

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

ПРОКОПЕНКО АНДРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 631.02.03:633.03.01

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ОБҐРУНТУВАННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. О. Прокопенко

Керівник роботи

Заєць М. Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Прокопенко Андрій Олексійович. Обґрунтування тягово-енергетичних показників машинно-тракторних агрегатів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У кваліфікаційній роботі здійснено комплексне обґрунтування тягово-енергетичних показників машинно-тракторних агрегатів, які є ключовими критеріями їх ефективності під час виконання технологічних операцій у землеробстві. Дослідження спрямовано на встановлення закономірностей формування силового опору робочих органів ґрунтообробних машин, оцінку впливу конструкційних параметрів агрегатів та фізико-механічних характеристик ґрунту на роботу енергетичного засобу.

У роботі розглянуто сучасні методики визначення тягового зусилля, ефективної та тягової потужності, коефіцієнтів використання енергії та паливної економічності.

Запропоновано рекомендації щодо раціонального вибору агрегаткування та оптимальних параметрів технологічного процесу, які дозволяють забезпечити стабільність глибини обробітку, підвищення продуктивності та зменшення паливно-енергетичних затрат.

Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення конструкцій ґрунтообробних машин, підбору раціональних режимів роботи тракторів та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у сільському господарстві.

Ключові слова: машинно-тракторний агрегат, тягове зусилля, енергетичні показники, , питомі витрати енергії, продуктивність, оптимізація технологічних параметрів.

ABSTRACT

Andrii Prokopenko. Substantiation of Traction and Energy Performance Indicators of Machine-Tractor Units. – *Qualification thesis, manuscript.*

Qualification thesis for obtaining the master's degree in specialty 208 Agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The qualification thesis provides a comprehensive substantiation of the traction and energy performance indicators of machine-tractor units, which serve as key criteria of their efficiency during the execution of technological operations in crop production.

The research focuses on identifying the regularities of forming the draft resistance of tillage machine working tools, as well as evaluating the influence of structural parameters of the units and the physical-mechanical properties of the soil on the operation of the power unit.

The study reviews modern methods for determining draft force, effective and traction power, energy-use coefficients, and fuel efficiency indicators. Recommendations are proposed regarding the rational selection of unit configurations and optimal technological parameters, which ensure stable tillage depth, increased productivity, and reduced fuel-energy consumption.

The research results have practical significance for improving the design of tillage machines, selecting rational operating modes for tractors, and enhancing the efficiency of energy resource use in agriculture.

Keywords: *machine-tractor unit, draft force, energy performance indicators, specific energy consumption, productivity, optimization of technological parameters.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ	
1.1. Сучасний стан використання МТА.....	8
1.2. Конструкційні особливості сучасних МТА.....	10
1.3. Енергетичні особливості та ефективність.....	12
1.4. Підвищення ефективності сільськогосподарських та МТА.....	12
1.5. Висновки до розділу 1.....	13
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВО- ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ	
2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунту та їх вплив на формування силового опору робочих органів ґрунтообробних машин.....	14
2.2. Вплив фізико-механічних властивостей ґрунту на опір робочих органів.....	15
2.3. Обґрунтування основних тягово-енергетичних показників роботи машинно-тракторних агрегатів.....	17
2.4. Методи підвищення продуктивності сільськогосподарських та машинно-тракторних агрегатів.....	20
2.5. Висновки до розділу 2.....	23
3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВО- ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ МТА	
3.1. Параметри та показники підвищення ефективності використання.....	25
3	
.	
3.3. Обґрунтування параметрів СГА/МТА з врахуванням тягово- динамічних характеристик	28
3.4. Обґрунтування підвищення ефективності експлуатації МЕЗ.....	31
3.5. Висновки до розділу 3.....	35
2	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	37
.	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:	38
Встановлення коефіцієнта кінематичної невідповідності при передаванні крутного моменту	26

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективність застосування машинно-тракторних агрегатів є одним із визначальних чинників продуктивності та енергозбереження в сучасному сільськогосподарському виробництві. Зростання вартості енергоресурсів, інтенсифікація технологічних процесів та необхідність раціонального використання техніки ставлять перед агроінженерією завдання оптимізації тягово-енергетичних параметрів агрегатів.

У сучасних умовах широкого впровадження комбінованих ґрунтообробних машин, збільшення робочих швидкостей та глибини обробітку особливої ваги набуває точне прогнозування та врахування силового опору робочих органів, ступеня буксування рушіїв і використання тягового потенціалу трактора.

Тому дослідження тягово-енергетичних характеристик машинно-тракторних агрегатів є актуальним напрямом, що сприяє підвищенню технологічної надійності, зменшенню енерговитрат та забезпеченню конкурентоспроможності сільськогосподарського виробництва. Розроблення науково обґрунтованих підходів до оцінювання та оптимізації цих показників є необхідною умовою для модернізації технічних систем, впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій і досягнення високих результатів.

Метою роботи є: обґрунтування та підвищення ефективності тягово-енергетичних показників машинно-тракторних агрегатів шляхом визначення силового опору робочих органів, оцінки використання тягового потенціалу енергетичних засобів і оптимізації параметрів та режимів їх роботи.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан та тенденції використання машинно-тракторних агрегатів і оцінити їхні конструкційні та енергетичні особливості.
- дослідити фізико-механічні властивості ґрунту та їхній вплив на формування силового опору робочих органів ґрунтообробних машин.

- визначити основні тягово-енергетичні показники машинно-тракторних агрегатів, такі як тягове зусилля, буксування рушіїв, питомий опір обробітку та використання потужності енергетичного засобу.
- розробити методику розрахунку та оцінювання тягово-енергетичних характеристик з урахуванням конструкційних параметрів машини та режимів роботи агрегату.
- зробити висновки та рекомендації по роботі.

Об'єкт дослідження - машинно-тракторні агрегати та їхня робота в процесах основного та передпосівного обробітку ґрунту.

Предмет дослідження - тягово-енергетичні показники машинно-тракторних агрегатів та закономірності їх формування під час взаємодії енергетичного засобу з ґрунтообробними робочими органами.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури, узагальнення сучасних підходів до визначення тягово-енергетичних показників машинно-тракторних агрегатів, моделювання процесів взаємодії робочих органів із ґрунтом; методи визначення раціональних параметрів агрегування та режимів роботи для зменшення енергетичних витрат і підвищення продуктивності.

Перелік публікацій автора:

1. Заєць М. Л., Прокопенко А. О. Шляхи підвищення продуктивності праці сільськогосподарських та машинно-тракторних агрегатів. Зб. праць XI Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: ЖТФК, 2025. С. 165-167.

2. Заєць М. Л., Прокопенко А. О. Обґрунтування критеріїв прогнозування витрати палива трактором та викиди CO₂ при оранці полів різного типу форми та розмірів: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 172-175.

3. Заєць М. Л., Прокопенко А. О. Прогнозування витрати палива трактором та викиди CO₂ при оранці полів різного типорозміру та форми. Зб. тез доп. XXVI

Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки"
НУБіПУ. Київ. 2025. С. 480-484.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 39 сторінок комп'ютерного тексту, 18 рисунків та 2 таблиці.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТИВ

1.1. Сучасний стан використання МТА

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується активною трансформацією машинно-тракторного парку, що зумовлено підвищенням вимог до енергетичної ефективності, точності виконання технологічних операцій та раціонального використання ресурсів. Машинно-тракторні агрегати (МТА) залишаються основою технологічного забезпечення сільськогосподарських процесів, проте їх конструкція, системи керування, типи енергетичних установок і ступінь автоматизації стрімко змінюються.[1,2]

У більшості країн світу відбувається оновлення тракторного парку з орієнтацією на підвищення продуктивності, зменшення питомих енергозатрат та оптимізацію взаємодії агрегатів з ґрунтовим середовищем. На українському ринку простежується тенденція збільшення частки тракторів середнього та високого тягового класу, що зумовлено поширенням енергонасичених комбінованих і широкозахватних знарядь. Паралельно з цим популярності набувають агрегати, пристосовані до мінімального та strip-till обробітку ґрунту, що потребує меншого числа проходів по полю та забезпечує збереження структури ґрунту. [1,2]

У сучасних МТА важливу роль відіграють цифрові системи керування – GPS-навігація, автоматичне водіння, телеметрика, дистанційний моніторинг технічного стану. Це забезпечує зменшення людського фактору, стабільність робочих параметрів та зниження витрат пального (рис. 1.1).

Завдяки розвитку систем точного землеробства значна частина тракторів обладнується автоматичним рульовим керуванням, секційним контролем, системами паралельного водіння та датчиковою платформою. У виробництво впроваджуються автономні трактори та роботизовані агрегати, що здатні

виконувати технологічні операції без участі оператора або з мінімальним контролем. [2]

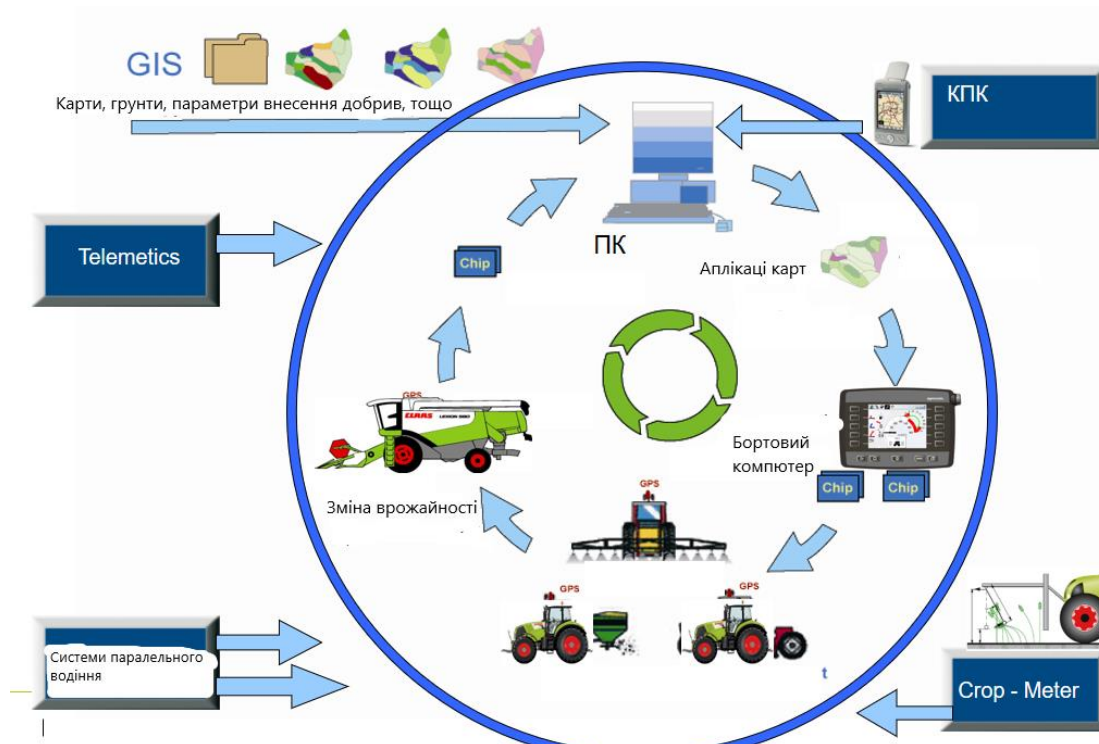


Рис. 1.1. Схема цифрової системи керування – GPS-навігація, автоматичне водіння, телеметрика, дистанційний моніторинг технічного стану

Ведеться активний пошук шляхів зменшення викидів та витрат пального шляхом застосування:

- електричних та гібридних тракторів;
- електроприводів на робочих органах;
- моторів, адаптованих до біопалив або синтетичних палив.

Такі рішення дають змогу знизити експлуатаційні витрати та забезпечити більш стабільну тягову характеристику, проте вимагають інфраструктурних і матеріальних витрат. [4,5,7]

Перехід до ресурсозберігаючих технологій. Поширення мінімального, нульового та комбінованого обробітку ґрунту суттєво впливає на конструкцію МТА. Зростає потреба в агрегатах з підвищеною міцністю рам і вузлів,

адаптивними робочими секціями, гідравлічним або електронним контролем навантажень, модульністю конструкції. [7,8,9]

Такі агрегати мають забезпечувати якісний обробіток за один прохід, зменшуючи ущільнення ґрунту та витрати енергії. [8]

Збільшення енергонасиченості МТА. Сучасні трактори характеризуються високим запасом тягової потужності, удосконаленою трансмісією, оптимізованою масо-габаритною структурою та здатністю агрегатуватися з широкозахватними знаряддями. Це дозволяє підвищити продуктивність польових робіт та знизити питомі витрати пального на одиницю продукції. [9]

1.2. Конструкційні особливості сучасних МТА

Конструкція сучасних машинно-тракторних агрегатів відзначається:

- модульністю, що забезпечує швидке переналаштування під різні програми робіт;
- посиленою рамою і шарнірами, придатними для роботи з важкими агрегатами мінімального обробітку;
- оптимізованими робочими органами (диски, лапи, сошники), які зберігають стабільну глибину та зменшують опір руху;
- електронними системами стабілізації тяги, які контролюють навантаження у реальному часі;
- вдосконаленою трансмісією (CVT, PowerShift, VARIO DRIVE), що підвищує ефективність перетворення енергії двигуна (рис. 1.2.) [9,11,12]

Суттєве значення мають рішення щодо зниження тиску на ґрунт: застосування широких шин, гусеничних рушіїв, систем автоматичного регулювання тиску у шинах (рис. 1.3).

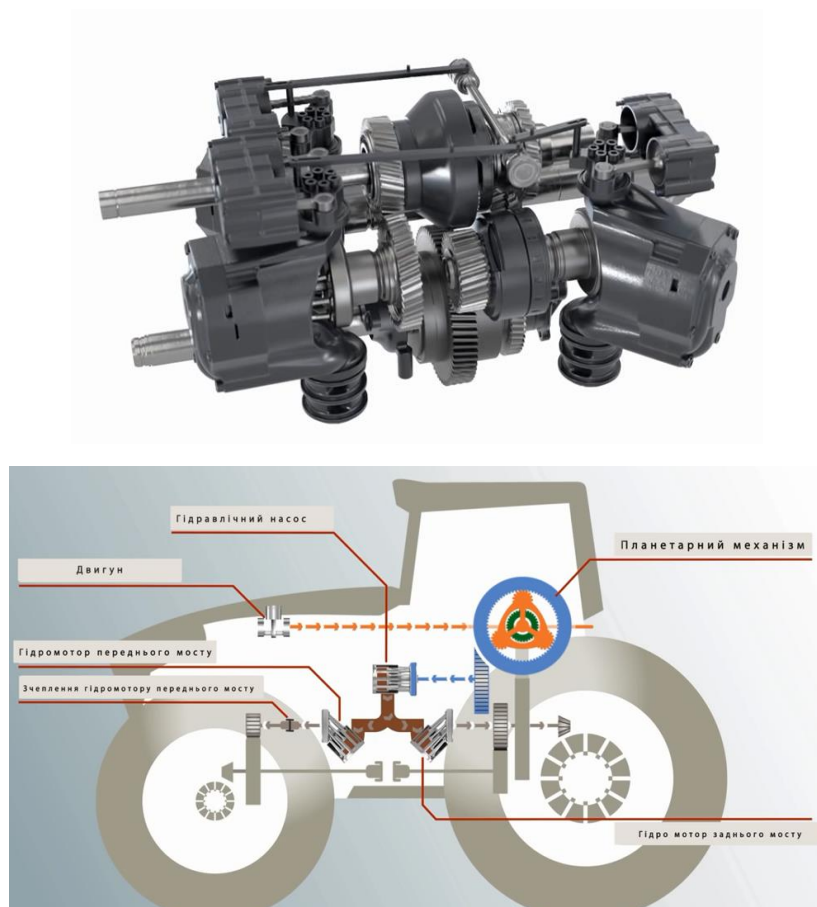


Рис. 1.2. Трансмисії (CVT, PowerShift, VARIO DRIVE) [10]



Рис. 1.3. Система автоматичного регулювання тиску у шинах

1.3. Енергетичні особливості та ефективність

Енергетична ефективність МТА залежить від комплексу факторів: конструкції двигуна, системи трансмісії, маси та опору агрегованих знарядь, режиму роботи, умов поля. Основні тенденції включають:

- підвищення ККД дизельних двигунів завдяки вдосконаленню систем упорскування та турбонадуву;
- застосування варіаторних та гідромеханічних трансмісій, які дають змогу працювати в оптимальних режимах;
- впровадження енергозберігаючих робочих органів і комбінованих агрегатів, що скорочують кількість проходів трактора;
- широке використання бортових комп'ютерів та систем моніторингу витрат пального.
- Правильно підібрана конструкція МТА дає можливість знизити питомі енергозатрати на 10–25 %, а застосування систем точного землеробства — додатково на 5–15 %.

1.4. Підвищення ефективності сільськогосподарських та МТА

Оскільки продуктивність СГА/МТА згідно моделі (1) визначається добутком трьох показників, то, відповідно, існує й три основні напрями її підвищення: збільшення ширини захвату агрегату (B), підвищення робочої швидкості його руху (V) та зростання коефіцієнта використання змінного часу (τ) [18].

$$W = 0,1 \cdot B \cdot V \cdot \tau \rightarrow \max \quad (1.1)$$

де B – ширина захвату агрегату, м;

V – швидкість руху агрегату, км/год;

τ – коефіцієнт використання робочого часу зміни.



Рис. 1.4. Способи для зростання продуктивності роботи СГА/МТА

1.5. Висновки до розділу 1.

Аналіз сучасного стану машинно-тракторних агрегатів демонструє стійку тенденцію до підвищення енергетичної ефективності, впровадження автоматизації, цифрових технологій та адаптації конструкції під ресурсозберігаючі технології обробітку ґрунту. Конструкційні рішення спрямовані на модульність, надійність та можливість роботи з широким спектром агрегатів. Енергетичні особливості формуються під впливом переходу до альтернативних джерел енергії, вдосконалення трансмісій і цифрового контролю робочих режимів.

Таким чином, сучасні МТА повинні поєднувати високу потужність, адаптивність, економічність та точність виконання технологічних операцій, що відповідає викликам сучасного аграрного виробництва та стратегії сталого використання ресурсів.

2.ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ

2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунту та їх вплив на формування силового опору робочих органів ґрунтообробних машин

Фізико-механічні властивості ґрунту є основним фактором, що визначає величину силового опору робочих органів ґрунтообробних машин, продуктивність агрегату та енергетичні витрати під час виконання технологічних операцій. Розуміння взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем дає можливість оптимізувати конструкцію знарядь, встановити раціональні режими роботи та знизити енерговитрати. [16,17]

Основні фізико-механічні властивості ґрунту: до властивостей, що найбільшою мірою впливають на опір обробітку, належать:

Щільність ґрунту - щільність або об'ємна маса ґрунту визначає ступінь ущільнення та пов'язана з кількістю пор в ґрунтовому тілі. З підвищенням щільності збільшується опір проникненню робочого органу та сила різання. Для більшості ґрунтів оптимальні значення щільності для обробітку становлять 1,1–1,4 г/см³. Перевищення цього показника призводить до різкого росту тягового опору.

Вологість ґрунту - Вологість є визначальним фактором, що впливає на липкість, зчеплення частинок та характер руйнування ґрунтового пласта.

За підвищеної вологості виникає налипання, робочі органи втрачають різальну здатність. За низької вологості ґрунт стає твердим, різання ускладнюється, зростає крихкість пласта. [14,15]

Існує інтервал оптимальної вологості, при якому опір обробітку мінімальний (польова вологість — близько 15–25 % залежно від типу ґрунту).

Механічний склад: піщані, супіщані, суглинкові та глинисті ґрунти мають різну структуру й зв'язність частинок:

піщані - низький опір, але погана стабільність форми;

глинисті - високий опір, вимагають збільшених тягових зусиль;

важкі суглинки формують великий пласт руйнування та значний опір різанню. [16,17]

Структурність і зв'язність - пухка грудкувата структура сприяє розсипанню пласта і знижує опір. Зв'язний ґрунт потребує більшої сили різання, а при перевищенні граничної деформації утворюються великі брилові фракції.

Кут внутрішнього тертя та зчеплення - ці параметри визначають сили, що чинять опір руху знаряддя всередині ґрунтової маси. Чим більші значення кута тертя та зчеплення, тим вищий опір. [16,17,18]

2.2. Вплив фізико-механічних властивостей ґрунту на опір робочих органів

- Силовий опір робочих органів складається з таких компонентів:
- опір різанню ґрунту (проникненню робочого органу),
- опір переміщенню та підняттю пласта,
- опір тертю ґрунту об поверхню знаряддя,
- додаткові опори (прилипання, інерційні навантаження, деформація шару).
-

2.2.1. Формування опору різанню

Опір зростає зі збільшенням щільності ґрунту; міцності структурних агрегатів; кута різання; площі фронтального перетину робочого органу.

Опір різанню можна орієнтовно описати залежністю: [15]

$$F_p = k \cdot b \cdot h, \quad (2.1)$$

де k - питомий опір ґрунту, м

b - ширина робочого органу, м

h - глибина обробітку, м.

Вплив вологості на опір. За оптимальної вологості — мінімальний опір: ґрунт легко розрізається і не налипає. За надмірної вологості — збільшується налипання, а отже і сила тертя.

За надто низької вологості — підвищується міцність ґрунту, що збільшує горизонтальний опір.

Термічний та структурний стан ґрунту - замерзлий або пересохлий ґрунт має значно більший модуль пружності та руйнується з більшим енергоспоживанням. Структурний стан (дрібногрудкуватий або бриловий) визначає енергетичні витрати на крихлення пласта.

Тертя ґрунту об робочий орган. Тертя залежить від типу матеріалу (сталь, покриття, полімери), шорсткості поверхні, форми та кута нахилу робочого органу.

Зменшення тертя - один з ключових шляхів зменшення загального опору агрегату.

2.2.2 Взаємодія окремих типів робочих органів із ґрунтом

Лемішні й відвальні робочі органи - вимагають високих сил різання та переміщення, чутливі до вологості та щільності. Опір різко зростає на зв'язних та важких ґрунтах.

Дискові робочі органи опір значною мірою залежить від: діаметра диска, кута атаки, швидкості руху. Диски краще працюють у вологих і засмічених умовах, але при надмірному ущільненні збільшується тягове навантаження.

Долотоподібні та чизельні лапи - опір формується переважно за рахунок проникнення та підняття пласта. Питомий опір зростає зі збільшенням глибини, особливо на глинистих ґрунтах (табл. 2.1). [17]

Таблиця 2.1.

Узагальнення впливу властивостей ґрунту на силовий опір

Властивість ґрунту	Вплив на опір
Щільність	+10...40 % збільшення опору при зростанні на 0,1 г/см ³
Вологість	мінімум в інтервалі оптимальної вологості; різке збільшення при перезволоженні
Механічний склад	піски — низький опір; глини — максимальний
Структура	пухка та грудкувата — зменшує опір; брилова — підвищує
Тертя	гладкі поверхні знижують опір до 15 %

2.3. Огрунтування основних тягово-енергетичних показників роботи машинно-тракторних агрегатів

Проблема пошуку балансу між тягово-енергетичними показниками мобільних енергетичних засобів та рівнем буксування завжди залишалася актуальною і спричиняла різні підходи до її вирішення в інженерній практиці.

У теорії тракторів вважається, що допустиме значення буксування рушіїв при роботі з номінальним тяговим зусиллям становить показники, наведені в таблиці 2.2.: [16]

Таблиця 2.2.

Рівень буксування рушіїв

Тип рушіїв	Колісна формула	Швидкість руху, км/год	Допустиме буксування, δ_n , %
Колісний	4K2	8...10	16
	4K4	8...10	14
Гусеничний	-	7...9	3

Номінальне гакове зусилля $P_{\text{кн}}$ (кН), що створює трактор з умови достатнього зчеплення коліс з поверхнею буде становити: [17]

$$P_{\text{кн}} = G_{\text{тр}} \cdot \varphi_{\text{кр.н}}, \quad (2.2)$$

де $G_{тр}$ – експлуатаційна вага МЕЗ, кН;

$\varphi_{кр.н}$ – коефіцієнт, що враховує вагу трактора при номінальному тяговому зусиллі, що обмежується буксування (δ_{max})

Водночас зі зменшенням буксування відповідно зменшується й дотична сила тяги, яку здатне розвивати колесо. За результатами досліджень [8-17] максимальне значення дотичної сили створюється за рівня буксування рушіїв в межах 22...24 % (рис. 2.1, 2.2, 2.3). Такі значення істотно перевищують допустимий ліміт, за якого не відбувається небажане надмірне пошкодження ґрунтового покриву.

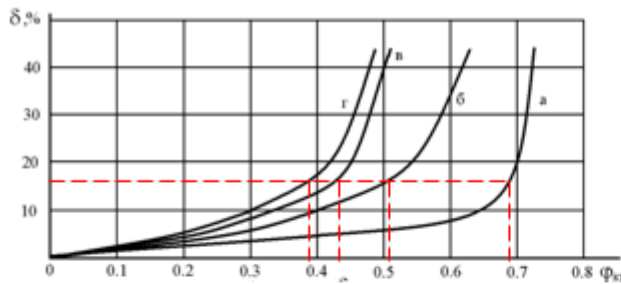


Рис. 2.1 - Залежність буксування δ від коефіцієнту використання ваги трактора $\varphi_{кр}$ для тракторів 4К2: а – асфальт, бетон; б – щільний ґрунт; в – стерня; г – поле, підготовлене під посів

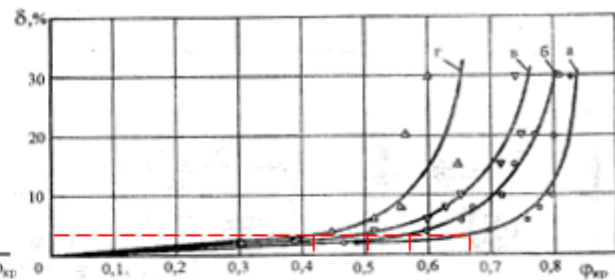


Рис. 2.2 - Залежність буксування δ від коефіцієнту використання ваги трактора $\varphi_{кр}$ для гусеничних тракторів: а – щільний ґрунт; б – стерня; в – пар; г – поле, підготовлене під посів

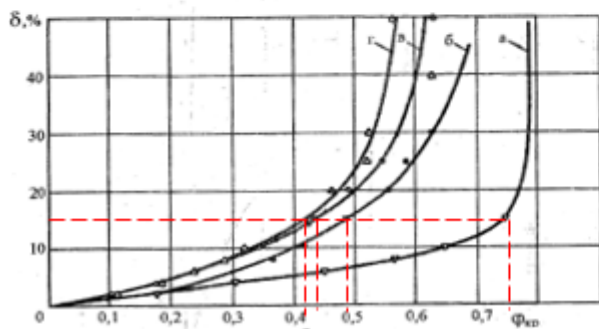


Рис. 2.3 - Залежність буксування δ від коефіцієнту використання ваги трактора $\varphi_{кр}$ для тракторів 4К4: а – асфальт, бетон; б – щільний ґрунт; в – стерня; г – поле, підготовлене під посів

Пробуксовування коліс трактора, створює додаткові витрати палива та підвищує зношення шин, а й призводить до руйнування ґрунтової структури. Це руйнування виникає внаслідок деформацій зминання та зрізу, що зумовлені тиском, який передає на ґрунт бокова поверхня шини та ґрунтозацепи під час руху колеса.

Відтак постає науково обґрунтована необхідність визначення раціонального компромісу: граничний рівень буксування колісного рушія повинен забезпечувати формування максимальної дотичної сили тяги за умов мінімально допустимого порушення структурно-агрегатного стану ґрунтового середовища.

$$[Q_{\max}] \geq Q_{\partial} = f(G, t_z, h_z, b_{\text{ш}}, R_{\kappa}, \alpha, \delta_{\max}), \quad (2.3)$$

де $[Q_{\max}]$ - допустиме значення рівення максимального тиску ходової системи на поле, визначається фізико-механічними показниками ґрунту, і різних умов застосування агрегату.

Q_{∂} – тиск ґрунтозачепа рушія у горизонтальній площині;

$b_{\text{ш}}$ – ширина шини (рис. 2.4);

t_z – крок встановлення ґрунтозачепів (рис. 2.4);

α – кут встановлення ґрунтозачепа до повздовжньої осі колеса;

h_z – конструкційна висота ґрунтозачіпа;

G, δ - вертикальне навантаження на рушій та пробуксовування;

R_{κ} - статичний радіус колісного рушія.

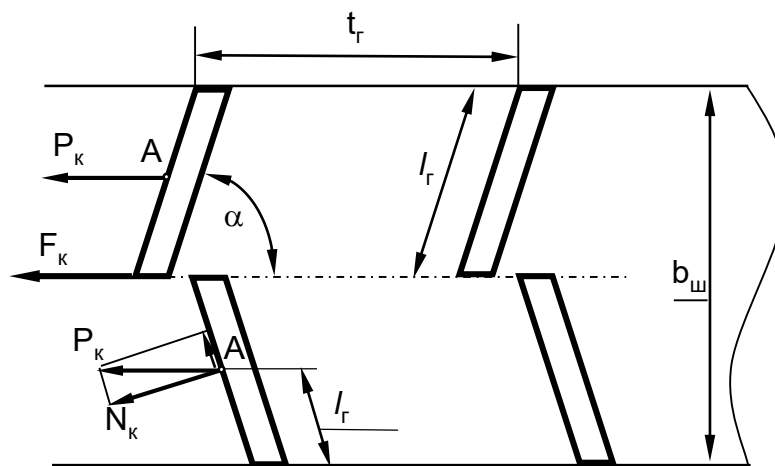


Рис. 2.4. Схема розрахунку для ґрунтозачепів

2.4. Методи підвищення продуктивності сільськогосподарських та машинно-тракторних агрегатів

Продуктивність виконання роботи СГА/МТА згідно з формулою (1) визначається як добуток трьох основних параметрів, то й напрями її підвищення логічно поділяються на три групи: збільшення ширини захвату агрегату (B), підвищення робочої швидкості його руху (V) та зростання коефіцієнта використання робочого часу зміни (τ) [12].

$$W = 0,1 \cdot B \cdot V \cdot \tau \rightarrow \max \quad (2.4)$$

де B – ширина захвату машини, м;

V – робоча швидкість руху, км/год;

τ – коефіцієнт, що враховує робочий час зміни.

На відміну від параметрів B і V , значення коефіцієнта використання робочого часу зміни τ визначається переважно рівнем організації виконання технологічної операції. Його величину обчислюють за таким рівнянням:

$$\tau = \frac{T_p}{T_{зм}} = \frac{t_p(1 + n_{ц\text{ осн}})}{t_{ц}(1 + n_{ц\text{ осн}}) + t_{нц}} \rightarrow 1, \quad (2.5)$$

де T_p – час чистої роботи агрегату за зміну, год.;

$T_{зм}$ – фактичний час виконання роботи агрегатом, год.;

t_p – затрати часу на робочі ходи, год.;

$t_{ц}$ – час виконання агрегатом одного циклу роботи, год.;

$n_{ц\text{ осн}}$ – фактична к-ть основних робочих циклів.

Максимальна продуктивність праці досягається за умови встановлення оптимальних значень параметрів B і V . Умову їх оптимізації можна подати таким чином:

$$\frac{\frac{\partial W}{\partial V}}{\frac{\partial N_{ен}}{\partial V}} = \frac{\frac{\partial W}{\partial B}}{\frac{\partial N_{ен}}{\partial B}}, \quad (2.6)$$

де $N_{ен}$ - номінальна ефективна потужність двигуна трактора, кВт.

Часткові похідні величин, що входять до виразу (2.6) для визначення продуктивності, запишуться наступним чином: [13]

$$\frac{\partial W}{\partial V} = 0,1 \cdot B \cdot \tau, \quad \text{і} \quad \frac{\partial W}{\partial B} = 0,1 \cdot V \cdot \tau, \quad (2.7)$$

Часткові похідні величин, у виразі (2.7) із визначенням $N_{ен}$ з рівняння балансу потужності мають слідуєчий вигляд: [14]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{ен}}{\partial V} &= \frac{K_M \cdot B \cdot H + f \cdot G}{\eta_{MT}} \left/ \left(K_H \cdot \left(1 - \frac{a \cdot K_M \cdot B \cdot H}{\mu \cdot G} - b \cdot \left(\frac{K_M \cdot B \cdot H}{\mu \cdot G} \right)^2 \right) \right) \right. \\ \frac{\partial N_{ен}}{\partial B} &= \frac{K_M \cdot H \cdot V \cdot \left(1 + \frac{a \cdot f}{\mu} + \frac{2 \cdot b \cdot f \cdot G \cdot K_M \cdot H}{\mu^2 \cdot G^2} + \frac{b \cdot K_M^2 \cdot H^2 \cdot B^2}{\mu^2 \cdot G^2} \right)}{K_H \cdot \eta_{MT} \cdot \left(1 - a \cdot \frac{K_M \cdot B \cdot H}{\mu \cdot G} - b \cdot \left(\frac{K_M \cdot B \cdot H}{\mu \cdot G} \right)^2 \right)^2}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Рис. 2.5. Схема підвищення тягово-зчіпних властивостей енергетичних засобів баластуванням

Е
М
В
Е
D
W
о
г
d
.
Р
і



Рис. 2.6. Баластування тракторів CASE 310

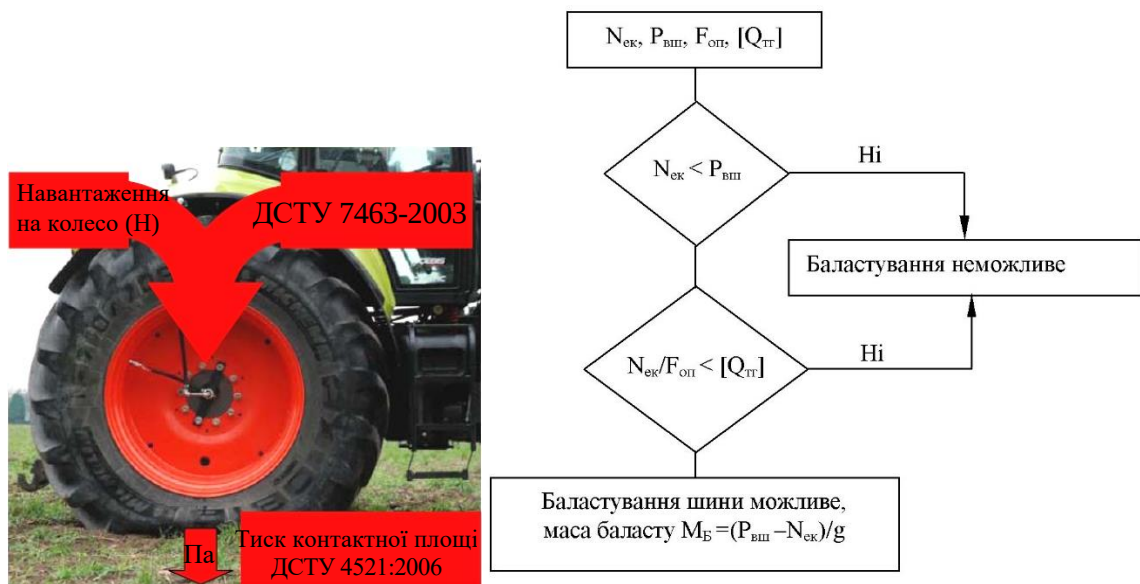


Рис. 4. Зниження експлуатаційного навантаження на рушій

Тоді умова екофільності рушія уде становити: [17]

$$\frac{N_{ек} \leq P_{вш}}{F_{оп}} \leq [Q_{тт}] , \quad (2.9)$$

$N_{ек}$ - експлуатаційне навантаження на колесо, H ;

$P_{вш}$ - допустиме навантаження на шину, H ;

$F_{оп}$ - опорна площа шини, $м^2$;

$[Q_{тт}]$ - допустима величина тиску на ґрунт, який створює трактор, $Па$

Баласт трактора не можна встановлювати одноразово на весь термін експлуатації, оскільки його робота може включати різні види операцій або виконуватися з одними й тими ж агрегатами за різних умов. Оптимальне баластування сприяє зниженню питомих витрат палива та підвищенню продуктивності агрегату. Надмірно малий або надмірно великий баласт є недопустимим. Величину баласту визначають так, щоб показник буксування трактора з агрегатом відповідав допустимим нормам. Перевірку баластування слід проводити для конкретного агрегату та умов ґрунту, забезпечуючи відповідність критерію екологічності шини.

2.5. Висновки до розділу 2.

Фізико-механічні властивості ґрунту визначають інтенсивність силового впливу на робочі органи ґрунтообробних машин та формують величину тягового опору МТА. Найважливішими факторами є вологість, щільність, механічний склад і структурність ґрунту. Їх оптимальне поєднання забезпечує зниження опору до 30...40 % та зменшення витрат пального. Знання цих властивостей дозволяє обґрунтовано вибирати тип робочого органу, режим роботи та конструкційні параметри знаряддя, що є основою підвищення енергоефективності машинно-тракторних агрегатів.

Силовий опір робочих органів формується за рахунок опору різанню, переміщенню та підняттю ґрунтового пласта, тертя об поверхню робочого органу, а також додаткових факторів, таких як налипання та інерційні навантаження. Розуміння цих складових дозволяє обґрунтувати конструкційні рішення та режими роботи машин.

Тип робочого органу істотно впливає на характер взаємодії з ґрунтом: лемішні та відвальні органи найбільш чутливі до щільності та зв'язності ґрунту, дискові до кута атаки, діаметра диска та вологості, долотоподібні та чизельні лапи до глибини обробітку і міцності ґрунтового пласта.

Тягово-енергетичні показники МТА залежать не лише від конструкції та потужності трактора, а й від рівня буксування рушіїв. Надмірне буксування призводить до підвищених витрат пального та руйнування структури ґрунту, тоді як оптимальне баластування дозволяє підвищити продуктивність агрегату та забезпечити екологічність роботи.

Оптимізація продуктивності машинно-тракторних агрегатів досягається за рахунок раціонального поєднання ширини захвату, робочої швидкості та коефіцієнта використання робочого часу. Використання баластування, регулювання тиску на ґрунт та контроль буксування рушіїв сприяють підвищенню ефективності та енергоекономічності роботи.

Узагальнення досліджень показує, що комплексне врахування фізико-механічних властивостей ґрунту, конструкційних характеристик робочих органів та тягово-енергетичних параметрів агрегатів є ключовим для підвищення продуктивності і зниження енергетичних витрат у сучасному сільському господарстві.

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ МТА

3.1. Параметри та показники підвищення ефективності використання МТА

1) Використання потужності двигунів енергонасичених тракторів здійснюється через активний привід робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь, що характеризує енергонасиченість засобів у рамках тягового балансу:

$$E_{\text{тяг}} = \frac{N_{\text{кр}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{б}} + N_{\text{f}}}{G_{\text{ек}}} \leq 15 \text{ кВт} / \text{т} \quad , \quad (3.1)$$

тягово-енергетичної концепції:

$$E_{\text{тяг}} = \frac{N_{\text{кр}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{б}} + N_{\text{f}} + N_{\text{ВП}}}{G_{\text{ек}}} > 15 \text{ кВт} / \text{т} \quad , \quad (3.2)$$

2) Збільшення робочої швидкості руху МТА.

За такої умови потужність двигуна трактора зростає (рис.3.1)



Рис. 3.1. Графічна залежність питомої потужності та швидкості руху МТА

3) Підвищення тягової сили енергонасиченого МЕЗ за рахунок баластування:

$$P_{кр} = G_{тр} \cdot \varphi_{кр} \approx 0.45(G_{тр} + M_{б} \cdot g), \quad (3.3)$$

4) Створення модульних енергетичних засобів (МЕЗ) перемінного тягового класу



а)



б)

Рис. 3.2 – Модульні МЕЗ змінної тяги класу 1,4-3 (а) і 3-5 (б) [18]

3

У тракторах із автоматично блокованим приводом переднього та заднього мостів практично завжди спостерігається кінематична невідповідність між переднім та заднім мостами. Ця кінематична невідповідність кривих швидкостей від їх швидкості руху на мосту виникає внаслідок виробничих допусків, зносу протекторів, змін тиску повітря в шинах, а також варіацій нормальних навантажень на колеса під час експлуатації. [18]

У разі застосування передніх і задніх рушіїв різних номінальних діаметрів розбіжність кутових швидкостей осей неможливо компенсувати конструктивно, що призводить до відмінності колових швидкостей. Під час криволінійного руху трактора кожна вісь проходить різні траєкторії, тоді як блоковані осі прагнуть підтримувати однакові поступальні швидкості, що додатково підвищує кінематичну невідповідність. [18]

Рівень кінематичної невідповідності можна охарактеризувати коефіцієнтом (K_v): [18]

$$K_v = \frac{V_n}{V_z} = \frac{(\omega_n \cdot r_n)}{\omega_z \cdot r_z}, \quad (3.4)$$

ω_n, r_n і ω_z, r_z - кутова швидкість та номінальний радіус передніх і задніх рушіїв

У тракторів з колісною формулою 4х4, де рушії передньої і задньої осі однакові, становить:

$$K_v \frac{V}{V} = \frac{\rho_z \left(2\pi \cdot \rho_n \cdot \sqrt{R^3 \cdot r} - G_n \right)}{\rho_n \left(2\pi \cdot \rho_z \cdot \sqrt{R^3 \cdot r} - G_z \right)}, \quad (3.5)$$

де G_n, G_z – вертикальна вага на передні і задні осі, кН;

ρ_n, ρ_z – тиск передніх і задніх рушійів, МПа;

R – радіус перекочення рушіїв, м;

r – радіус шини у поперечному перерізі, м.

Отримавши вираз видно, що забезпечити відносно точне значення коефіцієнта кінематичної невідповідності $K_v = 1$ можливо при умові:

$$\frac{\rho_z}{\rho_n} = \frac{G_z}{G_n}, \quad (3.6)$$

Аналізуючи співвідношення бачимо, що для отримання оптимальної кінематичної невідповідності в приводі ведучих осей 4х4 універсальних тракторів з однаковими типорозмірами рушіїв, співвідношення тиску в шинах коліс задньої осі до тиску в передніх шинах, необхідно виконати вимогу, відношення вертикального навантаження на задню ведучу вісь до вертикального зусилля, яке передається на передній міст трактора.

3.3. Обґрунтування параметрів СГА/МТА з врахуванням тягово-динамічних характеристик

Комплектування машинно-тракторних агрегатів (МТА) розглядається як науково обґрунтований процес визначення складу агрегату (енергозасіб, кількість робочих машин, тип зчіпки) та робочої швидкості для виконання конкретної операції з урахуванням агротехнічних вимог.

Основні завдання комплектування агрегатів на базі наявної техніки зводяться до визначення оптимального складу та швидкісного режиму роботи, що реалізується на двох рівнях:

Перший рівень: вибір трактора з урахуванням природно-виробничих умов виконання операції — довжини гону, розмірів поля, середнього питомого опору робочих машин тощо. При цьому враховуються критерії ресурсозбереження, високої продуктивності та екологічної безпеки. Основними критеріями оптимізації є продуктивність агрегату та відповідні експлуатаційні витрати.

Другий рівень: для обраного трактора визначають оптимальні значення робочої швидкості та ширини захвату машини, потім обирають число с/г машин та тип зчіпки. Рішення цього рівня зводяться до оптимізації режиму робочих ходів МТА.

При експлуатаційних розрахунках складу та швидкісного режиму агрегатів еквівалентними критеріями виступають параметри продуктивності та експлуатаційні витрати. Для цього використовують тягову характеристику трактора, яка може бути визначена експериментально в результаті тягових випробувань або побудована теоретично.

$$(N_{кр}, v_{тр}, g_{кр}, \delta, \eta_m) = f(P_{кр}), \quad (3.7)$$

Теоретична тягова характеристика трактора будуватиметься на основі регуляторної характеристики його двигуна.

Як наслідок, нелінійна зміна регуляторної характеристики та змінного моменту опору, двигун не може забезпечити номінальну потужність, яку він розвиває при навантаженні зі сталим опором. (рис. 3.3, 3.4., 3.5., 3.6.).

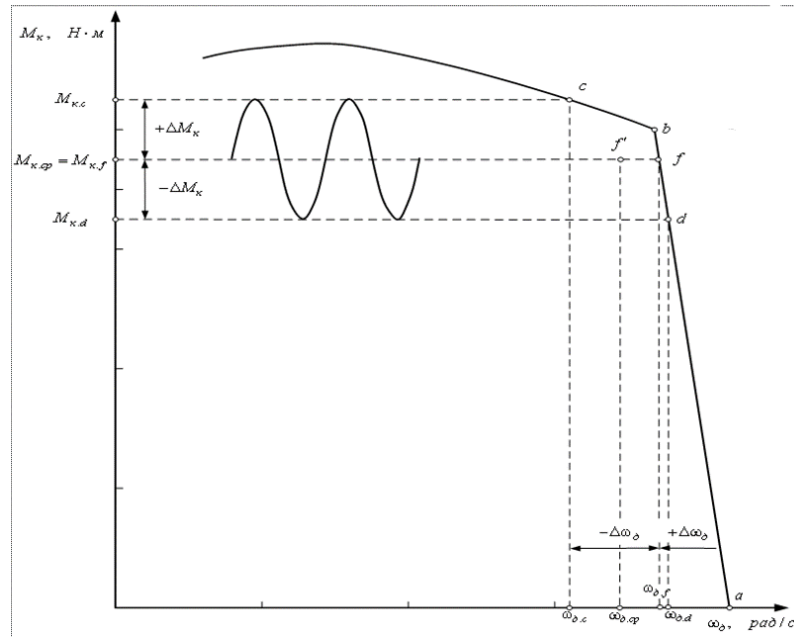
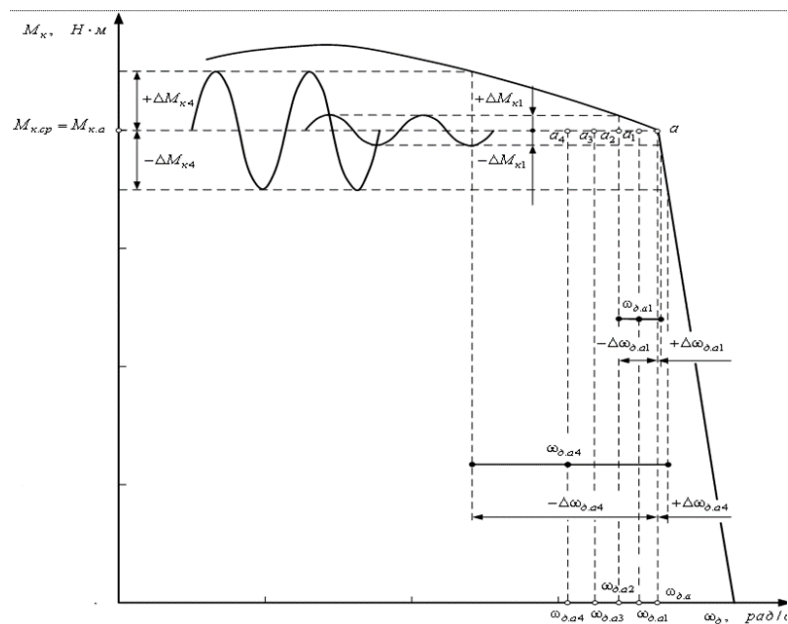


Рис. 3.3. Залежність зміни навантаження на пониження кутової частоти обертання колінчатого вала



Р

и

с

.

2

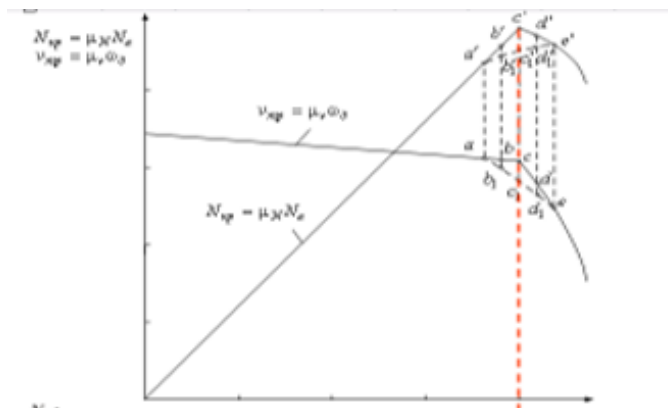


Рис. 3.5. Вплив нелінійності регуляторної характеристики двигуна на залежності $N_{кр}$ і $V_{тр}$ тягової характеристики трактора

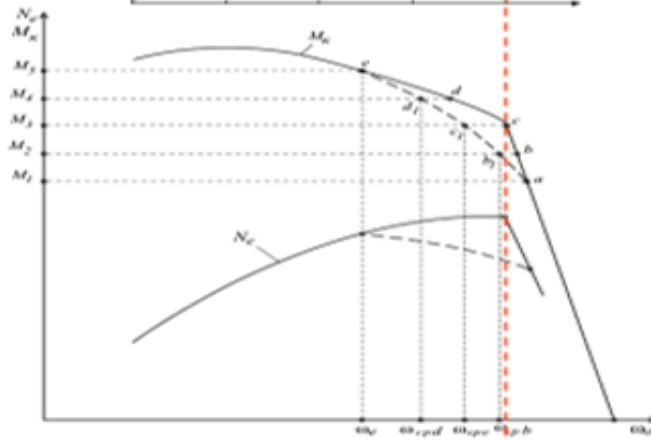


Рис. 3.6. Залежність середнього значення кутової швидкості колінчатого вала та ефективної потужності від завантаження двигуна при постійній амплітуді коливань моменту

тягового навантаження трактора оцінюється коефіцієнтом варіації і знаходиться в межах $K_x = 15...16\%$.

Вираз балансу потужностей двигуна трактора запишеться:

$$N_e = N_{кр} + N_{тр} + N_d + N_f,$$

де $N_{кр} = P_{кр} \cdot (1 + 3K_x) \cdot V$ - тягова потужність трактора;

$N_{тр} = N_e(1 - \eta_{тр})$ - потужність, яка затрачається на подолання сил тертя, які виникають в трансмісії;

$N_d = (P_f + P_{кр} \cdot (1 + 3K_x)) \cdot V \cdot \delta$ - потужність, яка затрачається на буксування колісних рушіїв;

$N_f = P_f \cdot V$ - потужність, що враховує втрати енергії на подолання опору перекошування енергетичного засобу.

$$(N_{кр}, v_{тр}, g_{кр}, \delta, \eta_m)$$

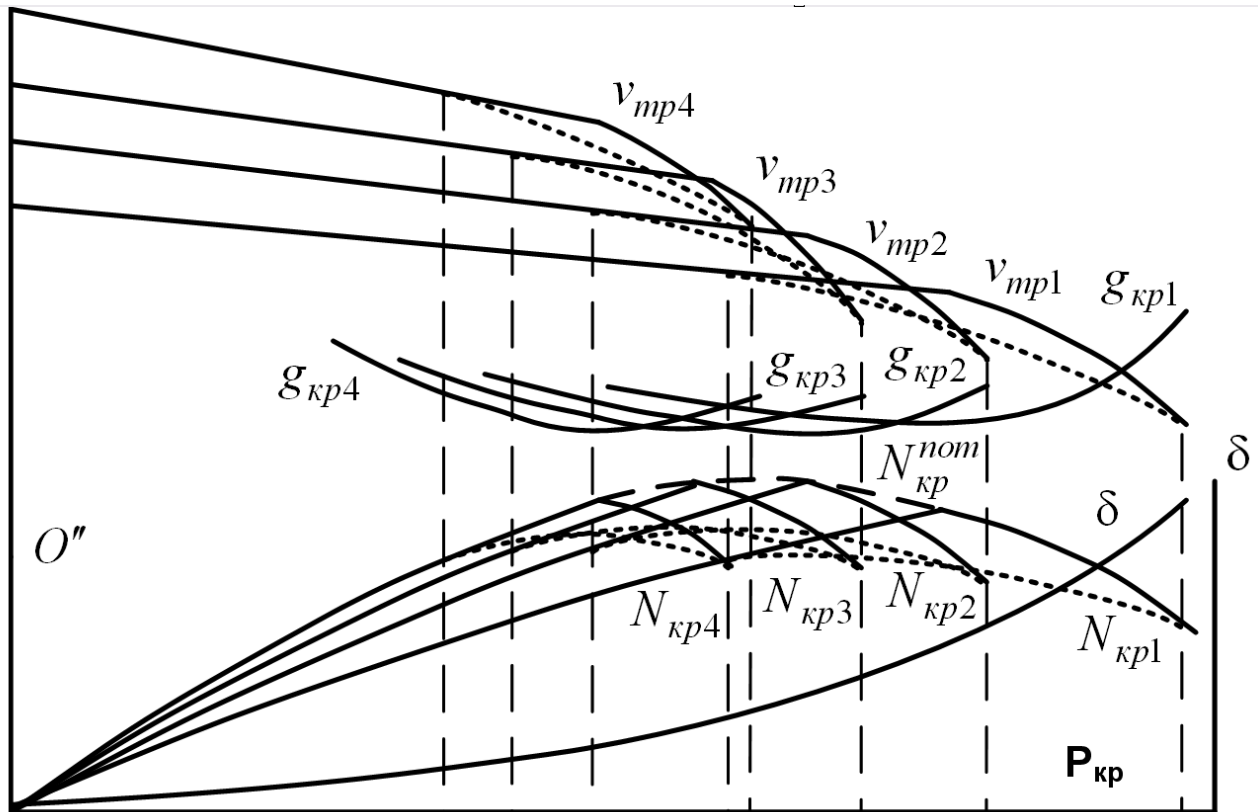


Рис. 3.7. Графічне зображення тягово-енергетичного балансу МТА

3.4. Обґрунтування підвищення ефективності експлуатації МЕЗ.

Метою підвищення техніко-експлуатаційних властивостей тракторів та інших мобільних енергетичних засобів полягає у забезпеченні таких режимів роботи, за яких досягається максимальне корисне використання потужності двигуна при мінімальній питомій витраті палива та мінімальному негативному впливі на навколишнє середовище.

Ефективним способом удосконалення техніко-експлуатаційних властивостей енергетичних засобів є проектування та застосування двигунів із регуляторною характеристикою, оптимальною для сільськогосподарських робіт. Значним кроком у цьому напрямку є розробка двигунів постійної потужності, які в широкому діапазоні частот обертання забезпечують високий коефіцієнт

пристосованості за крутним моментом при майже постійній ефективній потужності.

Обґрунтовано підхід до визначення реального коефіцієнта корисної дії (ККД) оранки поля спирається на дані про стан ґрунту та проведені роботи з його обробітку, а також на практичні вимірювання навантаження двигуна трактора. Дослідження показали, що при оранці шести польових ділянок різної форми та розмірів загальною площею 6 га ККД оранки коливався в діапазоні 0,68...0,82, а витрати палива становили 15,6-16,5 кг/га. На ділянці з ККД на 15 % вищим витрати палива на одиницю площі знизилися приблизно на 5,5 % (рис. 3.8).

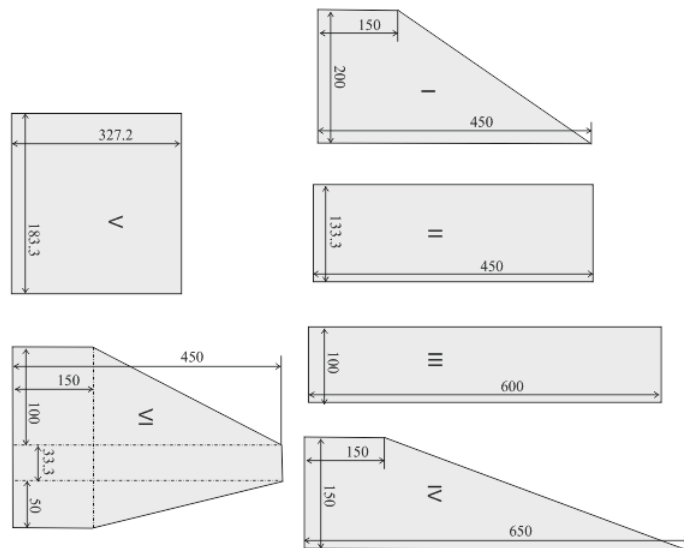


Рис. 3.8. Графічне зображення ділянок: (I) шириною 200 м, неправильної чотирикутної форми; (II) шириною 133,3 м, форма правильна; (III) шириною 100 м, витягнутої правильної форми; (IV) 200 м завширшки, неправильної чотирикутної форми; (V) ширина 183,3 м, правильної прямокутної форми; (VI) 50 м шириною, шестикутної форми.

Результати проведеного дослідження дають змогу більш точно прогнозувати тривалість обробітку ґрунту та витрати палива трактора залежно від форми та розмірів поля. Для експериментальних польових випробувань було обрано трактор MF 6499 (Massey Ferguson). У цієї моделі дані, збережені в блоці ЕСМ, оновлюються щосекунди, що забезпечує високу точність вимірювань.

Полеві дослідження виконувалися під час оранки стерні навісним оборотним шестикорпусним плугом LEMKEN EurOpal 9 (LEMKEN GmbH & Co. KG, Альпен, Німеччина), агрегатованим із трактором MF 6499. Робочу ширину плуга встановлено на рівні $2,4 \pm 0,015$ м, а глибину оранки - $0,22 \pm 0,015$ м. Усі робочі проходи здійснювалися з увімкненим повним приводом, заблокованим диференціалом, на першій передачі діапазону «D», при частоті обертання двигуна 1850 ± 20 об/хв (рис. 3.9.).

Під час поворотів на загінці середня швидкість руху трактора становила 0,84 м/с, а при реверсі - 0,76 м/с за частоти обертання двигуна 990 ± 15 об/хв. Буксування задніх ведучих коліс у процесі всіх польових випробувань змінювалося в межах 11...16 %. Тиск повітря в шинах під час дослідів підтримувався на рівні 140 кПа. На передню частину рами трактора було встановлено додаткові вантажі загальною масою 540 кг.

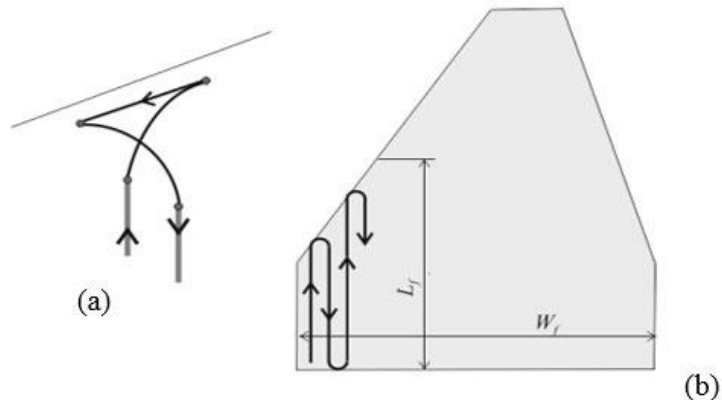


Рис. 3.9. Схема маневру Х-повороту на розворотній смузі поля (a) з послідовністю руху (b) на оранці; L_f – середня довжина поля по напрямку руху, а W_f – максимальна ширина ділянки перпендикулярно до напрямку руху МТА

Під час досліджень отримували дані про продуктивність трактора MF 6499 шляхом аналізу звітів про навантаження двигуна, що зберігалися в ЕСМ і копіювалися до та після оранки кожної тестової ділянки. Звіт про навантаження двигуна, сформований ЕСМ трактора Massey Ferguson MF 6499 у вигляді

гістограми та таблиці (рис. 3), може бути переданий на комп'ютер у будь-який момент.

Запис даних у звіті ЕСМ здійснюється з такими інтервалами: частота обертання двигуна фіксується з кроком 100 хв^{-1} , кількість палива, що впорскується за цикл, — з інтервалом $10 \text{ мг} \cdot \text{цикл}^{-1}$, а часовий інтервал запису становить 1 с. Під час польових випробувань ці дані з ЕСМ збирали для кожної дослідної ділянки.

Для формування таблиці навантаження трактора на кожній ділянці використовували дані зі звіту, скопійованого після завершення оранки, з якого віднімали інформацію, отриману перед початком роботи на цій ділянці. У результаті було сформовано гістограми та таблиці розподілу часу роботи двигуна відповідно до його частоти обертання та кількості палива, що впорскується за цикл.

На основі цих гістограм, після аналізу навантаження для відповідних режимів роботи двигуна, були визначені продуктивність трактора та тривалість його холостого ходу рис. 3.10.

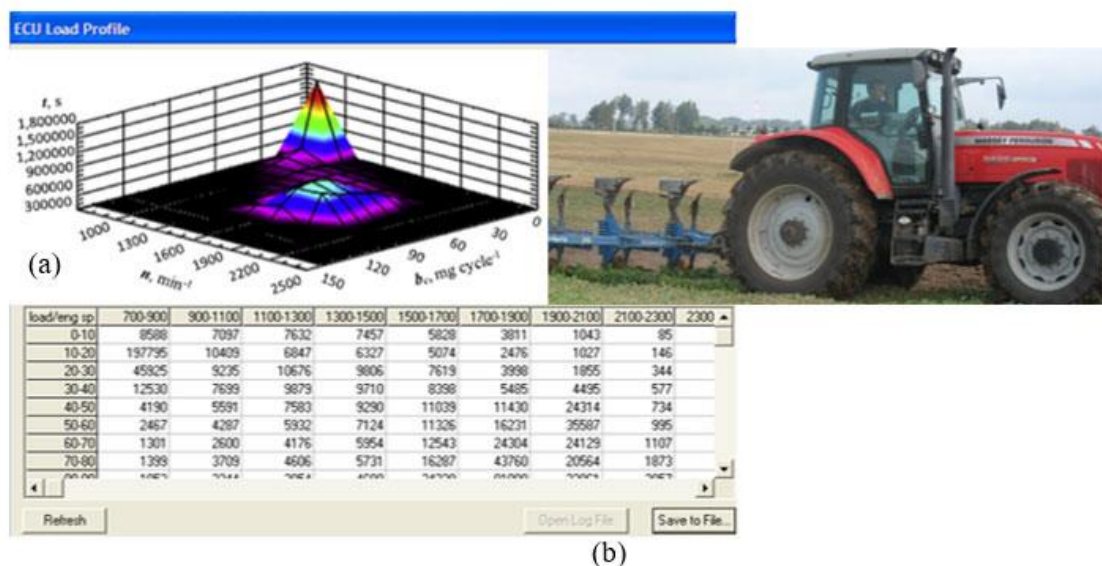


Рис. 3.10. Графічне зображення навантаження на двигун (а) і табличні параметри (б), отримані з бортового комп'ютера трактора

Ефективність використання часу оранки певного поля за теоретичним методом визначається на основі його площі, середньої довжини в напрямку руху агрегату, максимальної ширини перпендикулярно до цього напрямку, часу розвороту трактора на загінці, ширини захвату плуга та фактичної робочої швидкості трактора.

У практичному методі ефективність використання часу оранки встановлюється шляхом аналізу звітів ЕСМ трактора, які копіюються до та після виконання робіт на відповідній ділянці.

Як теоретичні розрахунки, так і експериментальні дані підтвердили, що коефіцієнт ефективності використання часу оранки є інформативним показником, який достовірно характеризує витрати палива та викиди CO_2 під час виконання оранки на полях із різною конфігурацією.

3.5. Висновки до розділу 3.

Підвищення ефективності використання МТА базується на раціональному використанні потужності двигуна, зростанні робочих швидкостей та оптимальному формуванні тягових властивостей. Застосування активних приводів робочих органів та баластування тракторів дає можливість збільшити тягове зусилля та забезпечити стабільну роботу МТА на різних ґрунтово-агротехнічних фонах.

Вибір оптимального коефіцієнта кінематичної невідповідності дозволяє знизити буксування, втрати потужності, зменшити зношування шин і підвищити паливну економічність. Для тракторів з однаковими колесами оптимальність досягається відповідністю співвідношень тиску повітря до співвідношень вертикальних навантажень на осі.

Комплектування машинно-тракторних агрегатів (МТА) є ключовим етапом формування ефективної технологічної операції. Вибір енергозасобу та робочих параметрів агрегату повинен базуватися на тягово-динамічних характеристиках трактора, агротехнічних вимогах та умовах поля.

Тягово-енергетичний баланс трактора показує, що значна частина енергії втрачається на буксування, тертя та опір коченню. Коливання тягового навантаження (12–18 %) істотно впливають на реальну потужність, яку двигун може реалізувати у польових умовах, що враховано в рівняннях та графічних залежностях, наведених у розділі.

Практичні дослідження ефективності оранки за даними ЕСМ трактора MF 6499 підтвердили, що коефіцієнт ефективного використання часу є інформативним показником, який достовірно відображає витрати палива та продуктивність МТА. Експериментально встановлено, що ККД оранки для ділянок різної конфігурації становив 0,68–0,82, а збільшення ККД на 15 % зумовлює зменшення витрати палива приблизно на 5,5 %.

Форма поля та його геометричні параметри значною мірою впливають на продуктивність та витрати часу під час оранки. Використання теоретичного та практичного методів оцінки показало високу узгодженість результатів, що дозволяє прогнозувати паливну економічність і тривалість роботи ще до виконання польових операцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану машинно-тракторних агрегатів демонструє стійку тенденцію до підвищення енергетичної ефективності, впровадження автоматизації, цифрових технологій та адаптації конструкції під ресурсозберігаючі технології обробітку ґрунту. Конструкційні рішення спрямовані на модульність, надійність та можливість роботи з широким спектром агрегатів.
2. Фізико-механічні властивості ґрунту визначають інтенсивність силового впливу на робочі органи ґрунтообробних машин та формують величину тягового опору МТА. Найважливішими факторами є вологість, щільність, механічний склад і структурність ґрунту. Їх оптимальне поєднання забезпечує зниження опору до 30...40 % та зменшення витрат пального. Комплектування машинно-тракторних агрегатів (МТА) є ключовим етапом формування ефективної технологічної операції. Вибір енергозасобу та робочих параметрів агрегату повинен базуватися на тягово-динамічних характеристиках трактора.
3. Тягово-енергетичний баланс трактора показує, що значна частина енергії втрачається на буксування, тертя та опір коченню. Коливання тягового навантаження (12–18 %) істотно впливають на реальну потужність, яку двигун може реалізувати у польових умовах, що враховано в рівняннях та графічних залежностях, наведених у розділі.
4. Практичні дослідження ефективності оранки за даними ЕСМ трактора MF 6499 підтвердили, що коефіцієнт ефективного використання часу є інформативним показником, який достовірно відображає витрати палива та продуктивність МТА. Експериментально встановлено, що ККД оранки для ділянок різної конфігурації становив 0,68–0,82, а збільшення ККД на 15 % зумовлює зменшення витрати палива приблизно на 5,5 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грицаєнко З. М., Молдаван Л. В., Дегодюк Е. Г. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. Київ: Логос, 2017. 368 с.
2. Болотін В. С., Костенко М. П., Зубко В. М. Теорія та проектування машин для обробітку ґрунту. Харків: НТМТ, 2018. 412 с.
3. Державний стандарт України. Трактори і машини сільськогосподарські. Терміни та визначення понять: ДСТУ 2074–2015. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 27 с.
4. Дубровін В. О., Мельник І. М. Трактори: конструкція, теорія, технічне обслуговування. Вінниця: Нова книга, 2020. 560 с.
5. Габриловський І. М., Зінченко І. О. Трактори та автомобілі. Конструкція і технічне обслуговування. Харків: ХНАУ, 2019. 384 с.
6. Kutzbach H. D. Trends in power and machinery development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2018. Vol. 164. P. 1–16.
7. Hunt D. R. Farm Power and Machinery Management. 10th ed. Ames: Iowa State University Press, 2021. 392 p.
8. Kheiralla A. F., Yahya A., Zohadie M., Ishak W. Effect of implement geometry on tractor–implement performance. *Soil & Tillage Research*. 2020. Vol. 199. P. 104–115.
9. Ashworth M., Desbiolles J., Tullberg J. Controlled Traffic and Conservation Agriculture. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 198. P. 105–125.
10. Grisso R. D., Kocher M. F., Vaughan D. H. Predicting tractor fuel consumption. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. Vol. 37(4). P. 531–540.
11. John Deere. Precision Ag Technology Guide. Moline, Illinois, 2022. 95 p.
12. Case IH. Agronomic Design: Energy Efficiency in Modern Tractors. Racine: Case IH Publishing, 2021. 48 p.

- 13.ISO 789-1:2018. Agricultural tractors — Test procedures for drawbar power — Part 1: Agricultural wheeled tractors. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 36 p.
- 14.Dvorak J., Kroulik M., Kurnhala F. Impact of tractor passes on soil properties and yield. *Plant, Soil and Environment*. 2020. Vol. 66. P. 183–190.
- 15.Renius K. T. Fundamentals of Tractor Design. Cham: Springer, 2020. 583 p.
- 16.Надикто В.Т. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві. Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок «ММД», 2005. - 337 с.
17. Надикто В.Т. Проблеми баластування колісних тракторів .Техніка і технології в АПК. - 2013. - №2. - С.7-9.
18. Надикто В.Т. Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів / В.Т. Надикто, О.В. Величко. Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. №1 (100).- Глеваха, 2015.
19. Надикто В.Т. Досвід поліпшення експлуатаційно-технологічних показників вітчизняних тракторів. Техніка АПК. - 2008.- №8.
20. Надикто В. Енергонасиченість тракторів та шляхи її реалізації. Техніка і технології АПК. - 2011. - N 9. - С.8-11