

УДК 631.37:633.85

№ держреєстрації 0121U109978

Інв. №: 01-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

Юридична адреса:

72310, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18; тел. (0619) 42 06 18

Фактична адреса:

69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66; тел. +38 099 6148302

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Таврійського
державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного,
канд. техн. наук, доцент

 Олександр ЛОМЕЙКО

«25» грудня 2025 р.




ЗВІТ

про науково-дослідну роботу
(остаточний)

**Програма: Розроблення технологічного регламенту вирощування
сільськогосподарських культур з використанням
елементів колійної системи землеробства**

Завідувач лабораторії,
д-р техн. наук

 В.Т. Надикто
«23» грудня 2025 р.

2025

Результати роботи розглянуто НТР НДІ МЗПУ,
протокол №4 від «24» грудня 2025 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми і
відповідальний виконавець -
доктор технічних наук



В. Надикто
(вступ, розділи 1, 2, 3,
висновки)

Відповідальний виконавець
доктор технічних наук



В. Кюрчев
(розділи 2, 3, висновки)

кандидат технічних наук



Є. Ігнат'єв
(участь у розділах 2, 3)

кандидат технічних наук



В. Мітков
(участь у розділах 2,3)

провідний інженер



Т. Рева
(участь у розділі 3)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 21 с., 6 рис., 4 табл., 6 джерел, 1 додаток

Об'єкт досліджень: процес буксування колісного трактора з урахуванням молекулярно-капілярних сил та сил внутрішнього тертя у ґрунті.

Мета роботи: установити шляхи зменшення буксування колісного трактора з урахуванням як його конструктивних параметрів, так і молекулярно-капілярних сил та сил внутрішнього тертя у ґрунті.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії вищої математики і тягової динаміки трактора. Експериментальні дослідження здійснювали з використанням орних машинно-тракторних агрегатів на основі енергетичних засобів тягових класів 1,4 та 3. Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням програмного середовища Mathcad 15.

В результаті досліджень встановлено наступне:

1. Розроблено аналітичну залежність, що дозволяє описати процес буксування коліс трактора з урахуванням як його конструктивних параметрів, так і параметрів ґрунту, включаючи молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя в ньому.
2. Установлена закономірність, згідно з якою більшим значенням коефіцієнтів тертя ковзання (f_{sk}), тертя спокою (f_p), опору коченню (f_k) та кута установки протектора шини (α) відповідають менші значення буксування трактора, при якому сили зсуву не перевищують молекулярно-капілярні сили зчеплення. При збільшенні значень параметрів, що характеризують молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя у ґрунті (τ_0 , $\text{tg}\psi$), ця закономірність має зворотний характер.
3. Чим більше вертикальне навантаження на колесо трактора, тим менше буксування воно може допустити без перевищення сил зсуву молекулярно-капілярних сил зчеплення і сил внутрішнього тертя в ґрунті. Отже, для більш важких тракторів допустиме буксування має бути меншим, ніж для більш легких.

КОЛІСНИЙ ТРАКТОР, ГРУНТ, БУКСУВАННЯ, ВЕРТИКАЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, МОЛЕКУЛЯРНО-КАПІЛЯРНІ СИЛИ, СИЛИ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ, ОПІР КОЧЕННЮ

ЗМІСТ

ВСТУП.	5
1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ.	6
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.	6
2.1 Теоретичні передумови	6
2.2 Методика теоретичних досліджень.....	7
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
3.1 Результати перевірки теоретичної залежності на адекватність.....	8
3.2 Результати теоретичних досліджень.....	9
ВИСНОВКИ.....	14
4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА 2021-2024 рр.....	15
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	19

ВСТУП

Під час дії коліс трактора на ґрунт у ній виникають деформації. Їх характер обумовлений дією зовнішніх і внутрішніх сил, що викликають зміщення частинок ґрунту відносно один одного. Через пластичність ґрунту навіть при малих тягових зусиллях колеса величина цього зсуву проявляється у вигляді залишкової деформації. Остання зумовлена зсувом і зрізом ґрунту.

Слід зазначити, що навіть при найменшому буксуванні колеса бічні грані протектора шини здійснюють зріз ґрунту в напрямку, зворотному руху трактора. Тому повністю позбутися цього виду деформації ґрунтового середовища не можна. Інша справа зріз того її шару, який знаходиться між двома проекторами. Гранично допустиме буксування колеса трактора повинно запобігати прояву такого зрізу ґрунту, так як при цьому має місце істотне руйнування як його структури, так і родючості.

Максимально допустиме значення буксування коліс трактора повинно унеможливити порушення структури ґрунту. А це відбувається тоді, коли сили зсуву в ґрунті перевищують молекулярно-капілярні сили і сили внутрішнього тертя, що діють в ній.

У цьому дослідженні аналізується розроблена аналітична залежність, що дозволяє описати процес буксування коліс трактора з урахуванням як його конструктивних параметрів, і параметрів ґрунту. У цей аналіз включені молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя в ній. В результаті встановлено закономірність, згідно з якою більш високим значенням коефіцієнтів тертя ковзання, тертя спокою, опору кочення і кута нахилу протектора шини відповідають менші значення буксування трактора, при якому сили зсуву не перевищують молекулярно-капілярні сили зчеплення і сили внутрішнього тертя.

Водночас, зі збільшенням значень параметрів двох останніх сил ця закономірність має зворотний характер. Дуже цікавий той факт, що чим більше вертикальне навантаження на колесо трактора, тим менше буксування воно може допустити без перевищення молекулярно-капілярних сил зчеплення і сил внутрішнього тертя в ґрунті. Отже, для більш важких тракторів допустиме буксування має бути меншим, ніж для легень. На підтвердження цьому з двох випробовуваних тракторів саме важчий (ХТЗ-17022) виявився здатним забезпечити буксування 15% і менше у більшості діапазонів зміни досліджуваних параметрів ґрунту і коліс.

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Дослідження процес буксування коліс трактора з урахуванням молекулярно-капілярних сил зчеплення і сил внутрішнього тертя у ґрунті

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Теоретичні передумови

У загальному випадку взаємозв'язок між молекулярно-капілярними силами і силами тертя у ґрунті може бути репрезентована наступним чином [1]:

$$p = \frac{\tau_o}{f_p - tg\psi}. \quad (1)$$

У цьому виразі p – тиск на ґрунт, Па. Він визначається діленням вертикального навантаження колісного рушія на площу його контакту з ґрунтом. Параметр τ_o – це молекулярно-капілярні сили зчеплення, віднесені до площі контакту колеса з ґрунтом, Па. Сили внутрішнього тертя ґрунту в формулі (1) представлені кутом тертя ψ , град. Параметр f_p – коефіцієнт тертя спокою, який враховує сили тертя і зчеплення у ґрунті.

Щоб уникнути руйнування структури ґрунту, її зріз між протекторами колеса в процесі буксування виключаємо. З урахуванням теоретичних перетворень, викладених у статтях [2, 3], формула для визначення дотичної сили тяги (F_k) колеса є такою:

$$F_k = 0.4 \cdot \frac{f_{sk} \cdot t_g \cdot G}{\delta \cdot L} \ln \left[\operatorname{ch} \left(\frac{2.5 \cdot \delta \cdot L}{t_g} \right) \right], \quad (2)$$

де f_{sk} – коефіцієнт тертя ковзання для ґрунту; t_g – крок ґрунтозачепу колеса, м; G , δ – вертикальне навантаження на колесо (Н) і його буксування відповідно; L – довжина п'ятна контакту шини колеса з ґрунтом, м.

У процесі руху колеса N протекторів його шини знаходяться у зачепленні з ґрунтом. Значення цього числа буде залежати від співвідношення конструктивних параметрів L і t_g :

$$N = \operatorname{Int} \left(\frac{L}{t_g} \right). \quad (3)$$

Бічна площа контакту ґрунтозачепів з ґрунтом (S_k) при цьому дорівнює:

$$S_k = \frac{N \cdot B_k}{\sin \alpha} = \operatorname{Int} \left(\frac{L}{t_g} \right) \cdot \frac{B_k}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

де B_k – ширина шини колеса, м; α – кут нахилу протектора на шині, град.

Для забезпечення руху колеса без зрізання ґрунту відношення дотичної сили тяги колеса до площі контакту S_k має бути не більшим за тиск p . Тобто:

$$\frac{F_k}{S_k} \leq p. \quad (5)$$

З урахуванням (1), (2) і (4) вираз (5) остаточно виглядатиме так:

$$\frac{0.4 \cdot f_{sk} \cdot t_g \cdot G}{\text{Int}(L/t_g) \cdot (B_k/\sin\alpha) \cdot \delta \cdot L} \ln \left[\text{ch} \left(\frac{2.5 \cdot \delta \cdot L}{t_g} \right) \right] - \frac{\tau_o}{f_p - \text{tg}\psi} \leq 0. \quad (6)$$

Присутній у формулі (6) параметр L визначається із виразу [2]:

$$L = R_k \cdot \left(\text{arctg} \frac{f_k \cdot \sqrt{1 - f_k^2}}{0.5 - f_k^2} + 2 \cdot f_k^2 \right), \quad (7)$$

де R_k – радіус кочення колеса, м; f_k – коефіцієнт опору коченню.

Значення коефіцієнтів f_{sk} і f_p можуть бути розраховані за наступними формулами [1]:

$$\left. \begin{aligned} f_{sk} &= 2.25 + 7.25 \cdot q - 6.96 \cdot \sqrt{q}; \\ f_p &= 5.95 + 27.83 \cdot q - 23.9 \cdot \sqrt{q}; \\ q &= \frac{G}{B_k \cdot L} \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

У підсумку, запропоноване рівняння (6) відтворює залежність буксування колеса трактора (δ) від його конструктивних параметрів (G, R_k, B_k, t_g, α) і параметрів ґрунту (f_{sk}, f) з урахуванням молекулярно-капілярних зчеплення (τ_o) та сил внутрішнього тертя ($\text{tg}\psi, f_p$) в ній.

2.2 Методика теоретичних досліджень

Перед проведенням теоретичних досліджень здійснювали перевірку виразу (6) на адекватність. Для цього порівнювали дійсне значення буксування орного агрегату з розрахованим за виразом (6). У дослідженнях використовували два орних МТА. Перший із них складався із трактора МТЗ-892 і трикорпусного плуга ПЛН-3-35. До складу другого входили трактор ХТЗ-17021 і плуг ПЛН-5-35.

Значення параметрів G, R_k, B_k, α, t_g для даних орних МТА брали із технічних паспортів тракторів і плугів. При виборі значень параметрів ґрунту $\tau_o, \text{tg}\psi$ і f_k використовували рекомендації, викладені у [1]. Буксування коліс трактора визначали експериментально за методикою, викладеною у [3]. Отримані при цьому значення разом з паспортними даними щодо параметрів R_k і B_k використовували для розрахунку значень параметра L [формула (7)], а також коефіцієнтів f_{sk} та f_p [система рівнянь (8)].

Отримані експериментальні значення параметра δ і розраховані за формулою (6) порівнювали між собою з допомогою коефіцієнта (k) стандартизації залишків [4, 5]. Згідно з цим методом теоретична залежність (модель) є адекватною за виконання умови: $-2 < k < 2$.

Після перевірки аналітичної залежності (6) на адекватність її використовували для проведення теоретичних досліджень впливу конструктивних параметрів трактора та ґрунту з урахуванням молекулярно-капілярних сил зчеплення та сил внутрішнього тертя у ньому.

Діапазон зміни параметрів, що входять до рівняння (6), представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Діапазони зміни досліджуваних параметрів

Параметр	Розмірність	Діапазон
f_{sk}		0,69-0,79
f_p		1,0-1,6
α	град	43-51
f_k		0,10-0,20
τ_o	кПа	1-3
$tg\psi$		0,74-0,86

Теоретичні дослідження з використанням виразу (6) здійснювали з урахуванням наступних двох умов:

$$\frac{0.4 \cdot f_{sk} \cdot t_g \cdot G}{\text{Int}(L/t_g) \cdot (B_k/\sin\alpha) \cdot \delta \cdot L} \ln \left[\text{ch} \left(\frac{2.5 \cdot \delta \cdot L}{t_g} \right) \right] - \frac{\tau_o}{f_p - tg\psi} = 0. \quad (9)$$

$$\delta_{max} \leq 15\%. \quad (10)$$

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати перевірки теоретичної залежності на адекватність

Вихідні дані, прийняті для розрахунку теоретичних значень буксування кожного із двох тракторів, представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для розрахунків

Параметр	Розмірність	Варіант МТА	
		1 (МТЗ-892)	2 (ХТЗ-17021)
Шини		16.9R38	23.1R26
G	Н	13650	25600
B_k	м	0,43	0,59
R_k	м	0,770	0,715
α	град	43	47
t_g	м	0,23	0,23
f_k		0,12	0,12
τ_o	Па	1000	1000
$tg\psi$		0,65	0,65

Зіставлення розрахункових значень параметра з експериментальними проводили за наступним алгоритмом (таблиця 3.2).

Для кожного з двох варіантів орного агрегату визначили різницю ($\Delta\delta$) між теоретичними та експериментальними значеннями буксування тракторів.

Таблиця 3.2. Результати перевірки рівняння (6) на адекватність

Показник	Варіант МТА	
	1	2
δ (розрахунок)	0,150	0.123
δ (експеримент)	0,140	0.130
Різниця ($\Delta\delta$)	0,010	-0.007
Стандарт (СКВ)	0,013	
$k = \text{СКВ}/\Delta\delta$	0,77	-0,53
Результат	$-2 < k < 2$	

Потім для цих різниць визначали середнє квадратичне відхилення (СКВ). Його значення становило ± 0.013 (див. таблиця 2.3). На наступному кроці визначали значення оцінного коефіцієнта стандартизації залишків (k). Аналіз набутих значень останнього показав, що вони знаходяться всередині діапазону $[-2; +2]$. А це, як зазначалося вище, однозначно вказує на адекватність оцінюваної аналітичної (теоретичної) моделі.

3.2 Результати теоретичних досліджень

Для подальшого аналізу приблизно оцінимо вертикальний тиск (S_v , Па) колеса кожного з тракторів на ґрунт. Для цього скористаємося такою залежністю:

$$S_v = \frac{G}{L \cdot B_k}. \quad (11)$$

Конкретні значення параметра S_v в кПа представлені у таблиці 3.3. Із їх аналізу однозначно випливає, що зростання вертикального навантаження на колесо для розглядуваних тракторів випереджає зростання опорної площі ($L \cdot B_k$), на яку це навантаження припадає. В результаті чим більше значення параметра G , тим більше тиск колеса на опорну поверхню (ґрунт).

Таблиця 3.3. Дані для визначення параметра S_v

Варіант МТА	G (Н)	B_k (м)	R_k (м)	f_k	L (м)	S_v (кПа)
1	13650	0,43	0,770	0,12	0,206	154
2	25600	0,59	0,715	0,12	0,191	227

Аналіз результатів розрахунків показує (рис. 3.1), що чим більше значення коефіцієнта тертя ковзання для ґрунту, тим меншим має бути значення буксування колеса для виконання умови (9). Причина такого результату у наступному. Чим більше значення параметра f_{sk} , тим меншими можуть бути молекулярно-капілярні сили зчеплення частинок ґрунту (τ_0). У цьому випадку умови (9) будуть виконуватися за меншого значення буксування коліс трактора.

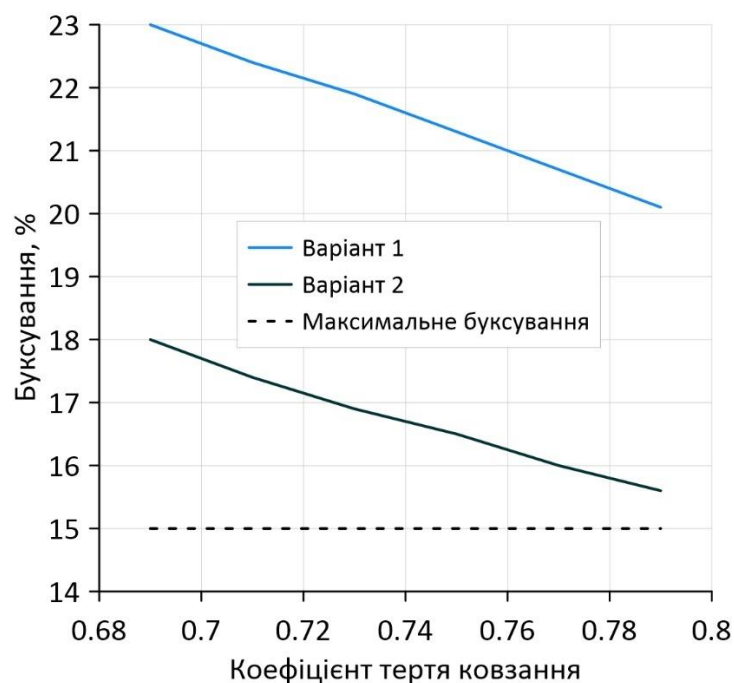


Рис. 3.1. Залежність буксування трактора від значення коефіцієнта тертя ковзання ґрунта

За збільшення тиску шини на ґрунт у вертикальному напрямку (параметр S_v) тому самому значенню параметра f_{sk} відповідає менше значення буксування колеса (див. рис. 3.1), при якому задовольняється умова (9).

Для МТА на основі тракторів МТЗ-892 і ХТЗ-17021 виконання умови (10) недосяжно за всіх значень f_{sk} . Звідси випливає, що ґрунт з коефіцієнтом тертя ковзання в діапазоні 0,69-0,79 при роботі даних агрегатів через порушення умови (10) буде постійно схильний до руйнівного впливу.

Характер впливу коефіцієнту тертя спокою (f_p) на буксування коліс трактора якісно такий же (рис. 3.2), як і вплив коефіцієнта f_{sk} (рис. 3.1).

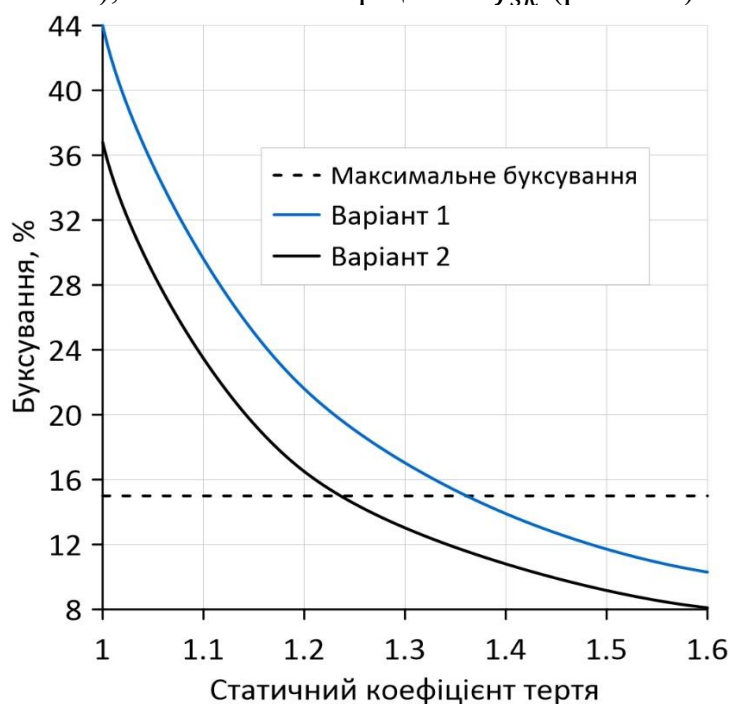


Рис. 3.2. Залежність буксування тракторів від значення коефіцієнта f_p

У кількісному вимірі вплив коефіцієнта f_p інтенсивніший. Особливо це помітно зі збільшенням значення f_p від 1,0 до 1,3. Причому, для орного агрегату за варіантом 1 умову (10) можна здійснити у найбільш вузькому діапазоні зміни значень коефіцієнта f_p , який дорівнює 1,35-1,60 (див. рис. 3.2).

Більше значення коефіцієнта опору коченню властиво м'якшому (пухкому) агротехнічному фону. У зв'язку з цим робота орного агрегату на ґрунті з вищим значенням параметра f_k характеризується (рис. 3.3) меншим значенням буксування трактора, за якого виконується умова (9).

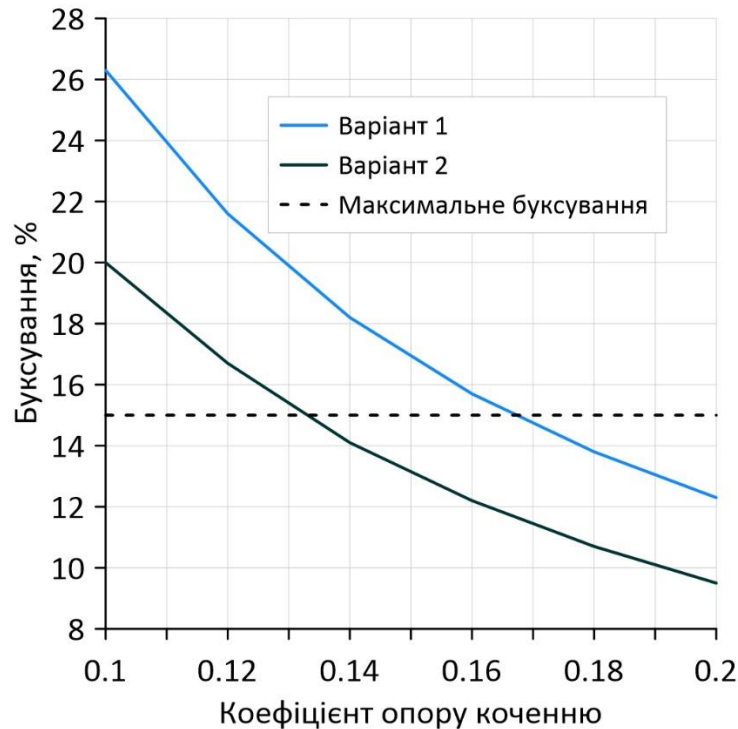


Рис. 3.3. Залежність буксування тракторів від значення коефіцієнта f_k

З іншого боку, ця ж умова виконується за меншого значення буксування коліс трактора у разі більш високого значення параметра S_v (див. Табл. 3.1). Відзначимо, що чим вище значення параметра S_v у трактора, тим у вузькому діапазоні значень коефіцієнта f_k виконується умова (10). Для трактора ХТЗ-17021 цей діапазон дорівнює 0,135-0,200, а трактора МТЗ-892 він ще: 0,17-0,20.

Як впливає із залежності (4), чим більший кут нахилу протектора до поздовжньої осі шини (α), тим менша бічна площа контакту ґрунтозачепів із ґрунтом (S_k). Наслідком цього є більше значення дотичної сили тяги, що розвивається колесом трактора. У результаті умова (9) виконується за меншого значення його буксування (рис. 3.4).

Що стосується умови (10), то в усьому діапазоні зміни значень параметра воно виконується для орного агрегату на базі трактора ХТЗ-17021. Унеможливити руйнування структури ґрунту орним агрегатом за варіантом 1 (трактор МТЗ-892) шляхом зміни кута нахилу протектора шини від 43 до 51о (параметр α) не можна.

Чим більше значення параметра τ_0 , тим більше молекулярно-капілярні сили зчеплення частинок ґрунту між собою. А це означає, що умова (9) може бути виконана за більшого значення буксування коліс трактора (рис. 3.5).

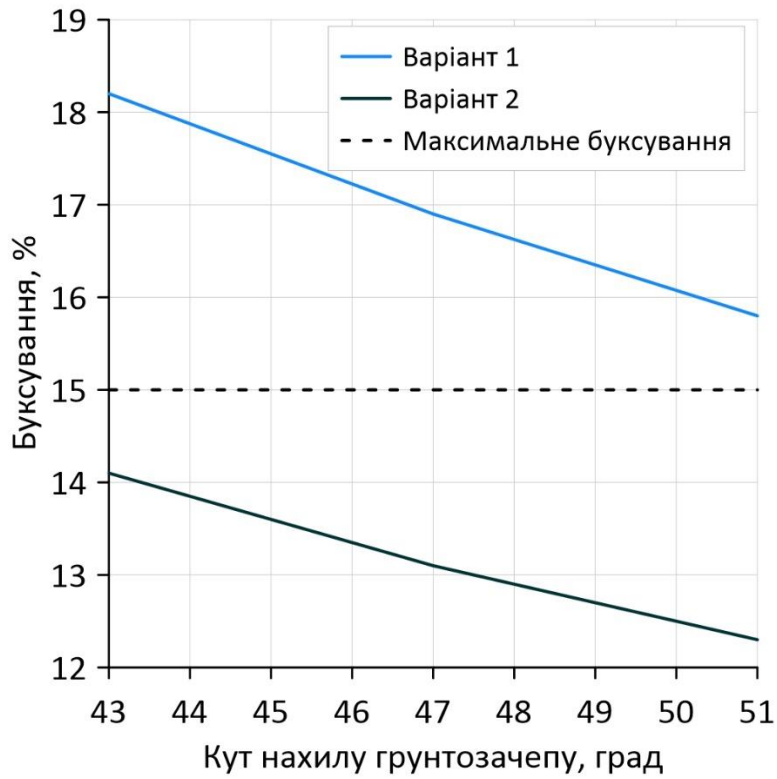


Рис. 3.4. Залежність буксування тракторів від кута нахилу ґрунтозачепу шини колеса

Причому, при тому самому значенні параметра τ_0 ця умова реалізовуватиметься з меншим значенням буксування для того трактора, тиск якого на ґрунт є меншим.

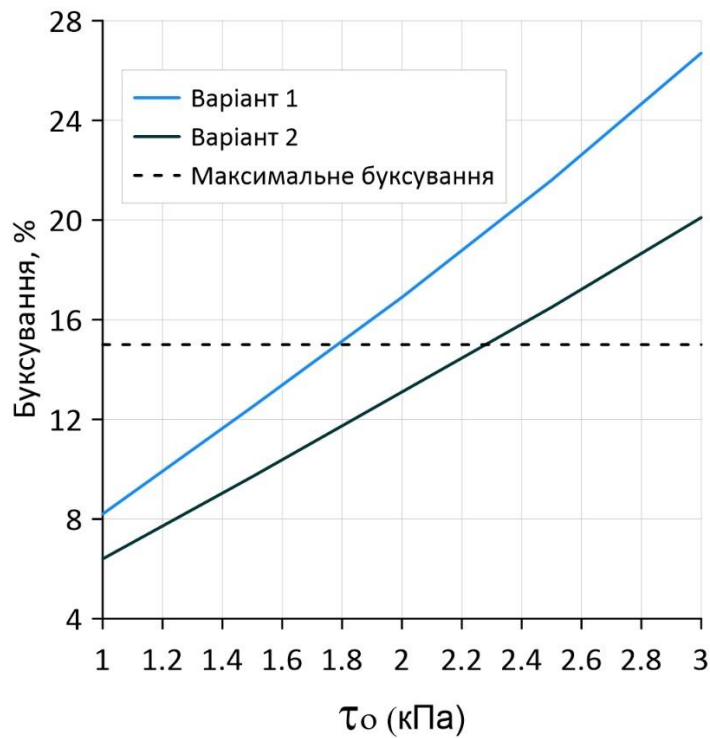


Рис. 3.5. Залежність буксування тракторів від параметра τ_0

Наприклад (див. рис. 3.5), при $\tau_0 = 1,8$ кПа умова (9) для орного агрегату на базі трактора МТЗ-892 виконується при буксуванні 15% і значення S_v для нього дорівнює 154 кПа. Для агрегату за варіантом 2 умова (9) виконується при буксуванні трактора 12% та $S_v = 227$ кПа.

Як показує аналіз результатів теоретичних розрахунків (рис. 3.6), що більше значення параметра $\text{tg}\psi$, то при більшому значенні буксування коліс трактора виконується умова (9).

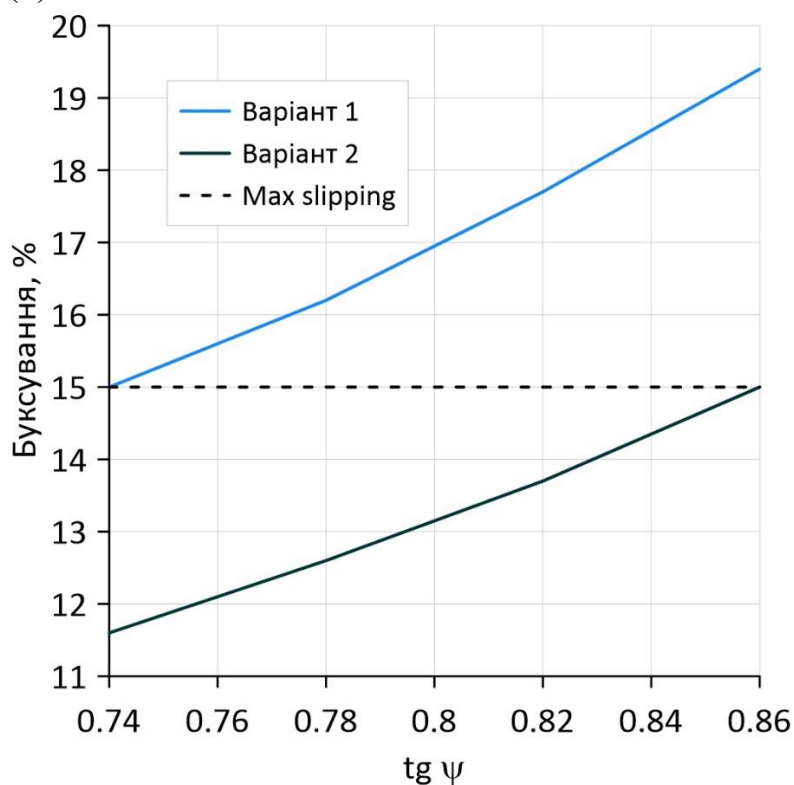


Рис. 3.6. Залежність буксування тракторів від параметра $\text{tg}\psi$

У принципі, причина такого результату потребує більш детального вивчення. Насамперед тому, що, як впливає з виразу (1), зміни параметрів $\text{tg}\psi$, τ_0 та f_p певним чином взаємообумовлені. Наприклад, більшому значенню параметра $\text{tg}\psi$ може відповідати вище значення коефіцієнта f_p . Причому зростання значення f_p у міру зростання значення $\text{tg}\psi$ може бути випереджаючим і так далі.

Однак, очевидним є той факт (див. 3.6), що за зміни значень параметра $\text{tg}\psi$ в діапазоні 0,74-0,86 умову (10) можна виконати тільки для орного агрегату за варіантом 2.

Загалом же з результатів наведених вище досліджень впливає, що збільшення вертикального навантаження на колесо трактора зумовлює менше його буксування. Цей результат досить повно збігається з тим, що описаний дослідниками у публікаціях [1, 6].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено аналітичну залежність, що дозволяє описати процес буксування коліс трактора з урахуванням як його конструктивних параметрів, так і параметрів ґрунту, включаючи молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя в ньому.
2. Установлена закономірність, згідно з якою більшим значенням коефіцієнтів тертя ковзання (f_{sk}), тертя спокою (f_p), опору коченню (f_k) та кута установки протектора шини (α) відповідають менші значення буксування трактора, при якому сили зсуву не перевищують молекулярно-капілярні сили зчеплення. При збільшенні значень параметрів, що характеризують молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя у ґрунті (τ_o , $\text{tg}\psi$), ця закономірність має зворотний характер.
3. Чим більше вертикальне навантаження на колесо трактора, тим менше буксування воно може допустити без перевищення сил зсуву молекулярно-капілярних сил зчеплення і сил внутрішнього тертя в ґрунті. Отже, для більш важких тракторів допустиме буксування має бути меншим, ніж для більш легких.
4. Перспективним напрямом подальших досліджень є вивчення балансу сил у ґрунті при буксуванні коліс трактора з урахуванням взаємозв'язку між такими її параметрами, як f_{sk} , f_p , f_k , τ_o і $\text{tg}\psi$.

4 ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ за 2021-2024 рр.

4.1 Результати досліджень за 2021 р.

Об'єкти досліджень: а) процес фізичного зносу культиваторних лап у процесі обробітку ними ґрунту;

б) процес функціонування МТА у полярній системі координат.

Мета роботи:

а) підвищення зносостійкості культиваторних лап для суцільного обробітку ґрунту;

б) підвищення універсальності застосування математичної моделі руху машинно-тракторного агрегату у горизонтальній площині шляхом використання полярної системи координат.

Отримані результати.

- коливання глибини обробітку ґрунту культиватором із досліджуваними лапами не здійснювали вплив на величину їх фізичного зносу. Найімовірніше він (знос) обумовлювався виключно тертям робочих поверхонь лап об оброблюваний ґрунт;
- на подальші ресурсно-зносіві дослідження заслуговують лапа ДП НІЦМЗН (знос 3,0 г) і 4 лапи ННЦ «ІМЕСГ» із середнім зносом 5,0 г. За контроль може бути прийнята лапа фірми Bellota Agrisolutions, фізичний знос якої становив 5,0 г;
- розроблена математична модель функціонування машинно-тракторного агрегату у полярній системі координат, яка дозволить одночасно аналізувати два різних види його руху. Один із них стосується переміщення МТА у поздовжньому напрямку і репрезентує його робочий хід на поля під час виконання тієї чи іншої технологічної операції. Другий вид руху стосується переміщення МТА зі значною кривизною траєкторії, що репрезентує його рух на поворотній смузі.

4.2 Результати досліджень за 2022 р.

Об'єкт досліджень: процес буксування рушіїв колісного трактора.

Мета роботи: виведення аналітичної залежності, яка б дозволила розрахувати максимально допустиму значину буксування коліс трактора з точки зору допустимого впливу його рушіїв на ґрунт.

Методи досліджень.

Особливістю методичного підходу при розв'язанні цієї проблеми є застосування у горизонтальній площині того обмеження тиску коліс трактора на ґрунт, яке регламентоване стандартом України у вертикальній лощині (ДСТУ 4521:2006). Указане обмеження використано для визначення максимально допустимого буксування рушіїв трактора з точки зору впливу розвинутої ним дотичної сили тяги на ґрунтове середовище.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для ґрунтів, середня значина коефіцієнта зім'яття якого приблизно дорівнює $4000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-3}$, середня значина коефіцієнта опору коченню – 0,16, а відношення допустимого тиску на ґрунт до радіуса коченню колеса – на рівні 222 кПа/м, максимально допустима значина буксування коліс трактора δ_{max} не повинна перевищувати 15%.

Об'єкт досліджень: орний агрегат у складі трактора тягового класу 3 серії ХТЗ-170 з двигуном ЯМЗ-236 і тензометричного плуга, обладнаного текроновими рольовими дошками і полицями.

Мета роботи: встановлення залежності впливу застосування текронових елементів плуга на його тягово-енергетичні показники.

Методи досліджень.

Лабораторно-польові випробування орного агрегату з плугом, обладнаним текроновими полицями і польовими дошками.

В результаті проведених досліджень встановлено, що застосування текронових полиць і польових дощок замість сталевих унеможливило залипання полиць вологим ґрунтом. За рахунок цього замість руху «ґрунт по ґрунту» має місце рух «ґрунт по поверхні полиці». Після заміни сталевих полиць і польових дощок текроновими тяговий опір плуга зменшується на 13,6%. Продуктивність роботи нового орного агрегату при цьому зростає на 12,6%, а імовірність дотримання агротехнічного допуску на глибину оранки ($\pm 2 \text{ см}$) збільшується з 88 до 93%.

4.3 Результати досліджень за 2023 р.

Об'єкт досліджень: процес прокладання слідів постійної технологічної колії (ПТК) колесами енергетичного засобу.

Мета роботи: забезпечення заданої глибини слідів ПТК шляхом раціонального поєднання конструктивних параметрів трактора з щільністю і твердістю оброблюваного ґрунтового середовища.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії подібності. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту за схемою 2^2 (два фактори на двох рівнях). Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті проведених досліджень:

1. Отримано аналітичну залежність, яка відтворює залежність глибини прокладання слідів постійної технологічної колії як від конструктивних параметрів трактора, так і від таких характеристик ґрунту, як його щільність і твердість.
2. Для отримання більшої глибини (h) слідів постійної технологічної колії (ПТК) агротехнічний фон першою чергою повинен мати низьку твердість ґрунту. Більш низька її щільність при цьому теж важлива, але її вплив на параметр h менший, ніж твердість.
3. Другим кроком у отриманні більшої глибини слідів ПТК є підвищення тиску повітря в шинах коліс трактора. Баластування коліс для вирішення цієї проблеми найменш ефективно, оскільки збільшення вертикального навантаження на них здійснює найменший вплив на величину параметра h .
4. Викладені у даному звіті результати використані при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень машинно-тракторних агрегатів для вирощування просапних культур із застосуванням ПТК, прокладених з кроком 8,4 м. У томі числі і при використанні технології «strip-till».

4.4 Результати досліджень за 2024 р.

Об'єкт досліджень: процес обґрунтування параметрів агрегатів для основного (оранка) і поверхневого (суцільна культивація зябу) обробітку ґрунту шляхом використання множників Лагранжа.

Мета роботи: забезпечення максимальної продуктивності роботи агрегатів для основного і поверхневого обробітку ґрунту шляхом обґрунтування їх ширини захвату і робочої швидкості руху методом множників Лагранжа.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії вищої математики і тягової динаміки трактора. Експериментальні дослідження здійснювали з використанням орного і культиваторного МТА на основі трактора серії ХТЗ-170. Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням програмного середовища Mathcad 15.

В результаті проведених досліджень:

1. На основі використання множників Лагранжа і лінійного характеру залежності буксування трактора від тягового зусилля розроблені аналітичні залежності, які дозволяють визначати оптимальні значення ширини захвату машин для оранки і безполицевого обробітку ґрунту. Визначившись із швидкістю руху ґрунтообробних агрегатів (V), ці залежності дають можливість розрахувати ту потужність двигуна трактора, яка забезпечує максимальну продуктивність роботи МТА.

2. Інтенсивність зниження ширини захвату орного агрегату (B) при збільшенні коефіцієнта питомого опору плуга (K_s) практично не залежить від глибини оранки (h). При зміні значення цього параметра в діапазоні 0.22-0.30 м, збільшення значення коефіцієнта K_s з 50 до 65 $\text{кН}\cdot\text{м}^{-2}$ вимагає зменшення значення параметра B на 23%.

3. Максимальна продуктивність роботи трактора з плугом має місце при мінімально можливих значеннях параметрів K_s , h і V . Досягається такий результат за рахунок збільшення ширини захвату орного агрегату. Водночас, максимальна продуктивність роботи трактора з культиватором досягається при максимально можливих значеннях параметрів K_s та V і дорівнює $8.6 \text{ га}\cdot\text{год}^{-1}$. Порівняно з варіантом мінімальних значень параметрів K_s і V це на 28.4% більше.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guskov V.V. et al. Tractors: Theory. Moscow: Mashinostroenie (in Russian), 1988. 376 p.
2. Bulgakov V. et al. Theoretical study of the conditions of the maximum allowable slipping of wheel tractors. *Agronomy Research*, 2023. Vol. 21, № 1. P. 28–38.
3. Bulgakov V. et al. Maximum admissible slip of tractor wheels without disturbing the soil structure. *Applied Science*, 2021. Vol. 11, № 15. P. 6893.
4. Harrel F.E. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis*. New York: Springer, 2001. Vol. 608. 571 p.
5. Green W.H. The Econometric Approach to Efficiency Analysis. The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Growth. 2008. Vol. 1, № 1. P. 92–251.
6. Shafaei S.M., Loghavi M., Kamgar S. Fundamental realization of longitudinal slip efficiency of tractor wheels in a tillage practice. *Soil and Tillage Research*. Elsevier, 2021. Vol. 205. P. 104765

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ
виросування сільськогосподарських культур
з використанням елементів колійної системи землеробства

1 Загальні положення

1.1 Колійна система землеробства передбачає організацію руху машинно-тракторних агрегатів (МТА) по постійних технологічних коліях (ПТК), що формуються колесами енергетичних засобів.

1.2 Основною метою застосування ПТК є обмеження площі ущільнення ґрунту, збереження його структури та родючості, зниження енергетичних витрат і підвищення стабільності агрофізичних властивостей орного шару.

1.3 Регламент встановлює вимоги до ґрунтових умов, тракторів, машин, параметрів ПТК та режимів роботи МТА.

2 Вимоги до ґрунтових умов

2.1 Роботи з використанням елементів колійної системи допускається виконувати за умови, що дотичні сили тяги коліс не перевищують молекулярно-капілярні сили зчеплення та сили внутрішнього тертя ґрунту.

2.2 Допустиме буксування коліс тракторів повинно знаходитись у межах:

- для тракторів тягових класів 1,4 – не більше 15%;
- для тракторів тягових класів 3 – не більше 12%.

2.3 Граничний тиск коліс на ґрунт повинен відповідати вимогам ДСТУ 4521:2006 та враховувати щільність і твердість ґрунту.

3 Вимоги до тракторів

3.1 Для роботи за колійною системою рекомендується застосовувати колісні трактори тягових класів 1,4 та 3 з можливістю регулювання тиску повітря в шинах.

3.2 Основним засобом регулювання глибини слідів ПТК є зміна тиску повітря в шинах. Баластування коліс допускається лише як допоміжний захід.

3.3 Вертикальне навантаження на колесо повинно забезпечувати мінімальне буксування без порушення структури ґрунту.

4 Вимоги до постійної технологічної колії

4.1 Крок постійної технологічної колії встановлюється залежно від ширини захвату агрегатів і рекомендується на рівні 8,4 м.

4.2 Глибина слідів ПТК формується з урахуванням твердості та щільності ґрунту. Першочерговий вплив має твердість ґрунту.

4.3 Повторний рух МТА повинен здійснюватися виключно по сформованих слідах ПТК.

5 Вимоги до машин і знарядь

5.1 Сільськогосподарські машини повинні бути адаптовані до роботи в міжколіїному просторі без виходу коліс за межі ПТК.

5.2 Конструкція знарядь має забезпечувати стабільну глибину обробітку та мінімальний питомий опір.

5.3 Ширина захвату машин повинна бути кратною відстані між коліями.

6 Вимоги до режимів роботи МТА

6.1 Робоча швидкість руху МТА встановлюється з урахуванням допустимого буксування та тягових можливостей трактора.

6.2 Забороняється робота агрегатів у режимах, що призводять до перевищення граничного буксування.

6.3 Контроль буксування здійснюється експериментальними або розрахунковими методами.

7 Оптимізація параметрів агрегатів

7.1 Оптимізація ширини захвату та швидкості руху агрегатів виконується методом множників Лагранжа.

7.2 Критерієм оптимізації є максимальна продуктивність МТА за умов обмеження потужності двигуна і допустимого буксування.

7.3 Отримані оптимальні параметри використовуються при проектуванні та виборі складу агрегатів.

8 Заключні положення

8.1 Дотримання вимог даного регламенту забезпечує зниження деградації ґрунту та підвищення енергетичної ефективності виробництва.

8.2 Регламент може бути використаний як основа для розроблення галузевих нормативних документів та методичних рекомендацій.

8.3 Допускається уточнення параметрів регламенту з урахуванням конкретних ґрунтово-кліматичних умов.