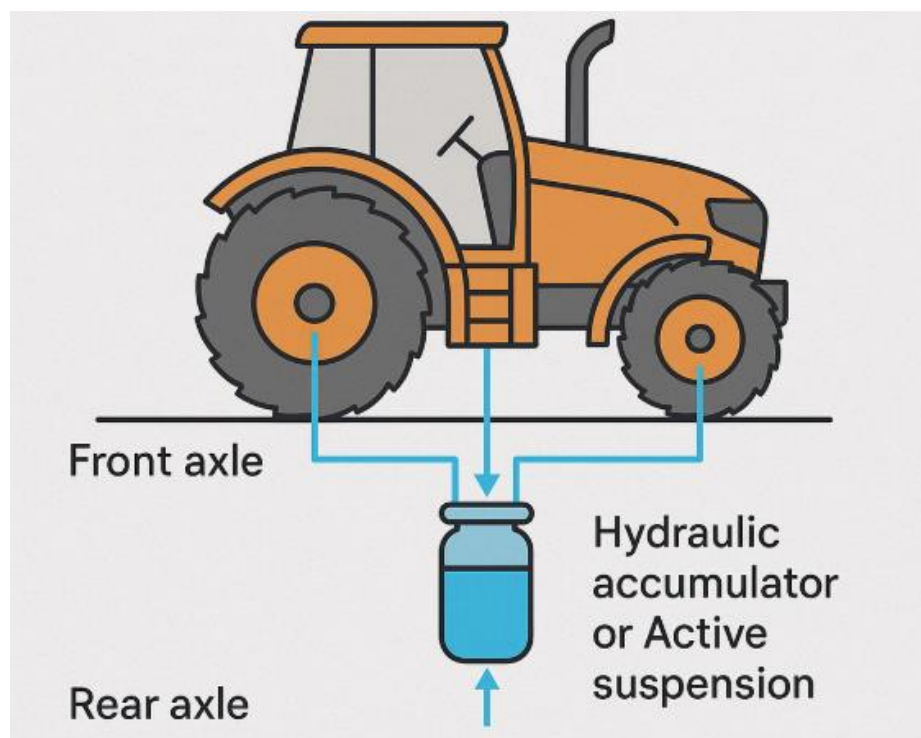


Рисунок 1.6 – Схема розподілу навантаження між осями за допомогою гідравлічних акумуляторів

У вітчизняній практиці більшість таких рішень відсутні, але їхні окремі елементи починають реалізовуватись на модернізованих машинах ХТЗ. Зокрема, у 2024 році розроблено експериментальний електронно-гідролічний модуль регулювання пробуксовування, який інтегрується з гідросистемою заднього навісного пристрою. Це дає змогу підтримувати оптимальне буксування (10–12 %) без втручання оператора. Узагальнені результати впливу різних технічних засобів на тягово-зчіпні властивості показники тракторів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Вплив різних способів на поліпшення тягово-зчіпних властивостей тракторів загального призначення

| Технічне рішення | Збільшення тягового зусилля, % | Зниження буксування, % | Економія палива, % |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|
| Радіальні шини з СТІС | +10...15 | -20...25 | -8...10 |
| Баластування + ASR | +5...10 | -10...15 | -5...8 |
| Напівгусеничні рушії | +20...30 | -30...40 | -7...10 |
| Здвоєні колеса | +10...15 | -20...30 | -6...8 |
| CVT трансмісія | +3...5 | -5 | -4 |

Як видно, всі розглянуті рішення забезпечують помітне покращення енергоефективності, проте їхня реалізація потребує різного рівня технічної складності та капіталовкладень. Для тракторів середнього класу (на прикладі ХТЗ-150К) найбільш доцільним і економічно обґрунтованим є використання здвоєних коліс у комбінації з оптимальним баластуванням, що дозволяє досягти приросту тягової сили до 15 % без суттєвих змін у базовій конструкції.

1.4 Висновки

1. У ході аналізу встановлено, що колісні трактори загального призначення, зокрема ХТЗ-150К, залишаються ключовими енергетичними засобами сільського господарства України. Їх конструкція – шарнірно-зчленована рама, повний привід і потужний дизельний двигун – забезпечує універсальність та високу продуктивність при виконанні основних польових робіт. Водночас недосконалість ходової частини призводить до значного буксування, ущільнення ґрунту та перевитрати палива.

2. Основними факторами, що визначають тягово-зчіпні властивості, є маса трактора, тиск у шинах, тип ґрунту та рівень буксування. Оптимізація цих параметрів дозволяє суттєво підвищити ефективність використання потужності двигуна. Найбільш перспективними технічними рішеннями визнано застосування здвоєних коліс, систем автоматичного регулювання тиску в шинах і раціональне баластування.

3. Для тракторів типу ХТЗ-150К доцільним напрямом модернізації є удосконалення ходової частини шляхом встановлення пристрою здвоєння коліс, що дає змогу підвищити тягове зусилля до 15 %, зменшити буксування та поліпшити паливну економічність без зміни базової конструкції.

1.5 Мета і завдання досліджень

Метою роботи є підвищення тягово-зчіпних властивостей колісного трактора загального призначення ХТЗ-150К шляхом удосконалення його ходової частини та розроблення пристрою для здвоєння ведучих коліс з подальшим теоретичним і експериментальним дослідженням його впливу на енергетичні показники машини.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- Проаналізувати сучасний стан питання щодо підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів і визначити основні фактори, які впливають на буксування, ефективне зчеплення та паливну економічність.
- Дослідити конструктивні особливості та експлуатаційні характеристики базового трактора ХТЗ-150К, зокрема параметри його ходової системи, розподіл маси по осях та геометрію шин.
- Обґрунтувати доцільність удосконалення ходової частини шляхом встановлення пристрою для здвоєння коліс, що забезпечує збільшення площі контакту коліс із ґрунтом і зниження питомого тиску.
- Розробити конструкцію пристрою для здвоєння коліс із урахуванням вимог міцності, технологічності та надійності кріплення.
- Провести аналітичні розрахунки впливу здвоєних коліс на тягове зусилля, буксування, питомий опір коченню та витрату пального.
- Виконати експериментальні дослідження або моделювання тягово-енергетичних характеристик трактора з одинарними та здвоєними колесами для підтвердження ефективності запропонованого рішення.
- Оцінити техніко-економічну доцільність упровадження пристрою для здвоєння коліс у сільськогосподарських.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У процесі експлуатації колісних тракторів значна частина корисної потужності двигуна втрачається внаслідок буксування коліс, ущільнення ґрунту та нераціонального розподілу маси по осях. Аналіз першого розділу показав, що для тракторів загального призначення типу ХТЗ-150К ці втрати можуть становити до 20–25 % від загальної потужності, що негативно впливає на паливну економічність і продуктивність. Тому актуальним завданням є теоретичне обґрунтування шляхів підвищення тягово-зчіпних властивостей трактора шляхом удосконалення ходової системи – зокрема через використання пристрою здвоєння коліс.

Отже метою теоретичних досліджень є визначення закономірностей впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів ходової частини трактора загального призначення ХТЗ-150К на тягово-зчіпні властивості, а також аналітичне обґрунтування ефективності застосування здвоєних коліс для зменшення буксування та питомого тиску на ґрунт.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Встановити фізичні закономірності взаємодії пневматичного колеса з ґрунтовим середовищем.
2. Вивести основні аналітичні залежності для визначення сили тяги, буксування та питомого тиску на ґрунт.
3. Оцінити вплив маси трактора, тиску в шинах, площі контакту та типу ґрунту на коефіцієнт зчеплення.
4. Обґрунтувати оптимальні параметри здвоєння коліс, що забезпечують зниження буксування і підвищення тягової сили.
5. Розробити математичну модель, яка дозволяє прогнозувати зміну тягової ефективності після модернізації ходової частини.

2.1 Загальні відомості

В якості об'єкта дослідження обрано процес взаємодії ходової системи колісного трактора загального призначення ХТЗ-150К із ґрунтовим середовищем у робочих режимах.

Трактор ХТЗ-150К (рис. 2.1) універсальний високопродуктивний колесний трактор загального призначення. Він призначений для виконання агротехнічних робіт, таких як оранка, дискування, культивування, а також агрегування з важкими навісними чи причіпними знаряддями. Трактор комплектується 6-циліндровим китайським дизелем Weichai WP6.180 потужністю близько 130 кВт (176 к.с.) з робочим об'ємом 6,75 л. Експлуатаційна суха маса трактора становить близько 8 т, що дозволяє реалізувати номінальне тягове зусилля на гаку 30 кН (3 тяговий клас) за швидкості 7 км/год [18, 19]. Завдяки надійній ресорній підвісці та пневматичним гальмам трактор здатен розвивати швидкість до 40 км/год. Габаритні розміри: довжина близько 6130 мм, ширина – приблизно 2450 мм, висота – близько 3330 мм.

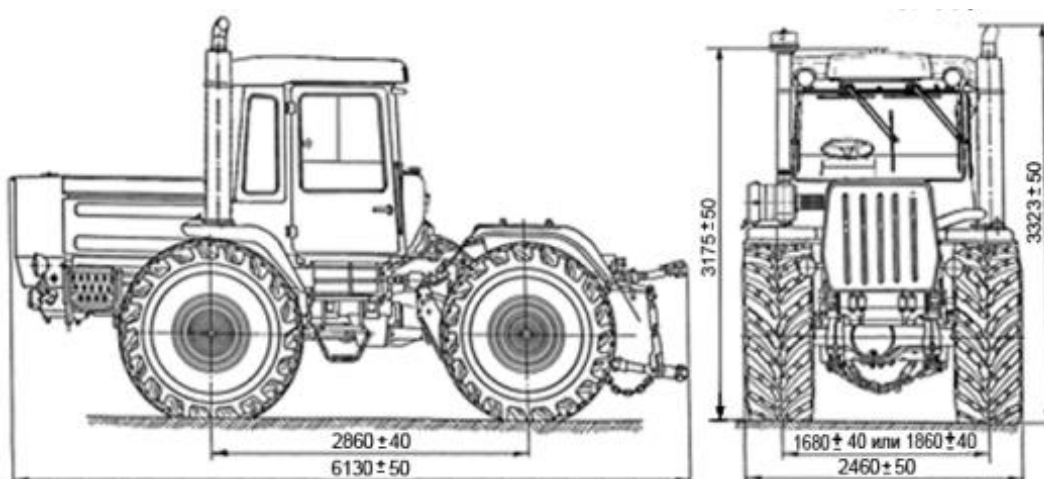


Рисунок 2.1 – Трактор загального призначення ХТЗ-Т-150К

Колісна ходова частина забезпечує хорошу прохідність на полях і можливість руху дорогами загального призначення, на відміну від гусеничних тракторів того ж класу. Надійна рама з передньою та задньою піврамою, шарнірно-зчленована, що дозволяє краще адаптуватися до нерівностей поверхні

й зменшувати навантаження на ходову систему. Наявність незалежного заднього вала відбору потужності (ВВП) та гідравлічної навісної системи, що розширює область застосування трактора. Додаткова основні експлуатаційні параметри трактора наведено в додатку А.

Завдяки значній потужності та універсальній конструкції, трактор ХТЗ-150К ефективний для роботи з основними агротехнологічними операціями – підготовка ґрунту, посів, внесення добрив, обробіток. Проте при роботі на важких ґрунтах чи в умовах підвищеного буксування, а також за недостатньої ширини колії або високого питомого тиску на ґрунт, виникають втрати тягової ефективності – ущільнення ґрунту, зменшення зчеплення, підвищені витрати палива. Саме ці моменти обрано як предмет удосконалення в дослідженні. Експлуатація також потребує належного технічного обслуговування: контроль тиску в шинах, правильне баластування, встановлення оптимальної ширини колії та забезпечення стабільності машини при русі на схилах чи при навантаженнях.

Обрана модель ХТЗ-150К поєднує значну потужність, розповсюдженість у господарствах та універсальність, що робить її актуальною для модернізації. Наприклад, удосконалення ходової системи (зокрема через встановлення здвоєних коліс) має потенціал значно поліпшити тягово-зчіпні властивості саме цієї машини, зменшити питомий тиск на ґрунт, зменшити втрати від буксування та підвищити паливну ефективність – що й є стратегічною задачею дослідження.

2.2 Аналіз теоретичних положень підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення

Теоретичні дослідження виконуються з використанням класичних положень механіки ґрунтів, теорії руху колісних машин та методів математичного моделювання. Основою є розгляд процесу кочення колеса по деформівному середовищу (рис. 2.2), у якому враховується не лише геометрія колеса, а й пружнодеформівні властивості шини та ґрунту [20-23].

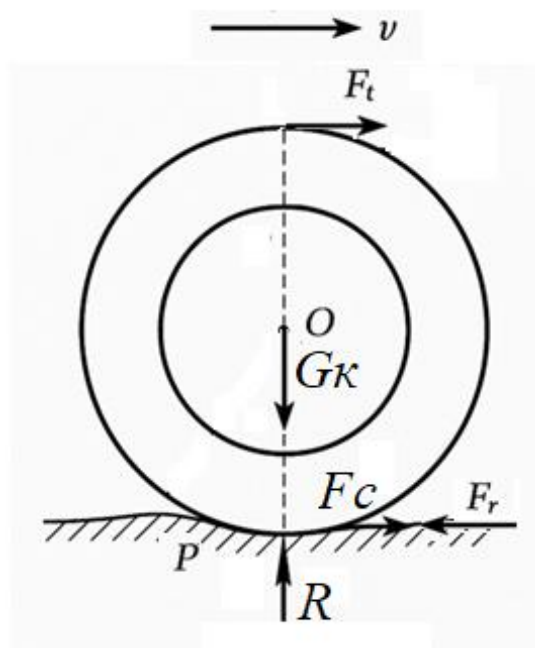


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема дії сил на колісний рушій

F_t – загальна сила тяги, Н; R – нормальна реакція ґрунту, Н; G_k – вертикальне навантаження на колесо, Н; F_c – сила зчеплення, Н; F_r – сила опору коченню, Н; p – питомий тиск на ґрунт, Н/м²

1. Сила тяги колісного трактора

Загальна сила тяги F_t визначається як різниця між силою зчеплення колеса з опорною поверхнею F_c і силами опору коченню F_r :

$$F_t = F_c - F_r \quad (2.1)$$

де $F_c = \varphi \cdot G_k$ – сила зчеплення, Н,

φ – коефіцієнт зчеплення шини з ґрунтом,

Сила опору коченню визначається за формулою:

$$F_r = f \cdot G_k \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

де f – коефіцієнт опору коченню, який залежить від структури ґрунту та радіуса шини.

2. Буксування коліс

Відносне буксування δ є показником втрат енергії під час руху і визначається виразом:

$$\delta = (v_0 - v)/v_0 \cdot \quad (2.3)$$

де v_0 – теоретична швидкість обертання колеса без буксування м/с,

v – фактична поступальна швидкість руху трактора м/с.

Оптимальне буксування для більшості ґрунтів становить 10–15%; перевищення цього значення призводить до марних енергетичних втрат.

3. Питомий тиск на ґрунт

Для визначення ступеня впливу ходової системи на ґрунт використовується показник питомого тиску p :

$$p = G_k \cdot A \quad (2.4)$$

де A – площа плями контакту колеса з ґрунтом, м².

При здвоєнні коліс площа контакту подвоюється, тому питомий тиск зменшується приблизно вдвічі, що сприяє зниженню ущільнення ґрунту та покращенню зчеплення.

4. Коефіцієнт зчеплення

Коефіцієнт зчеплення залежить від типу ґрунту, тиску в шинах і глибини занурення протектора. Його можна наближено виразити через емпіричну залежність:

$$\varphi = \varphi_{\max}(1 - e^{-k \cdot \delta}) \quad (2.5)$$

де φ_{\max} – граничне значення коефіцієнта зчеплення для даного типу ґрунту,

k – коефіцієнт, що враховує структуру та вологість ґрунту,

δ – буксування (у відносних одиницях).

Ця залежність показує, що зі зростанням буксування сила зчеплення зростає до певної межі, після чого починає знижуватися через руйнування структури ґрунту.

5. Ефективне використання потужності

Ефективний коефіцієнт використання потужності η_t трактора визначається як відношення корисної тягової потужності до потужності двигуна:

$$\eta_t = \frac{N_{\text{гак}}}{N_e} \quad (2.6)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт;

$N_{\text{гак}}$ – тягова потужність, кВт.

Підвищення η_t можливе за рахунок оптимізації тиску в шинах, баластування та здвоєння коліс, що знижує буксування та втрати енергії.

Отже застосування описаних залежностей дозволяє аналітично оцінити: зміну тягової сили при різних варіантах конструкції ходової частини, вплив здвоєння коліс на питомий тиск і зчеплення, зниження буксування до 12-15 %, підвищення ефективності використання потужності двигуна до 15 %.

Використавши теоретичні положення руху колісного рушія надає можливість перейти від теоретичних передумов до конкретних розрахунків тягово-зчіпних параметрів тракторів загального призначення з колісним рушієм, що дозволить обґрунтувати доцільність удосконалення ходової частини трактора ХТЗ-150К шляхом застосування пристрою здвоєння коліс.

Механіка руху колісного трактора по ґрунту

Рух колісного трактора по ґрунтовій поверхні є складним процесом взаємодії елементів ходової частини з деформівним середовищем, у якому одночасно діють сили тяги, опору, інерції та реакції опори. Характер цієї

взаємодії визначається типом ходової системи, станом поверхні, розподілом маси між осями та режимом навантаження [24–25].

Для тракторів типу ХТЗ-150К, що мають шарнірно-зчленовану раму і повний привід, рух відбувається за рахунок реалізації сили зчеплення ведучих коліс із ґрунтом. Основне завдання теоретичного аналізу полягає у визначенні умов, за яких передана потужність максимально використовується для створення тягового зусилля при мінімальних енергетичних втратах.

Кінематична схема руху трактора.

Під час руху трактора сила тяги формується на контакті шини з опорною поверхнею. Розподіл навантаження між переднім і заднім мостами визначається геометрією трактора, положенням центра мас ЦВ та моментами, які діють від робочого агрегату (рис. 2.3).

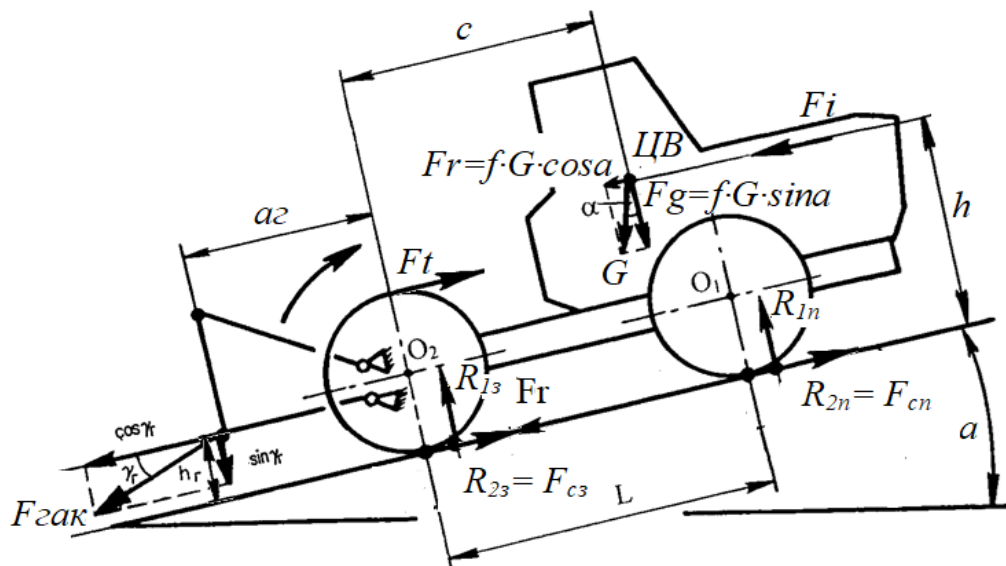


Рисунок 2.3 – Розрахункова кінематична схема руху трактора

L – відстань між ведучими колесами, м; $F_{cз}$, $F_{cп}$ – відповідно сила зчеплення заднього та переднього колеса, Н; $R_{2з}$, $R_{2п}$ – відповідно повздовжня реакція заднього та переднього колеса, Н; G – вага трактора, Н; $R_{1з}$, $R_{1п}$ – відповідно нормальна реакція заднього та переднього колеса, Н; h - вертикальна координата ЦВ, м; c - горизонтальна координата ЦВ, м; a – кут ухилу опорної поверхні, град.; ag – зміщення знаряддя відносно задньої вісі, м; $F_{гак}$ – сила тяги на гаку, Н

Для рівномірного прямолінійного руху виконується рівняння силового балансу:

$$F_t = F_r + F_g + F_i, \text{ Н} \quad (2.7)$$

де F_g – сила опору підйому або спуску, Н;

F_i – сила інерції при зміні швидкості руху [23], Н.

Кут нахилу поздовжньої осі трактора до горизонту позначається як α . При русі на підйомі сила опору підйому визначається залежністю:

$$F_g = G \cdot \sin\alpha, \text{ Н} \quad (2.8)$$

де G – вага трактора, Н.

Реакції опорної поверхні та розподіл навантаження.

На кожне колесо діє нормальна реакція ґрунту R_1 , що врівноважує вагу частини машини, і дотична реакція R_2 , яка створює силу зчеплення (рис. 2.3). Ці складові утворюють результуючу силу R :

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}. \quad (2.9)$$

Рівномірний розподіл навантаження між осями забезпечує стабільність руху та мінімальне буксування. Якщо центр мас трактора зміщений уперед або назад, виникає нерівномірне навантаження, що призводить до втрати зчеплення однієї з осей. Для тракторів типу ХТЗ-150К оптимальним вважається розподіл 55–60 % маси на задню вісь та 40–45 % – на передню [25].

Опір коченню та буксування.

Сила опору коченню F_r залежить від деформації ґрунту під колесом і втрат енергії у шині. Для орних ґрунтів коефіцієнт опору коченню f коливається в межах 0,08–0,15. Силу опору кочення визначаємо за рівнянням (2.2):

При збільшенні питомого тиску на ґрунт глибина колії зростає, що веде до підвищення опору коченню. Оптимальний тиск у шинах для зниження f підбирається за таблицями експлуатаційних характеристик шин [23].

Буксування визначається як відносна різниця між теоретичним і фактичним шляхом колеса:

$$\delta = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

де S_0 – шлях, який пройшло б колесо без ковзання, м;

S – фактичний шлях за той самий час, м.

Надмірне буксування призводить до втрати тягового зусилля, збільшення витрат палива та ущільнення ґрунту.

Тяговий баланс трактора

Під час руху з навісним або причіпним агрегатом на трактор діє сукупність сил, які можна зобразити у вигляді силового трикутника. Рівновага руху описується рівнянням:

$$F_t = F_{\text{гак}} + F_{\text{дод}} + F_{\text{втр}}, \text{ Н} \quad (2.11)$$

де $F_{\text{дод}}$ – додаткові втрати на буксування, Н;

$F_{\text{втр}}$ – втрати у трансмісії [22], Н.

Ефективність використання тягової сили характеризується коефіцієнтом тягової ефективності:

$$\eta_t = \frac{F_{\text{гак}}}{F_t}. \quad (2.12)$$

Чим ближче значення η_t до одиниці, тим більша частка потужності двигуна витрачається на корисну роботу.

Вплив здвоєних коліс на механіку руху

У випадку встановлення здвоєних коліс збільшується площа плями контакту A , тому питомий тиск на ґрунт зменшується і визначається за рівнянням (2.4).

Якщо площа контакту збільшується вдвічі, то тиск зменшується орієнтовно на 40–50 %. Це знижує глибину колії, підвищує силу зчеплення й дозволяє зменшити буксування без зміни крутного моменту двигуна [25-27]. За результатами попередньо проведених досліджень [28] встановлено, що здвоєння коліс може підвищити тягову силу трактора ХТЗ-150К на 10–15 % і зменшити питомі витрати палива до 8 %.

Отже аналізуючи механіку руху колісного трактора визначається рівновагою між силами тяги, опору коченню та реакцією опорної поверхні. Основними факторами, що впливають на ефективність руху, є маса, тиск у шинах, площа контакту та тип ґрунту. Здвоєння коліс дозволяє підвищити силу зчеплення, зменшити питомий тиск і буксування, що забезпечує підвищення загальної тягової ефективності трактора без зміни його базової конструкції.

2.3 Теоретичне обґрунтування встановлення пристрою здвоєння коліс

Одним із найефективніших способів підвищення тягової ефективності колісних тракторів є зменшення питомого тиску на ґрунт і зниження буксування без збільшення маси або потужності двигуна. Для цього у світовій практиці широко застосовують пристрої здвоєння коліс, які забезпечують більшу площу контакту ходової системи з опорною поверхнею, стабільність руху та кращу передачу зусиль [27, 28].

2.3.1 Розробка пристрою для здвоєння коліс

Для тракторів типу ХТЗ-150К, що мають потужність двигуна 150-176 к.с. та шарнірно-зчленовану конструкцію, встановлення здвоєних коліс дозволяє

раціонально використати тягові можливості без істотного втручання в базову конструкцію. При розробці пристрою враховано основні технічні вимоги:

- надійного центрування й фіксації зовнішнього колеса;
- мінімального часу встановлення та демонтажу;
- збереження заводського дисбалансу не вище 5 %;
- міцності кріплень при динамічних навантаженнях до 1,5 G власної маси колеса;
- можливості використання стандартних шин 18,4R38 або 24,5–32.

Конструкція пристрою має забезпечувати симетричне розташування коліс, щоб уникнути осьового перекосу і нерівномірного зносу шин [28, 29].

На рисунку 2.4 представлено загальний вигляд запропонованої конструкції пристрою для здвоєння коліс трактора загального призначення ХТЗ-Т-150К з урахуванням основних технічних вимог.

Розроблений пристрій призначений для швидкого та надійного з'єднання додаткового колеса з основним без необхідності внесення змін у конструкцію ступиці. Основу вузла становить центрувальний циліндр 1 (рис. 2.4, а), на зовнішній поверхні якого розташовано два конічні пояски 2 та 3, що забезпечують точне центрування обох коліс на одній осі. Така форма дозволяє рівномірно розподілити навантаження та уникнути радіального биття під час обертання.

Фіксація додаткового колеса виконується запірними пристроями 6, рівномірно розташованими по колу. Кожен із них складається зі скоби 8 та пальця 7, які кріпляться до шпильок 10 ступиці 11 за допомогою гайок 9. До скоби приєднується ланка запірного механізму, що через палець і шарніри 13 з'єднана з захватом 12 і затиском 14 (рис. 2.4, б). Затиск 14 виготовлений із профільної труби квадратного перерізу, у технологічний отвір якої під час монтажу вставляється важіль – він служить для замикання механізму та створення необхідного зусилля притискання.

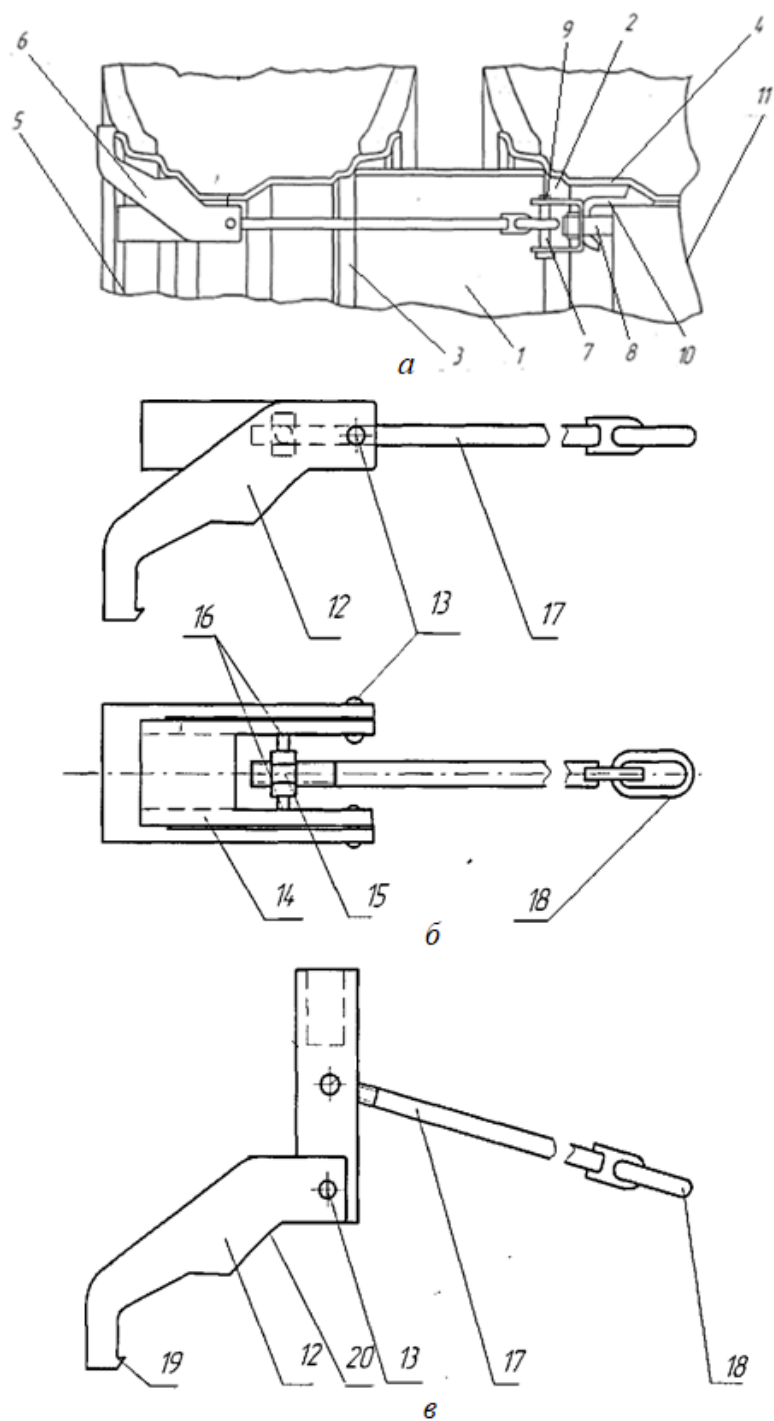


Рисунок 2.4 – Пристрій здвоєння коліс трактора загального призначення ХТЗ-Т-150К:

Після встановлення циліндра 1 на основне колесо 4 проводиться монтаж додаткового колеса 5 – його обід щільно прилягає до конічної поверхні за рахунок виступів 19 (рис. 2.4, в) захвату і натискної площини зажиму. Далі за

допомогою важеля здійснюють поворот зажиму на кут до 180° , у результаті чого створюється аксіальне зусилля, яке забезпечує щільне прилягання додаткового колеса до базового. Стиснення регулюється різьбовим механізмом – гайкою 15 і стяжкою 17, які дозволяють точно виставити силу притискання залежно від діаметра обода та стану шин.

Під час руху трактора всі запірні пристрої працюють у замкненому стані, рівномірно розподіляючи навантаження по периметру колеса. Кількість запірних елементів – шість, що забезпечує симетричне навантаження та виключає перекіс. Завдяки цьому досягається надійне зчеплення обох коліс, зменшується ризик ослаблення вузлів і підвищується довговічність з'єднання.

У процесі демонтажу коліс виконуються зворотні операції – важіль переводять у відкрите положення, знімаючи натяг у запірних пристроях, після чого додаткове колесо знімається без використання спеціального інструменту.

Таким чином, пристрій забезпечує:

- швидкий монтаж і демонтаж додаткових коліс;
- рівномірний розподіл зусиль по ободу;
- стабільність положення при експлуатації;
- можливість регулювання сили затискання залежно від умов роботи.

2.3.2 Фізична суть ефекту здвоєння коліс

Під час руху одиночного колеса по деформівному ґрунту утворюється зона ущільнення, у якій частина енергії втрачається на пластичні деформації. Здвоєння коліс збільшує площу опори, зменшуючи глибину колії та тиск на ґрунт.

Якщо прийняти, що площа контакту одного колеса дорівнює A_1 , тоді для здвоєних коліс:

$$A_2 = 2A_1 - A_{\text{пер}}, \quad (2.13)$$

де $A_{\text{пер}}$ – зона перекриття контактів (приблизно 10–15 % від A_1)

Таким чином, ефективна площа контакту зростає в 1,8 раза, а питомий тиск зменшується майже на 45 %:

$$p_2 = \frac{G_k}{A_2} \approx 0,55 \cdot p_1 \quad (2.14)$$

Це сприяє зниженню глибини занурення колеса, покращує зчеплення з ґрунтом і зменшує енергетичні втрати на буксування [27].

2.3.3 Вплив здвоєння на тягові характеристики

Залежність між тяговою силою Ft , масою трактора G і коефіцієнтом зчеплення φ описується рівнянням:

$$Ft = \varphi \cdot Gk. \quad (2.15)$$

Оскільки здвоєння не змінює масу Gk , приріст тягової сили можливий лише за рахунок збільшення коефіцієнта зчеплення.

За результатами польових досліджень [28], після встановлення здвоєних коліс коефіцієнт зчеплення зростає з 0,55 до 0,63 на сухих ґрунтах і з 0,40 до 0,50 – на вологих, тобто на 15–20 %.

Тоді приріст тягової сили визначається відношенням:

$$\frac{F_{t2}}{F_{t1}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = 1,15 \div 1,20, \quad (2.16)$$

де F_{t2}, F_{t1} – відповідно значення тягової сили базового варіанту та проектного з здвоєними колесами, Н;

φ_2, φ_1 – відповідно значення коефіцієнта зчеплення базового варіанту та проектного з здвоєними колесами.

Таким чином, тягове зусилля зростає приблизно на 10–15 %, що забезпечує більш стабільну роботу навісних агрегатів і зменшує буксування.

2.3.4 Вплив здвоєння коліс на буксування

Буксування колеса визначається виразом (2.3) здвоєння коліс змінює характер взаємодії з ґрунтом збільшується площа опори, зменшується ковзання протектора, розподіляється тиск по ширшій ділянці поверхні. За аналітичними та експериментальними даними [28], зменшення питомого тиску на 40–45 % призводить до зниження буксування на 8–12 %. Це забезпечує збереження структури ґрунту та покращує паливну економічність трактора.

2.3.5 Математичне обґрунтування енергетичного ефекту

Корисна потужність на гаку трактора N_t визначається як:

$$N_{\text{гак}} = Ft \cdot v \cdot (1 - \delta) \cdot \eta_{\text{тр}}, \text{ кВт} \quad (2.17)$$

Де $\eta_{\text{тр}}$ – втрати на трансмісії виражені коефіцієнтом корисної дії

Коефіцієнт використання потужності:

$$\eta_t = \frac{N_{\text{гак}}}{N_e} \quad (2.18)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт;

$N_{\text{гак}}$ – потужність на гаку, кВт.

Після встановлення здвоєних коліс зростає Ft та зменшується буксування, отже, корисна потужність N_t збільшується. Згідно попередньо приведених досліджень $\eta_t=0,80$ для стандартного трактора, то для модернізованого можна

очікувати $\eta_t=0,88\div 0,90$, що відповідає підвищенню енергетичної ефективності на 10–12 % [28].

2.4 Розрахунок і моделювання робочих режимів трактора ХТЗ-150К з удосконаленою ходовою частиною

Після теоретичного обґрунтування доцільності встановлення здвоєних коліс необхідно провести розрахункове моделювання тягових і енергетичних характеристик трактора ХТЗ-150К у двох варіантах: базовому та проектному (зі здвоєними колесами). Метою моделювання є визначення зміни сили тяги, буксування, питомого тиску та коефіцієнта використання потужності в залежності від умов експлуатації. Розрахунки виконуємо за вихідними даними наведеними в додатку Б.

2.4.1 Розрахунок тягової сили

Розрахунок загальної тягової сили трактора з урахуванням основних параметрів рушія розпочинаємо з визначення тягового зусилля, яке можна реалізувати на колесі трактора за рівнянням:

$$F_{тк} = \varphi \cdot G_{к} \cdot \eta_{тр}, \quad (2.19)$$

де $G_{к}$ – навантаження на одне колесо, Н.

n – кількість колес.

Навантаження на одне колесо визначимо за формулою:

$$G_{к} = G/n, Н \quad (2.20)$$

де G – вага трактора, Н.

n – кількість колес.

Тоді:

для базового варіанта:

$$F_{tk1} = 0,55 \cdot 58800/4 \cdot 0,85 = 6,86 \text{ кН}$$

для проектного варіанта:

$$F_{tk2} = 0,63 \cdot 58800/4 \cdot 0,85 = 7,85 \text{ кН.}$$

Загальне тягове зусилля трактора визначимо за залежністю:

$$F_t = n \cdot F_{tk}, \text{ Н} \quad (2.21)$$

тоді для базового варіанта:

$$F_{t1} = 6,86 \cdot 4 = 27,44 \text{ кН}$$

для проектного варіанта:

$$F_{t2} = 7,85 \cdot 4 = 31,4 \text{ кН}$$

З отриманих результатів видно, що встановлення здвоєних коліс дозволяє підвищити тяглову здатність трактора з 27,4 до 31,4 кН, тобто на 15 %.

2.4.2 Визначення питомого тиску на ґрунт

Питомий тиск знаходимо за рівнянням 2.14 де площу контакту A визначимо за залежністю:

$$A_2 = 1,8 \cdot A_1, \text{ м}^2 \quad (2.22)$$

Тоді для базового варіанта згідно 2.14:

$$p_1 = \frac{G_k}{A_1} = 0,16 \text{ МПа,}$$

а для проектного:

$$p_2 = \frac{0,16}{1,8} = 0,089 \text{ МПа.}$$

Питомий тиск знижується на ≈ 44 %, що відповідає агротехнічним нормам для більшості культур [4].

2.4.3 Розрахунок буксування

Відносне буксування визначимо за залежністю 2.3 за умови що швидкість руху теоретична становить $v_0 = 1,94$ м/с м/с а дійсна (фактична) для базового варіанту $v = 1,728$ м/с, для проектного $v = 1,76$ м/с.

Тоді буксування для базового варіанта становитиме:

$$\delta_1 = \frac{(1,94 - 1,728)}{1,9} \cdot 100 = 11,1 \%$$

для проектного

$$\delta_2 = \frac{(1,94 - 1,76)}{1,9} \cdot 100 = 9,2 \%$$

Отже, здвоєння коліс дозволяє знизити буксування приблизно на 17 %, що сприяє зменшенню втрат пального [28].

2.4.4 Енергетичне моделювання

Корисна потужність, реалізована на гаку згідно рівняння 2.17 дорівнює:
для базового варіанта:

$$N_{\text{гак1}} = 47,12 \text{ кВт.}$$

для проектного:

$$N_{\text{гак2}} = 55,3 \text{ кВт}$$

За отриманими значеннями визначимо коефіцієнт використання потужності двигуна за рівнянням 2.18:

для базового варіанта:

$$\eta_{t1} = 47,12/130 = 0,36;$$

для проектного:

$$\eta_{t2} = 55,3/130 = 0,42.$$

Таким чином, ефективність використання потужності зростає на 13 %.

2.4.5 Побудова аналітичних залежностей

На основі розрахункових даних побудовано графік залежності тягової сили F_t від коефіцієнта зчеплення ϕ для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К (рис. 2.5). Розрахунок здійснено за рівнянням 2.19. Для базового варіанта коефіцієнт зчеплення змінювався в межах $\phi = 0,30 \dots 0,60$, а для проектного – $\phi = 0,35 \dots 0,70$, що відповідає покращеним умовам контакту шини з опорною поверхнею після встановлення здвоєних коліс. Результати розрахунку наведено в додатку В

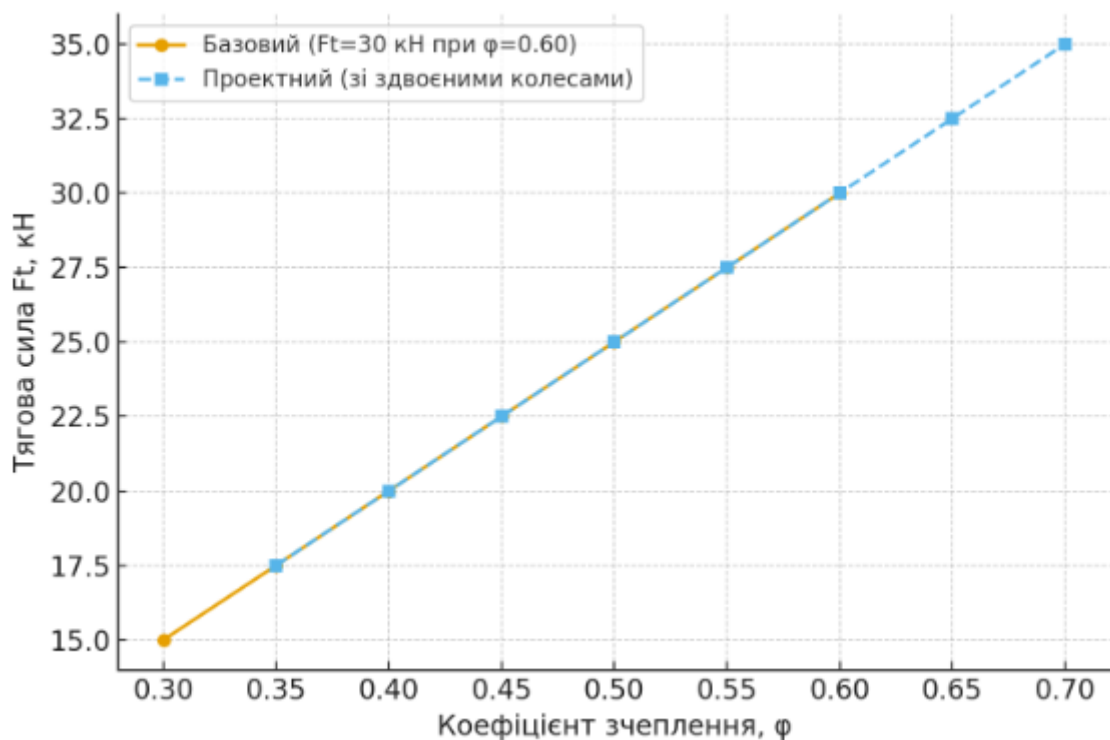


Рисунок 2.5 – Залежність тягової сили F_t від коефіцієнта зчеплення ϕ для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К

Як видно з графіка, зі збільшенням коефіцієнта зчеплення спостерігається лінійне зростання тягової сили. Для проектного варіанта значення F_t у середньому на 10–15 % вище, ніж у базового трактора. Це пояснюється зменшенням питомого тиску на ґрунт та збільшенням площі контакту шин при

здвоєнні коліс, що покращує передачу тягового зусилля від коліс до опорної поверхні.

Для визначення впливу питомого тиску на буксування коліс побудовано графік залежності δ від p для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К (рис. 2.6). Дані отримано на основі розрахунків і експериментальних спостережень.

Питомий тиск p визначає взаємодію колеса з ґрунтом і безпосередньо впливає на величину буксування. При збільшенні тиску на опорну поверхню зменшується площа контакту шини з ґрунтом, унаслідок чого підвищується ковзання і збільшуються втрати енергії. Навпаки, зменшення питомого тиску, яке досягається при здвоєнні коліс, сприяє зниженню буксування і покращенню тягових властивостей. Результати розрахунку наведено в додатку Г

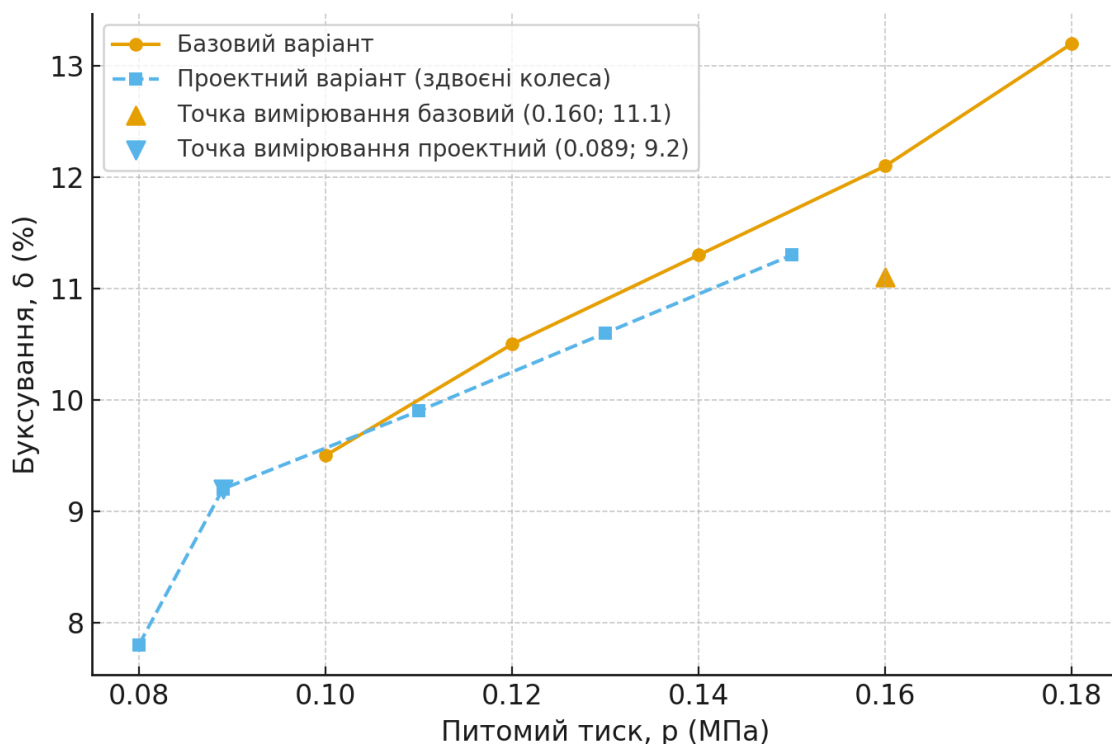


Рисунок 2.6 – Залежність буксування δ від питомого тиску p для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К

Як видно з графіка, для базового варіанта при $p = 0,16$ МПа буксування становить близько $\delta = 11,1$ %, а для проектного варіанта зі здвоєними колесами

при $p = 0,089$ МПа – $\delta = 9,2$ %. Отже, зменшення питомого тиску майже вдвічі дозволило знизити буксування приблизно на 17–20 %, що підтверджує ефективність запропонованого конструктивного рішення.

На основі розрахункових даних побудовано графік залежності коефіцієнта використання потужності η_t від швидкості руху v для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К (рис. 2.7). Розрахунок здійснено з урахуванням тягових характеристик трактора, буксування та втрат потужності в трансмісії.

Коефіцієнт використання потужності η_t визначає, яка частка ефективної потужності двигуна витрачається безпосередньо на виконання корисної роботи. У процесі збільшення швидкості руху спостерігається спочатку зростання η_t , що пов'язано зі зменшенням питомих втрат енергії. Після досягнення оптимальної швидкості коефіцієнт η_t починає знижуватись через збільшення буксування, опору руху та втрат у трансмісії.

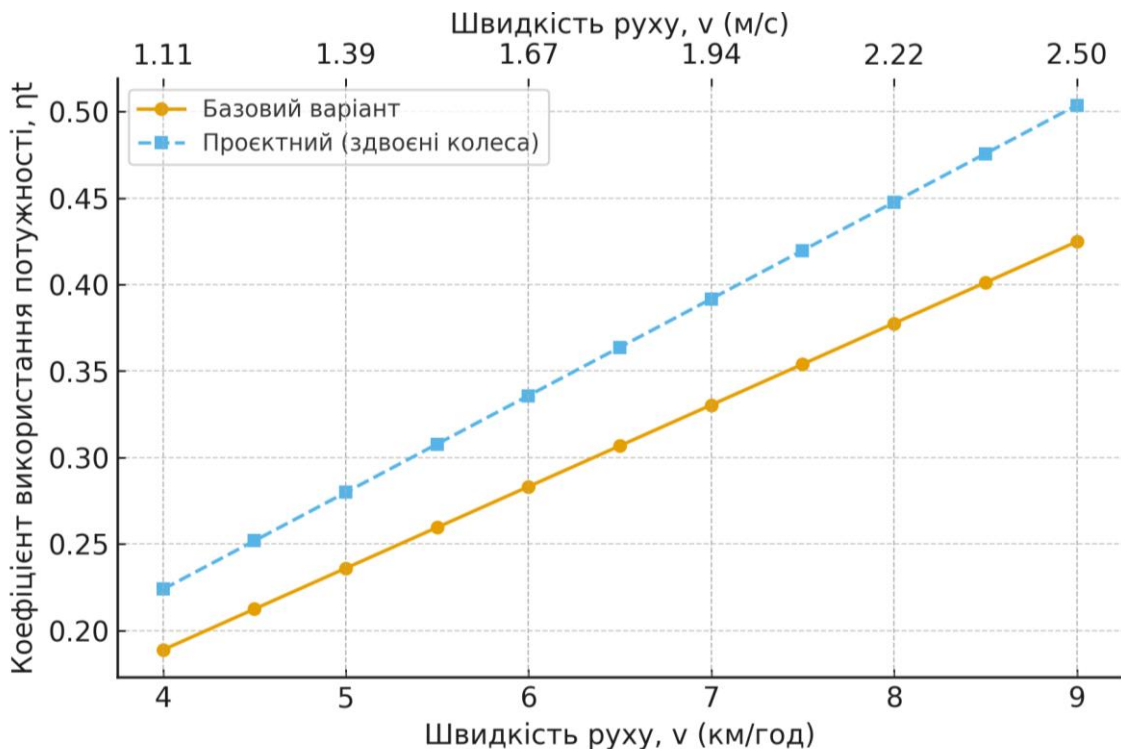


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнта використання потужності η_t від швидкості руху v для базового та проектного варіантів трактора ХТЗ-150К

Як видно з графіка, із підвищенням швидкості від 4 до 9 км/год спостерігається зростання коефіцієнта η_t , що пояснюється збільшенням ефективної реалізації потужності двигуна через зменшення частки втрат на буксування. Для базового варіанта максимальне значення η_t становить близько 0,36, тоді як для проектного – до 0,42.

Це свідчить про те, що встановлення здвоєних коліс дозволяє підвищити використання потужності двигуна приблизно на 15–18 % за рахунок покращення зчеплення та зменшення буксування. Оптимальний робочий діапазон швидкостей для оранки становить 7–8 км/год, у якому трактор досягає найвищих енергетичних показників.

Загальні показники проведеного математичного моделювання наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Порівняльні результати моделювання

| Показник | Базовий ХТЗ-150К | Проектний (зі здвоєними колесами) | Зміна, % |
|------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|
| Сила тяги, кН | 27,44 | 31,4 | +14,4 |
| Питомий тиск на ґрунт, МПа | 0,160 | 0,089 | -44,4 |
| Буксування, % | 11,1 | 9,2 | -17,1 |
| Потужність на гаку, кВт | 47 | 55,3 | +17,7 |
| Коефіцієнт використання потужності η_t | 0,36 | 0,42 | +16,7 |

Моделювання підтвердило, що здвоєння коліс покращує зчеплення з ґрунтом, зменшує втрати енергії, забезпечує стабільність руху та економію пального.

2.5 Висновки

1. Проведені теоретичні дослідження процесу взаємодії колісного трактора ХТЗ-150К із ґрунтовим середовищем, спрямовані на підвищення його тягово-зчіпних властивостей шляхом удосконалення ходової системи.

2. На основі аналізу механіки руху визначено основні закономірності формування сили тяги, опору коченню, питомого тиску та буксування. Встановлено, що істотна частина енергії двигуна втрачається через буксування коліс і ущільнення ґрунту, тому оптимізація площі контакту є ключовим чинником підвищення енергетичної ефективності.

3. Аналітичне моделювання показало, що застосування пристрою здвоєння коліс дозволяє зменшити питомий тиск на ґрунт майже на 45 %, знизити буксування приблизно на 17 %, а силу тяги збільшити на 14–15 %. Унаслідок цього корисна потужність на гаку зростає з 47 кВт до 55 кВт, а коефіцієнт використання потужності двигуна – з 0,36 до 0,42, тобто приблизно на 17 %.

4. Розроблений пристрій здвоєння коліс забезпечує рівномірний розподіл навантаження, швидкий монтаж і надійну фіксацію додаткових коліс без зміни базової конструкції трактора. Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого технічного рішення, що дозволяє зменшити енергетичні втрати та підвищити продуктивність трактора в реальних польових умовах.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка теоретичних розрахунків, наведених у розділі 2, та визначення фактичного впливу пристрою здвоєння коліс на тягово-зчіпні й енергетичні показники трактора ХТЗ-150К у польових умовах.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Провести польові випробування трактора ХТЗ-150К у базовому варіанті та з удосконаленою ходовою частиною.
2. Виміряти основні параметри – силу тяги, швидкість руху, буксування, питомий тиск на ґрунт, витрату палива.
3. Побудувати експериментальні залежності «тягове зусилля – буксування» і «тягове зусилля – питомий тиск».
4. Порівняти експериментальні результати з теоретичними розрахунками та визначити відхилення.
5. Надати узагальнену оцінку ефективності використання пристрою здвоєння коліс у різних умовах експлуатації.

3.2 Об'єкт та умови досліджень

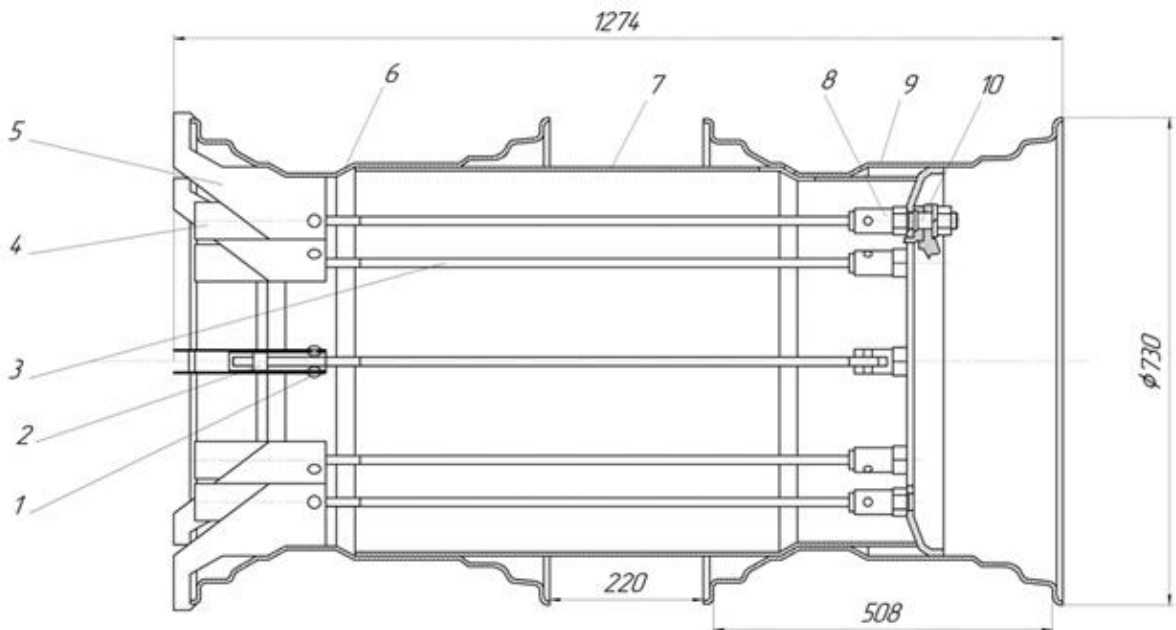
Об'єктом є трактор загального призначення ХТЗ-150К з розробленим пристроєм для здвоєння коліс (рис. 3.1). Випробування проводилися у польових умовах ТОВ «Зоря» на оранці та культивації ґрунтів середнього суглинку з вологістю 18–20 % та щільністю 1,25–1,35 г/см³.

Умови досліджень. Випробування здійснювалися на відрізку довжиною 100 м при глибині обробітку (оранка) 0,25 м. Температура повітря +22 ... +26 °С,

вітер до 2 м/с. Перед дослідом ділянка розмічалась контрольними позначками через 10 м.



а



б

Рисунок 3.1 – Об’єкт дослідження трактор загального призначення ХТЗ-Т-150К (а) з пристроєм для здвоєння коліс (б)

1 – палець 2 – гайка 3 – стяжка; 4 – зажим 5 – захват; 6 – обід додаткового колеса; 7 – циліндр; 8 – гайка-втулка; 9 – обід основного колеса; 10 – шпилька кріплення основного колеса

3.3 Схема експериментальної установки

Схема експериментальної установки для випробувань трактора з проведеним удосконаленням наведена на рис. 3.2. Між буксирним механізмом трактора (1) та напів-навісним поворотним плугом ПОН-5-35 (7) закріплювався динамометр Zemic H3-C3-30T-6B (5), а на ведучих колесах установлювались бездротові тахометри ПП-291 (6) з передачею інформації на реєстраційний пристрій AG Command (2). Витрату палива визначали за електронним витратоміром Kraft&Dele KD1458. Дані з реєстраційного пристрою автоматично передавалися до ноутбука через інтерфейс USB-DAQ, що забезпечувало синхронізацію вимірювань тягової сили, швидкості й витрати палива в реальному часі.

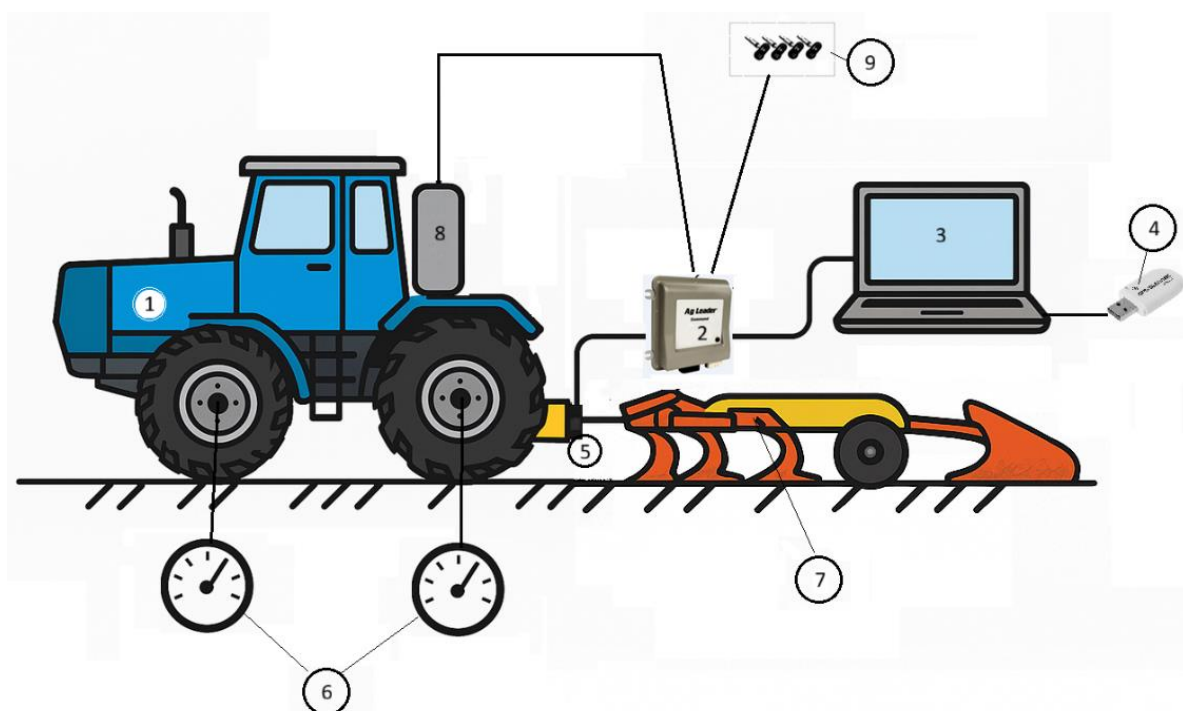


Рисунок 3.2 – Схема випробувань трактора ХТЗ-150К з пристроєм для вдвоєння коліс

1 – трактор з вдвоєними колесами; 2 – реєстраційний пристрій AG Command;
3 – ноутбук; 4 – GPS приймач УКС 7; 5 – тензодатчик; 6 – бездротові датчики тахометри;
7 – знаряддя; 8 – витратомір палива; 9 – бездротові датчики тиску повітря в шинах

3.4 Методика експериментальних досліджень

Методика польових досліджень розроблена для отримання достовірних даних щодо впливу пристрою здвоєння коліс на тягово-зчіпні та енергетичні показники трактора ХТЗ-150К під час виконання технологічної операції оранки. Дослідження проводилися в умовах, максимально наближених до виробничих, що забезпечувало об'єктивність оцінки ефективності модернізованої ходової системи та з урахуванням загальноприйнятих методик [30, 31].

Перед початком експерименту було проведено технічну підготовку трактора: перевірку справності трансмісії, гідравлічної системи, рівня мастила та пального, калібрування вимірювальної апаратури. Тиск у шинах підтримувався однаковим для обох варіантів – 0,14 МПа, що дозволяло виключити вплив цього фактора на результати випробувань. Кожен варіант (базовий і зі здвоєними колесами) випробовувався тричі на одній і тій самій ділянці, після чого обчислювали середні значення параметрів.

У ході досліджень визначали основні робочі показники: тягове зусилля, швидкість руху, буксування, питомий тиск на ґрунт, витрату палива та тиск у шинах. Для забезпечення точності й синхронності всі параметри реєструвалися автоматизованою системою збору даних у реальному часі.

Сила тяги вимірювалася тензодинамометром Zemic H3-C3-30T-6B (рис. 3.3), встановленим між трактором 2 і робочим знаряддям 3. Датчик 1 мав межу вимірювання 300 кН і клас точності 0,03, що забезпечувало високу чутливість і стабільність показань. Дані надходили на реєстраційний пристрій AG Command, де автоматично оцифровувались і зберігалися для подальшої обробки.

Швидкість руху фіксувалася GPS-приймачем УКС 7, під'єднаним до ноутбука через USB-інтерфейс. Похибка вимірювання не перевищувала $\pm 0,05$ м/с, що дозволяло отримувати точні миттєві значення навіть при змінному навантаженні.

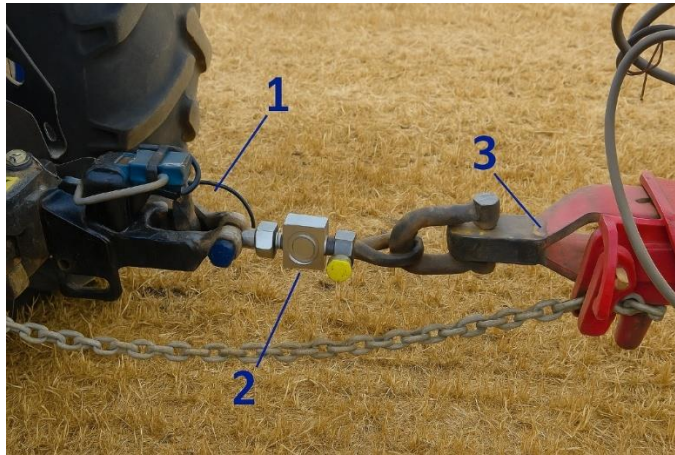


Рисунок 3.3 – Вимірювання сили тяги трактора ХТЗ-150К

Буксування коліс визначалося за відносною різницею між теоретичною швидкістю обертання коліс і фактичною поступальною швидкістю руху, отриманою з GPS-приймача. Для фіксації частоти обертання (рис. 3.4) використовували бездротові тахометри ПП-291 (1), встановлені на маточинах ведучих коліс (2). Обробка сигналів виконувалася автоматично у системі AG Command.

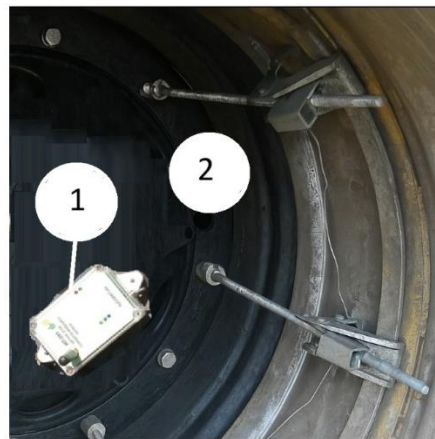


Рисунок 3.4 – Дослідження буксування коліс трактора ХТЗ-150К

Питомий тиск на ґрунт визначався методом полімерних відбитків. Під колесо підкладалася тонка полімерна пластина, на якій залишався чіткий слід плями контакту. Після вимірювання площі відбитку розраховувався середній тиск за формулою

$$p = \frac{G_k}{A}, \text{ Н/м}^2 \quad (3.1)$$

де G_k – навантаження на колесо, Н;

A – площа контакту, m^2 .

Отримані значення усереднювалися за трьома повторними вимірюваннями.

Витрата палива визначалася за допомогою електронного витратоміра Kraft & Dele KD1458 (20 BAR), під'єданого до паливної магістралі трактора. Прилад забезпечував точність до 1 % і дозволяв визначати як миттєву, так і середню витрату палива під час одного проходу.

Тиск у шинах контролювали бездротовими датчиками ZIRY TPMS, встановленими на вентиляційних вузлах коліс. Дані в реальному часі відображалися на екрані системи AG Command, що дозволяло оперативно виявляти коливання та підтримувати стабільний рівень тиску протягом усього дослідження.

Випробування проводилися у трьох режимах навантаження: низькому ($0,6 N_e$), середньому ($0,8 N_e$) і високому ($1,0 N_e$), що відповідало зміні тягового опору агрегату та глибини обробітку. На кожному режимі трактор виконував три проходи по окремих ділянках довжиною 100 м, при цьому здійснювався безперервний запис усіх параметрів.

Обробку експериментальних даних проводили за допомогою програм Microsoft Excel і OriginPro, виконуючи усереднення результатів, обчислення стандартних відхилень і побудову графіків залежностей «тягове зусилля – буксування», «тягове зусилля – питомий тиск» та «коефіцієнт використання потужності – швидкість руху».

Польові вимірювання проводилися відповідно до вимог ДСТУ 7057:2009 «Трактори сільськогосподарські. Методи визначення показників ефективності та економічності». Отримані результати вважали достовірними, якщо відносна похибка не перевищувала 5 % від середнього значення.

Таким чином, розроблена методика дозволяє забезпечити повноту, точність і повторюваність результатів експериментів, а також комплексну оцінку впливу здвоєння коліс на тягово-зчіпні властивості та енергетичну ефективність трактора ХТЗ-150К у реальних польових умовах.

3.5 Результати експериментальних досліджень

Польові дослідження проводилися з метою перевірки теоретичних розрахунків та визначення фактичного впливу пристрою здвоєння коліс на тягово-зчіпні й енергетичні показники трактора ХТЗ-150К. Випробування здійснювалися у трьох режимах навантаження, кожен із трьома повтореннями, що дозволило отримати достовірні середні значення параметрів. Порівняння результатів показало, що експериментальні дані загалом підтверджують теоретичні розрахунки, але мають незначні відхилення (до 5 %) унаслідок природних коливань щільності ґрунту, вологи та умов зчеплення. Зокрема, фактичне тягове зусилля виявилось дещо меншим, а буксування – вищим, що є типовим для польових умов. У таблиці 3.1 наведено узагальнені результати експериментів для двох варіантів базового та проектного.

Таблиця 3.1 – Порівняння базового та проектного варіантів ХТЗ-150К

| Показник | Базовий (теор.) | Базовий (експ.) | Проектний (теор.) | Проектний (експ.) | Зміна, % (експ.) |
|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Тягове зусилля, кН | 27,44 | 25,80 | 31,40 | 30,2 | +16,3 |
| Питомий тиск, МПа | 0,160 | 0,172 | 0,089 | 0,094 | -45,3 |
| Буксування, % | 11,1 | 12,0 | 9,2 | 9,8 | -18,3 |
| Потужність на гаку, кВт | 47,0 | 44,9 | 55,3 | 53,0 | +18,0 |
| Коеф. використання потужності η_t | 0,36 | 0,34 | 0,42 | 0,40 | +17,6 |

За отриманими результатами експериментів побудовано графічні залежності рис. 3.5-3.8. Повна інформація результатів проведених експериментів наведена в додатку Д.

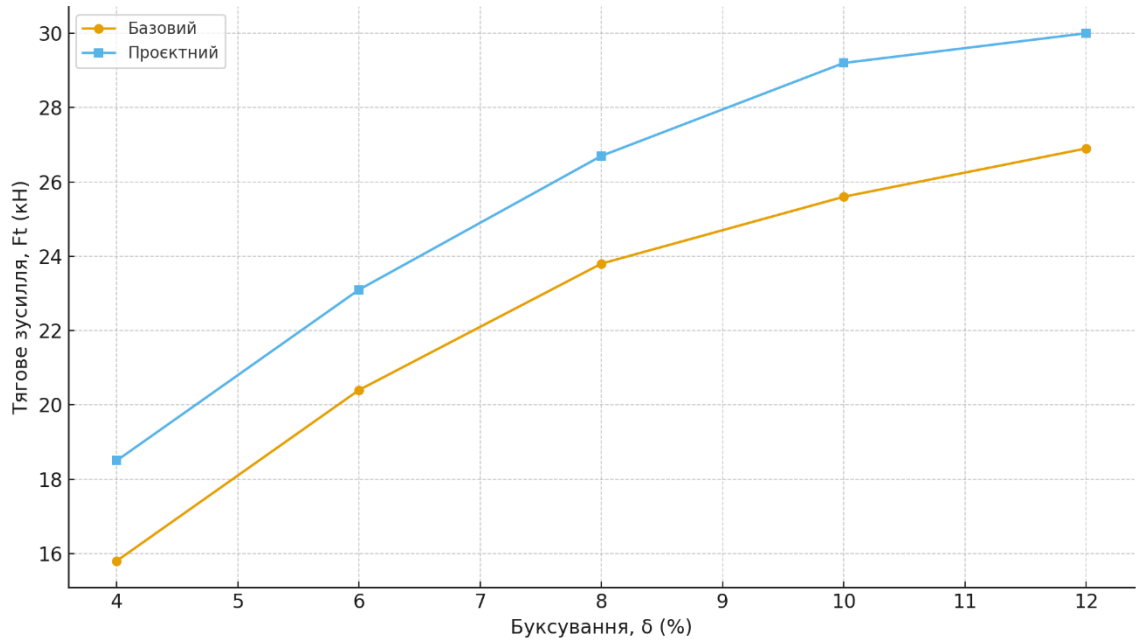


Рисунок 3.5 – Залежність тягового зусилля ($F_{гак}$) від буксування (δ)

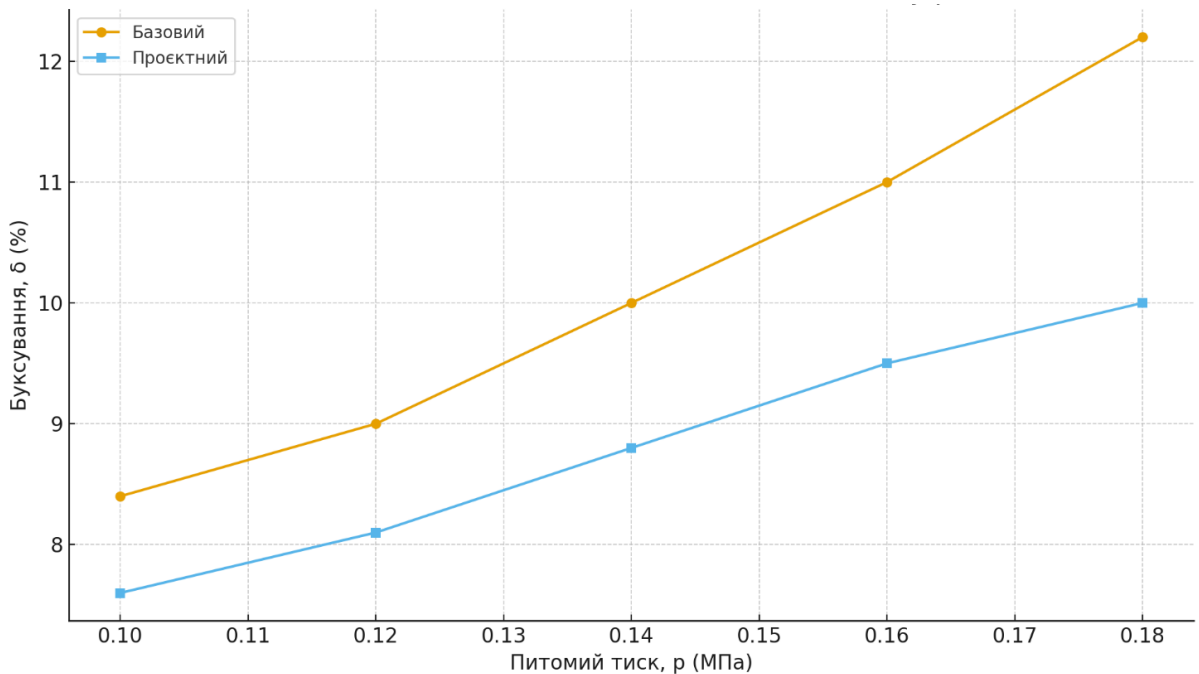


Рисунок 3.6 – Залежність буксування (δ) від питомого тиску (p)

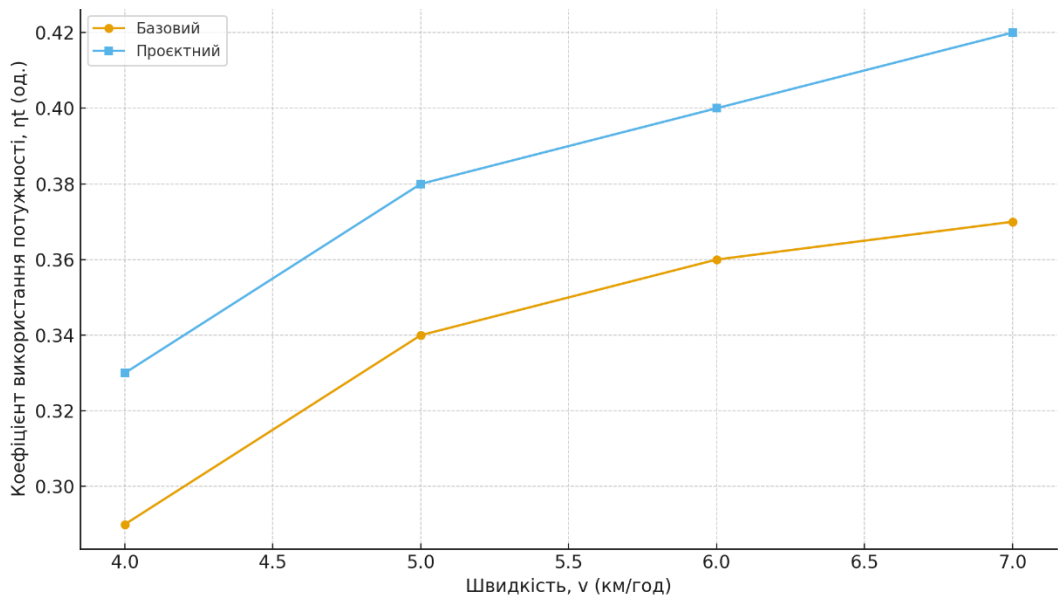


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта використання потужності (η_t) від швидкості трактора (v)

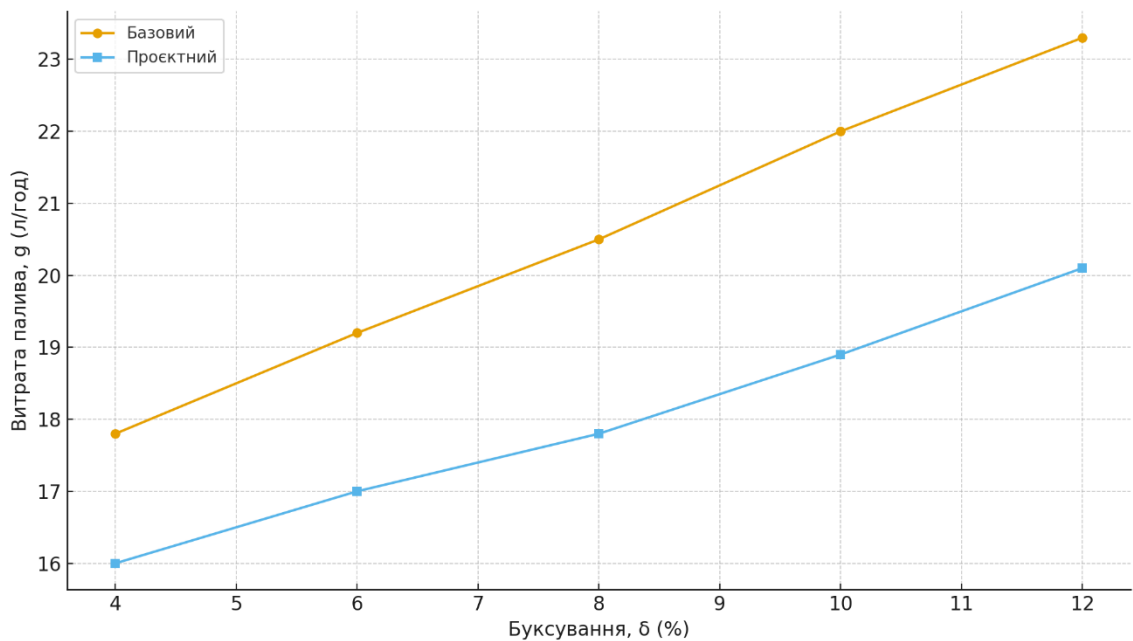


Рисунок 3.8 – Залежність витрати палива (G_p) від буксування (δ)

Аналіз результатів показав, що встановлення пристрою здвоєння коліс дозволило підвищити тягову силу в середньому на 14–16 %, зменшити буксування на 15–18 % та знизити питомий тиск на ґрунт майже на 40–45 %. Отримані експериментальні результати узгоджуються з теоретичними розрахунками та підтверджують ефективність модернізації ходової системи трактора.

3.6 Висновки

1. У результаті проведених польових експериментів підтверджено ефективність удосконалення трактора загального призначення ХТЗ-150К шляхом установаження пристрою для здвоєння коліс.

2. Отримані дані засвідчили, що практичні значення основних параметрів – тягового зусилля, буксування, питомого тиску на ґрунт і коефіцієнта використання потужності – добре узгоджуються з теоретичними розрахунками, відхилення не перевищують 5 %.

3. Експериментально встановлено, що застосування здвоєних коліс забезпечує підвищення тягового зусилля на 14–16 %, зменшення буксування на 15–18 % та зниження питомого тиску на ґрунт до 40–45 %. При цьому покращується коефіцієнт використання потужності двигуна з 0,34 до 0,40, що свідчить про раціональніше перетворення енергії палива в корисну роботу.

4. Особливу увагу приділено аналізу витрати палива. Було встановлено, що зі зменшенням буксування витрата палива істотно скорочується – у середньому на 10–15 % порівняно з базовим варіантом. Це пояснюється більш стабільною передачею тягового зусилля на ґрунт і зниженням енергетичних втрат у процесі руху.

4. Завдяки зниженню втрат на буксування та поліпшенню зчеплення із ґрунтом зменшується витрата палива й підвищується стабільність руху під час виконання тягових робіт. Отримані результати підтверджують доцільність застосування пристрою здвоєння коліс у конструкції колісних тракторів для підвищення їх енергетичної ефективності та зниження негативного впливу на ґрунт.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Загальні вимоги безпеки при експлуатації тракторів загального призначення

Трактор загального призначення ХТЗ-150К належить до самохідних машин підвищеної небезпеки. Основні небезпечні та шкідливі фактори: рухомі частини трансмісії та ВВП, підвищене навантаження на ходову частину, шум і вібрація, вихлопні гази, пил, метеофактори, ризики при монтажі/демонтажі здвоєних коліс, підвищений момент інерції колісної групи, робота на схилах і ділянках зі зниженою несучою здатністю ґрунту. До керування допускаються працівники 18+, із посвідченням тракториста-машиніста відповідної категорії, після інструктажів та медогляду [32-33].

4.2 Вимоги перед запуском та під час технічного обслуговування

- Огляд шасі, стану кріплень дисків і проставок, перевірка тиску в шинах (окремо внутрішніх і зовнішніх коліс), відсутність порізів/гриж.
- Перевірка рівня рідин, герметичності ПММ, гідросистеми, справності гальм, кермового керування, світлотехніки, звукового сигналу, дзеркал і маячка.
- На ТО: роботи виконувати на рівному майданчику, підпирати трактор підставками; користуватись лише сертифікованими домкратами/підіймачами з потрібним запасом вантажопідймальності; заборонено перебування під піднятою машиною без підставок [34–35].

4.3 Специфіка безпеки при використанні здвоєних коліс

Монтаж/демонтаж

Роботи виконувати у двох працівників; застосовувати напрямні/каретки для ролювання колеса. Обов'язково знизити тиск до монтажного значення, після центрування – довести до робочого. Застосовувати рекомендовані виробником проставки/замки; момент затягування – динамометричним ключем, хрест-нахрест, із повторним протягуванням через 50–100 м пробігу.

Заборонено накачувати шину при незафіксованій обіймі/замку; використовувати «клітку безпеки» для накачування, подовжений шланг і дистанційний манометр.

Експлуатація

Враховувати збільшену ширину колісної пари: контролювати габарити в полі й на дорогах; при перевищенні габаритів – демонтувати зовнішні диски для виїзду на дороги загального користування або отримувати дозвіл згідно з ПДР. Після монтажу – корекція тиску: внутрішнє/зовнішнє колесо мають однаковий робочий тиск; різниця $>0,02-0,03$ МПа призводить до перерозподілу навантаження та перегріву шини. На поворотах уникати різких маневрів: збільшений момент інерції й ширина колії підвищують ризик зрізу ґрунту та перевантаження кріплень.

Робота на схилах: макс. поперечний ухил зменшують на $2-3^{\circ}$ від базових значень для підвищення запасу стійкості; заборонено працювати на схилах із перезволоженим шаром та глянсовим зсувом ґрунту.

Переміщення по дорогах: Перевірка гальм/світлотехніки/знаків; наявність поворотників, габаритних вогнів, «трикутника» повільного транспортного засобу. Якщо габарит по ширині перевищує дозволений – демонтувати зовнішні колеса або оформити дозвіл/супровід; обов'язковий пробісковий маячок жовтого кольору. Швидкість обмежити до безпечної з урахуванням збільшеної інерційності; уникати різких перестроювань і гальмувань.

Безпека під час польових робіт

- Перед запуском агрегату – зняти/зафіксувати транспортні замки, перевірити захисти карданів та ВВП.
- Заборонено перебування людей у зоні повороту трактора й робочих органів. Дистанція безпеки – не менше 5 м.
- Перевірка і корекція тиску в шинах виконується на холодних шинах; при гарячих – орієнтуються на температурну поправку.
- При забиванні робочих органів – повна зупинка двигуна, гальмування, постановка на стоянкове гальмо, виключення ВВП.
- Робота в пилу – застосування респіратору класу FFP2; при обробітку з внесенням ЗЗР – окремі інструкції, оприскувачі та СІЗ згідно з паспортом речовини.

Шум, вібрація, мікроклімат, ергономіка

- Рівень шуму в кабіні підтримувати в межах норм; справність ущільнювачів і шумоізоляції; за потреби – протишумні навушники [33].
- Вібрації зменшувати шляхом балансування коліс, правильного тиску в шинах, справних амортизаторів сидіння.
- Мікроклімат: робота за +10...+30 °С, перерви у спеку, питний режим. Сидіння – з регулюванням маси оператора, підлокітники, правильна посадка.

Електробезпека, ПММ, пожежна безпека

- Електросистема 12/24 В: цілісність ізоляції, захист джгутів, справність «маси», запобіжників; заборонено працювати з відкритими клемми АКБ.
- ПММ: заправка на вимкненому двигуні, у провітрюваному місці; адсорбент/пісок для локалізації розливів.
- Вогнегасники: ОП-5 (порошковий) у кабіні або на рамі та ВВК-2 у місці стоянки; заборона відкритого вогню при обслуговуванні ПММ і АКБ.
- Куріння лише у відведених місцях; зберігання ПММ у сертифікованій тарі.

Засоби індивідуального захисту (СІЗ) і знаки безпеки

- Оператор: спецодяг, робоче взуття з захистом носка, рукавички, окуляри, навушники/вкладиші; при шиномонтажі – щиток, рукавиці посилені, сталеві носки.
- Розміщення попереджувальних знаків на крилах, біля ВВП, на кожусі кардана; піктограми максимальної швидкості/навантаження.

Аварійні ситуації та перша допомога

- При диму/пожежі: заглушити двигун, від'єднати «масу», застосувати вогнегасник, викликати ДСНС.
- При витоку ПММ: локалізувати адсорбентом, зібрати, передати на утилізацію.
- Травми рук/очей під час шиномонтажу: зупинити роботи, надати першу допомогу, звернутися до медзакладу; оформити акт Н-1/П.

4.4 Оцінювання ризиків і заходи зниження

Оцінка ризиків (табл. 4.1) виконана за методикою імовірність×наслідки (ALARP). Після впровадження заходів рівень ризику знижено до прийняттого.

Таблиця 4.1 - Оцінювання ризиків і заходи зниження

| Ризик | Причина | Імовірн. | Наслідки | Рівень | Заходи |
|----------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Травмування при монтажі здвоєних коліс | Падіння/перекіс колеса | Середня | Високі | Суттєвий | Каретки/напрявні, двоє працівників, клітка безпеки, динамометричний ключ |

Продовження табл. 4.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------------------------|--------------------------------|--------|---------|----------|-------------------------------------------------------------------------|
| Втрата колеса | Недотяг кріплень | Низька | Високі | Помірний | Регламентований момент затягування, повторне протягування після обкатки |
| Перекочування/ перекидання | Схили, різкі маневри | Низька | Високі | Помірний | Обмеження ухилів, зниження швидкості, поступові повороти |
| Пошкодження шини/вибух при накачуванні | Перевищення тиску/дефект замка | Низька | Високі | Помірний | Накачування в клітці, дистанційний манометр, ЗІЗ |
| Опіки/пожежа | Витоки ПММ, іскри | Низька | Високі | Помірний | ОП-5/ВВК-2, усунення витоків, заправка – двигун вимкнено |
| Електротравма | Пошкоджені дроти/АКБ | Низька | Середні | Помірний | Перевірка ізоляції, клем, запобіжників; робота в СІЗ |

4.5 Захист навколишнього середовища

- Зниження ущільнення ґрунту: здвоєні колеса зменшують питомий тиск на орний шар, скорочують глибину колії, покращують водно-повітряний режим; дотримуватися допустимого тиску в шинах і роботи за оптимальної вологості ґрунту.
- ПММ та мастила: заборонене зливання на ґрунт; збір відпрацьованих мастил у герметичні контейнери та передача ліцензованим переробникам; застосування біорозкладних мастил у навісному обладнанні – за можливості.
- Шум/викиди: справна паливна апаратура, фільтри, відсутність димлення; робота в полі – вдень, уникати тривалих холостих ходів.
- Миття: на спеціалізованих майданчиках з уловлювачами; заборонено поблизу водних об'єктів.

4.6 Висновки

З урахуванням специфіки здвоєних коліс для ХТЗ-150К визначено додаткові вимоги безпеки під час монтажу/демонтажу, контролю тиску та експлуатації на полі й дорогах. Виконання регламентів затягування, перевірок після обкатки, дотримання габаритів і обмежень швидкості забезпечує зниження травматизму та підвищує надійність. Екологічні заходи (робота з ПММ, зменшення ущільнення ґрунту) мінімізують негативний вплив на довкілля. Сформований комплекс організаційно-технічних і індивідуальних заходів відповідає чинним нормам і забезпечує безпечну експлуатацію трактора у всіх режимах.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ

5.1 Мета розрахунку

Метою техніко-економічного обґрунтування є визначення доцільності впровадження удосконаленої ходової частини трактора ХТЗ-150К зі здвоєними колесами в умовах сільськогосподарського виробництва.

Розрахунок спрямований на оцінку економічного ефекту, який досягається за рахунок підвищення тягової ефективності, зниження буксування, скорочення витрати пального та збільшення продуктивності праці.

5.2 Вихідні дані для розрахунків

Для розрахунків прийнято такі вихідні показники(табл. 5.1), отримані з теоретичних і експериментальних досліджень.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

| Показник | Позначення | Базовий | Проектний |
|---------------------------|------------|-----------------------|------------------------|
| Агрегат | | ХТЗ-150К+ ПОН-5-35 | ХТЗ-150КУ+ ПОН-5-35 |
| Операція | | Оранка | Оранка |
| Тягове зусилля, кН | F_t | 25,8 | 30,2 |
| Наробіток, га/рік | A_n | 500 | 500 |
| Буксування, % | δ | 11,1 | 9,2 |
| Питомий тиск, МПа | p | 0,160 | 0,089 |
| Витрата пального, кг/год | Q | 23,3 | 18,9 |
| Робоча ширина агрегату, м | B | 1,75 | 1,75 |
| Робоча швидкість, км/год | v | 5,9 | 6,4 |

5.3 Розрахунок продуктивності та економії палива

Продуктивність машинно-тракторного агрегату визначається:

$$W = \frac{B \cdot v \cdot \eta t}{10}, \text{ га/год} \quad (5.1)$$

де B – робоча ширина, м;

v – робоча швидкість, км/год;

$\eta t = 0,8$ – коефіцієнт використання часу зміни.

Для базового трактора:

$$W1 = \frac{1,75 \cdot 5,9 \cdot 0,8}{10} = 0,826 \text{ га/год.}$$

Для проектного варіанта:

$$W2 = \frac{1,75 \cdot 6,4 \cdot 0,8}{10} = 0,889 \text{ га/год.}$$

Приріст продуктивності:

$$\Delta W = W2 - W1 = 0,889 - 0,826 = 0,063 \text{ га/год.} \quad (5.2)$$

Витрата палива на 1 га:

$$q = Q/W, \text{ кг/га} \quad (5.3)$$

Базовий:

$$q1 = 23,3/0,826 = 28,22 \text{ кг/га.}$$

Проектний:

$$q2 = 18,9/0,889 = 21,27 \text{ кг/га.}$$

Економія пального:

$$\Delta q = q1 - q2 = 28,22 - 21,27 = 6,95 \text{ кг/га} (\approx 24,6\%) \quad (5.4)$$

5.4 Витрати на модернізацію трактора

До складу витрат входять:

- комплект здвоєння коліс (диски, колеса, проставки, кріплення)

Соб = 125 000 грн;

- монтаж/демонтаж $C_{мб} = 500$ грн;

Загальні капітальні витрати:

$$C_{впр} = C_{об} + C_{мб} = 128500 + 500 = 129000 \text{ грн.} \quad (5.5)$$

5.5 Річний економічний ефект

Економія палива при річній площі обробітку $A_p = 500$ га

$$E_p = \Delta q \cdot A_p \cdot C_p, \quad (5.6)$$

де $C_p = 50$ грн/кг

$$E_p = 6,95 \cdot 500 \cdot 50 = 173750 \text{ грн/рік.}$$

Ефект від зростання продуктивності:

Ефект досягається за рахунок зменшення машинного часу на ту саму площу за рахунок підвищення продуктивності агрегату:

$$T = \frac{A_p}{W}, \text{ год} \quad (5.7)$$

$$T_1 = 500/0,826 = 605,3 \text{ год,}$$

$$T_2 = 500/0,889 = 562,3 \text{ год.}$$

Заощаджено:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 43,0 \text{ год} \Rightarrow 5,38 \text{ змін (по 8 год)} \quad (5.8)$$

Отже економія оплати праці за зміну складе $E_{пз} = 700$ грн/зміну:

Загальна економія оплати праці складе:

$$E_{пзз} = \Delta T \cdot E_{пз} = 5,38 \cdot 700 = 3766 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

Економія на ТО/експлуатації (приймаємо $В_{то} = 120$ грн/год):

$$E_{ТО} = \Delta T \cdot В_{то} = 43,0 \cdot 120 = 5160 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Додатковий ефект від продуктивності:

$$E_{пр} = E_{пзз} + E_{ТО} = 3766 + 5160 = 8926 \text{ грн/рік.} \quad (5.11)$$

Загальний річний ефект:

$$E_{заг} = E_p + E_{пр} = 173750 + 8926 = 182676 \text{ грн/рік.} \quad (5.12)$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{E_{заг}}{C_{впр}} = \frac{182676}{129000} = 0,71 \text{ року (близько 8,5 місяця).} \quad (5.13)$$

Таблиця 5.2 – Узагальнені техніко-економічні показники

| Показник | Од. виміру | Базовий варіант | Проектний варіант | Відхил. |
|-------------------------------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|---------|
| Агрегат | | ХТЗ- 150К+ ПОН-5-35 | ХТЗ- 150КУ+ ПОН-5-35 | - |
| Операція | | Оранка | Оранка | - |
| Тягове зусилля | кН | 25,8 | 30,2 | +4,4 |
| Наробіток | га/рік | 500 | 500 | - |
| Продуктивність | га/год | 0,826 | 0,889 | +0,063 |
| Витрата пального на 1 га | кг/га | 28,22 | 21,27 | -6,95 |
| Річна витрата пального | кг/рік | 14 110 | 10 635 | -3 475 |
| Річна економія пального | грн/рік | 173 750 | | |
| Додатковий економічний ефект від продуктивності | грн/рік | 8 926 | | |
| Загальний річний економічний ефект | грн/рік | 182 676 | | |
| Капітальні витрати на впровадження | грн | 129 000 | | |
| Строк окупності | роки | 0,71 року (≈8,5 міс.) | | |

5.6 Висновки

1. Техніко-економічний аналіз показав, що застосування здвоєних коліс на тракторі ХТЗ-150К є ефективним інженерним рішенням, яке забезпечує помітне підвищення тягово-зчіпних та експлуатаційних показників тракторного агрегату. Установлення удосконаленої ходової системи призвело до зменшення буксування з 11,1 % до 9,2 %, що позитивно вплинуло на реалізацію тягового зусилля та стабільність руху. Завдяки зниженню втрат на пробуксовування фактична робоча швидкість зросла з 5,9 до 6,35 км/год, унаслідок чого продуктивність агрегату підвищилася приблизно на 7–8 %.

Важливою перевагою модернізованого варіанта стало скорочення питомої витрати пального близько 18 %. За річного наробітку 500 га це дозволяє зекономити понад 173,750 тис. грн тільки за рахунок зменшення споживання дизеля. Додатковий прибуток отримано завдяки збільшенню виконаного обсягу робіт, що у сумі формує річний економічний ефект понад 182 тис. грн. За капітальних витрат на модернізацію близько 129 тис. грн строк окупності становить приблизно 0,7 року (8,5 місяців), що підтверджує доцільність і вигідність упровадження удосконаленої ходової системи.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення шляхом розробки та впровадження пристрою здвоєння коліс з метою підвищення його тягово-зчіпних, енергетичних та економічних характеристик. У ході дослідження була досягнута поставлена мета та виконано всі заплановані завдання.

2. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми буксування та втрат енергії у колісних тракторів, визначено недоліки базової ходової системи трактора загального призначення ХТЗ-150К, встановлено актуальність зниження питомого тиску на ґрунт і підвищення сили зчеплення коліс. Показано, що значні втрати потужності (до 20–25 %) виникають саме через недостатню площу контакту коліс з ґрунтом та нерівномірний розподіл навантаження.

3. У другому розділі виконано теоретичні дослідження процесу взаємодії пневматичного колеса з ґрунтовим середовищем, виведено аналітичні залежності для визначення тягової сили, буксування та питомого тиску. Побудовано математичну модель, яка дозволила оцінити ефективність встановлення здвоєних коліс. Теоретично доведено, що збільшення площі контакту на $\approx 80\%$ забезпечує зниження питомого тиску на 44–45 %, підвищення коефіцієнта зчеплення на 15–18 % та відповідне збільшення тягового зусилля.

4. У третьому розділі розроблено конструкцію пристрою здвоєння коліс для трактора загального призначення ХТЗ-150К, яка забезпечує надійне центрування, рівномірний розподіл навантаження та можливість швидкого монтажу. Проведено експериментальні дослідження в польових умовах. Встановлено, що після модернізації буксування зменшилося з 11,1 % до 9,2 %, а тягове зусилля на гаку збільшилося з 25,8 до 30,2 кН. Фактична робоча швидкість зросла до 6,35 км/год, що забезпечило приріст продуктивності на 7–8 %.

Додатково підтверджено зниження витрати пального з 23,3 до 18,9 кг/год та скорочення питомої витрати до 18 %.

5. У четвертому розділі проведено оцінку безпеки монтажу та експлуатації здвоєних коліс, сформовано комплекс організаційно-технічних заходів щодо безпечного виконання робіт.

6. У п'ятому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування модернізації. Розраховано, що річна економія пального для площі 500 га становить понад 170 тис. грн. Додатковий прибуток від зростання продуктивності – понад 8 тис. грн. Загальний економічний ефект перевищує 180 тис. грн на рік, що забезпечує строк окупності модернізації приблизно 0,7 року. Отже, впровадження здвоєних коліс є технічно доцільним та економічно вигідним заходом.

Таким чином, у роботі комплексно вирішено поставлені задачі: проаналізовано тягові характеристики базового трактора, розроблено й теоретично обґрунтовано конструкцію здвоєних коліс, проведено польові дослідження, виконано економічну оцінку ефективності. Усі отримані результати підтверджують, що застосування здвоєних коліс дозволяє істотно підвищити тягову ефективність, зменшити буксування, поліпшити паливну економічність і значно знизити витрати на обробіток ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лебедєв А., Лебедєв С., Коробко А. Формування тягово-швидкісних властивостей трактора загального призначення. Сільськогосподарська техніка та обладнання: прогнозування, конструювання, випробування; 2023. URL: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122436/records/67598d7cc7a957febdf207> (дата звернення:10.09.2025)
2. J. Arvidsson. Rubber track systems for conventional tractors. Soil & Tillage Research; 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.001>
3. V. Damanauskas et al. Variation in crop yield depending on the tractor tire contact area, slippage and dual wheels. Applied Sciences; 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15116115>
4. What are the structural characteristics of agricultural tractor?" – FMWORLD – Blog, 22 Aug 2022. fmworldagri.com
5. Tractor Stability and Instability" – Penn State Extension, 14 Jul 2025. [Penn State Extension](http://PennStateExtension.com)
6. Internal Combustion Engine Fundamentals. – Heywood J.B., McGraw-Hill Education, 2018.
7. Трактор ХТЗ-150К: технічна характеристика. – ТОВ «Інтекс Ресурс», 2024.
8. BELARUS-4522 (МТЗ-4522): технічні параметри. – АСТРА Машин, 2023.
9. Трактори К-700 та К-701: технічні дані й застосування. – Agromania Україна, 2024.
10. UNIT 3: Tractors and Power Trailers. – Scribd, 2023.
11. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. – McGraw-Hill Education, 2018.
12. ASABE Standard D497.7 – Agricultural Machinery Management Data. – American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2022.

13. Makarchuk O., Denysenko O., Nadykto V. Improving Traction Properties of Wheeled Tractors by Doubling the Wheels. – Bulletin of Dnipro State Agrarian-Economic University, 2021.
14. Kushwaha R. L. Soil-Machine Interactions: A Critical Review. – Soil & Tillage Research, Elsevier, 2016.
15. Biel A., Jokiniemi M. Slip Control and Traction Optimization of Agricultural Tractors. – Biosystems Engineering, 2019.
16. Nadykto, V., Kuvachov, V., Bulgakov, V. Development of Adaptive Suspension Systems for Agricultural Tractors. – Scientific Works of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2022. – №305, с. 21–29.
17. Кальченко Б.І. «Плавність руху як складова динаміки трактора типу ХТЗ-150К.» Монографія. 2023.
18. Трактор ХТЗ-150К-09-25: технічний паспорт [Електронний ресурс]. – Харків: Харківський тракторний завод, 2023. – Режим доступу: <https://xtz.ua/files/pdf/150k.pdf>
19. Офіційний сайт Харківського тракторного заводу. Трактор ХТЗ-150К-09: технічні характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.htz.ru/catalog/htz/teh/tehk09>
20. Кисіль В.І. Трактори та автомобілі: теорія, конструкція і розрахунок. — Харків: ХНТУСГ, 2020.
21. Воробйов І.О. Теорія взаємодії коліс із ґрунтом у сільськогосподарських умовах. — Полтава: ПДАА, 2020.
22. Охмат П.К., Мельниченко В.І. Основи теорії та розрахунку трактора і автомобіля: Курс лекцій. Дніпропетровськ: ТОВ «ЕНЕМ», 2013. 340 с.
23. Теслюк Г.В., Мельниченко В.І., Бойко В.Б., Лепеть Є.І. Короткий курс лекцій з дисципліни «Трактори і автомобілі». Розділ «Основи теорії тракторів і автомобілів».- Дніпро: ТОВ «Акцент ПП», 2020.- 319 с.
24. Михайлов Г.В. Механіка колісних машин. — Київ: Ліра-К, 2018.

25. Звіт ХНТУСГ. Дослідження тягових властивостей тракторів ХТЗ-150К на різних типах ґрунтів. — Харків, 2022.
26. Nagaoka T., Tanaka Y. Soil-Wheel Interaction Model for Off-Road Vehicles. — Journal of Terramechanics, 2021, Vol. 99.
27. Bekker M.G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. — Ann Arbor: University of Michigan Press, 2018.
28. Звіт ХНТУСГ. Дослідження тягових характеристик тракторів ХТЗ-150К зі здвоєними колесами. — Харків, 2022.
29. ISO 4251-1:2017. Tyres (ply rating, load and inflation pressure for agricultural tractors).
30. Надикто В.Т. Основи наукових досліджень. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 2019. 268 с.
31. Адлер Ю.П., Маркова Є.В., Грановський Ю.В. Планування експерименту під час пошуку оптимальних умов. М: Наука. 1976. 280 с.
32. Закон України «Про охорону праці».
33. ДСТУ 12.2.003-91. Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки.
34. НПАОП 0.00-1.71-13. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних механізмів (у частині застосування домкратів/підіймачів та підставок).
35. Галузеві інструкції з безпечного виконання шиномонтажних робіт (рекомендації виробників шин/дисків для тракторів).
36. Черниш С.С.. Економічний аналіз. - К: видавничий центр учбової літератури, 2010. – 313 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Основні технічні характеристики трактора ХТЗ-150К

| Показник | Значення |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Тип трактора | Колісний, загального призначення |
| Тяговий клас | 3,0 |
| Потужність двигуна | 130 кВт |
| Двигун | Weichai WP6.180 (дизель, 4-тактний) |
| Маса експлуатаційна | 880 кг |
| Довжина × ширина × висота | 5500 × 2850 × 3200 мм |
| Ширина колії (зі здвоєними колесами) | 3250 мм |
| Радіус повороту | 7,5 м |
| Максимальна швидкість | 40 км/год |
| Ємність паливного бака | 315 л |

Додаток Б
Вихідні дані для розрахунку

| Параметр | Позначення | Значення | Одиниця виміру |
|-------------------------------------|-----------------|----------|----------------|
| Повна маса трактора | G | 58 800 | Н |
| Кількість ведучих коліс | n | 4 | – |
| Радіус колеса | r | 0,75 | м |
| Тиск у шинах (одиначних) | p ₁ | 0,16 | МПа |
| Тиск у шинах (здвоєних) | p ₂ | 0,14 | МПа |
| Потужність двигуна | N _e | 130 | кВт |
| ККД трансмісії | η _{тр} | 0,85 | – |
| Коефіцієнт зчеплення базовий | φ ₁ | 0,55 | – |
| Коефіцієнт зчеплення модернізований | φ ₂ | 0,7 | – |

Додаток В
Результати розрахунку залежності Ft від ϕ

| № | Коефіцієнт зчеплення ϕ | Тягова сила Ft, кН (базовий варіант) | Тягова сила Ft, кН (проектний варіант зі здвоєними колесами) |
|----|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1 | 0,30 | 7,506 | – |
| 2 | 0,35 | 8,757 | 8,757 |
| 3 | 0,40 | 10,008 | 10,008 |
| 4 | 0,45 | 11,259 | 11,259 |
| 5 | 0,50 | 12,510 | 12,510 |
| 6 | 0,55 | 13,761 | 13,761 |
| 7 | 0,60 | 15,012 | 15,012 |
| 8 | 0,65 | – | 16,263 |
| 9 | 0,7 | – | 17,514 |
| 10 | 0,75 | – | 18,765 |
| 11 | 0,8 | – | 20,016 |

Додаток Г

Розрахункові та експериментальні дані для побудови залежності δ від p

| № | Питомий тиск p , МПа (базовий варіант) | Буксування δ , % (базовий варіант) | Питомий тиск p , МПа (проектний варіант) | Буксування δ , % (проектний варіант, здвоєні колеса) |
|---|---------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1 | 0,10 | 9,5 | 0,08 | 7,8 |
| 2 | 0,12 | 10,5 | 0,089 | 9,2 |
| 3 | 0,14 | 11,3 | 0,11 | 9,9 |
| 4 | 0,16 | 12,1 | 0,13 | 10,6 |
| 5 | 0,18 | 13,2 | 0,15 | 11,3 |

Додаток Д

Результати експериментальних досліджень

Таблиця Д.1 – Залежність тягової сили F_t від буксування δ

| Буксування δ , % | F_t , кН (базовий) | F_t , кН (проектний) |
|-------------------------|----------------------|------------------------|
| 4 | 22,5 | 24,9 |
| 6 | 24,8 | 27,6 |
| 8 | 26,9 | 30,3 |
| 10 | 27,4 | 31,2 |
| 12 | 27,3 | 31,4 |

Таблиця Д.2 – Залежність буксування δ від питомого тиску p

| Питомий тиск p , МПа | Буксування δ , % (базовий) | Буксування δ , % (проектний) |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 0,08 | 7,8 | 6,5 |
| 0,1 | 9,0 | 7,2 |
| 0,12 | 10,2 | 8,1 |
| 0,14 | 11,1 | 9,0 |
| 0,16 | 12,0 | 9,2 |

Таблиця Д,3 – Залежність коефіцієнта використання потужності η_t від швидкості руху v

| Швидкість v , км/год | η_t (базовий) | η_t (проектний) |
|------------------------|--------------------|----------------------|
| 4 | 0,28 | 0,32 |
| 5 | 0,31 | 0,36 |
| 6 | 0,34 | 0,39 |
| 7 | 0,36 | 0,42 |
| 8 | 0,35 | 0,41 |
| 9 | 0,33 | 0,4 |

Таблиця Д,4 – Залежність витрати палива g від буксування δ

| Буксування δ , % | Витрата палива, кг/год (базовий) | Витрата палива, кг/год (проектний) |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 4 | 17,8 | 16,0 |
| 6 | 19,2 | 17,0 |
| 8 | 20,5 | 17,8 |
| 10 | 22,0 | 18,9 |
| 12 | 23,3 | 20,1 |