DOI https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-12
УДК 631.372

В. Т. Надикто[1], д-р техн. наук ORCID: 0000-0002-1770-8297
В. М. Кюрчев[1], д-р техн. наук ORCID: 0000-0003-4377-1924
С. П. Погорілий[2], д-р техн. наук ORCID: 0000-0002-9701-2678
[1] Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
[2] Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України
e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ ЕНЕРГОНАСИЧЕНОСТІ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА НА СИЛУ ОПОРУ ЙОГО КОЧЕННЮ

Анотація. Метою роботи є з'ясування впливу енергонасиченості колісного трактора на величину сили опору його коченню. Для її досягнення проведено теоретичні й експериментальні дослідження з використанням основ теорії трактора щодо закономірностей перебігу його тягового балансу. У підсумку здійснено аналіз функціонального ланцюжка у вигляді «збільшення рівня енергонасиченості трактора (параметр $E_н$) – зростання швидкості руху енергетичного засобу (параметр V) – зростання тягового опору агрегата (параметр $P_{кр}$)». Установлено, що зростання значення сили $P_{кр}$ від параметра V за законом параболи за певних умов може викликати як зменшення, так і збільшення значення сили опору коченню трактора. Зростання рівня параметра $E_н$ залежно від зумовленого цим процесом збільшення швидкості руху енергетичного засобу може спричиняти як зростання, так і зменшення сили опору його кочення (P_f). За умови паритетного впливу зміни значень параметрів $E_н$ і V на величину сили P_f її значення може бути інваріантним відносно зміни рівня енергонасиченості трактора. Установлення однозначності впливу рівня енергонасиченості трактора на величину його опору коченню потребує проведення фундаментальних наукових досліджень.

Ключові слова: тяговий баланс, тягове зусилля, тяговий опір, рушій, швидкість руху, вертикальне навантаження.

Постановка проблеми. Однією з важливих характеристик будь-якого трактора є тяговий баланс [1]. Найбільш повний перелік й аналіз його складників викладений у [2]. Для практичного застосунку тяговий баланс доцільно розглядати через призму особливостей режиму функціонування машинно-тракторного агрегата (далі – МТА). Їх сутність полягає в такому: а) швидкість руху більшості агрегатів у межах 5–12 км/год; б) режим руху максимально наближений до усталеного; в) незначний (до 3°) схил профілю більшості полів. З огляду на це, тяговий баланс трактора зводиться до досить тривіального аналітичного виразу [1–3]:

$$P_к = P_f + P_{кр},. \quad (1)$$

де $P_к$ – дотична сила тяги трактора, кН;
P_f – сила опору коченню енергетичного засобу, кН;
$P_{кр}$ – сила тягового опору трактору, кН.

Аналіз останніх досліджень. Як показує аналіз рівняння (1), що більша сила P_f, то більшу дотичну силу тяги має реалізовувати трактор за умови незмінності сили $P_{кр}$. З огляду на це, зменшення значення сили опору коченню енергетичного засобу було й залишається одним із найважливіших завдань його експлуатації. Нині її актуальність зумовлена зародженням в усьому світі, а в Україні, зокрема, тягово-енергетичної концепції тракторобудування [4]. Згідно з її положеннями, енергонасиченість колісних тракторів у 2030 році може сягнути позначки щонайменше 25 кВт/т [5].

© В. Т. Надикто, В. М. Кюрчев, С. П. Погорілий, 2025

Поряд з перевагами ця концепція вимагає розроблення відповідної системи агрегатування енергетичних засобів. Одним із її положень є з'ясування впливу енергонасиченості трактора на силу опору коченню. До того ж наукових результатів, направлених на розв'язання цієї проблеми, майже немає.

Мета дослідження – з'ясувати вплив енергонасиченості колісного трактора на величину сили опору його коченню.

Результати досліджень. Досить часто з достатньою для практики точністю силу опору коченню трактора виражають як добуток його сили ваги (G) на коефіцієнт опору коченню (f), тобто $P_f = f \cdot G$. Водночас за більш предметного розгляду цієї залежності її прийнято виражати загальновідомим рівнянням, яке випливає з формули Гранвуане-Горячкіна для одиночного колісного рушія:

$$P_f = 0{,}86 \cdot \sqrt[3]{\frac{G_к^4}{k \cdot b \cdot D^2}}, \tag{2}$$

де $G_к$ – вертикальне навантаження на колісний рушій, кН;

k – коефіцієнт об'ємної деформації ґрунту, кН/м^3;

b, D – ширина і діаметр шини колеса відповідно, м.

У джерелі [2] ця залежність більш інформативна, але й більш складна:

$$P_f = k \cdot b \cdot h^2 + k_ш \cdot G_к \cdot \sqrt[3]{\frac{h_ш}{D}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu \cdot G_к \cdot k_s \cdot h_ш}{D}, \tag{3}$$

де h – глибина колії після проходу рушія, м;

$k_ш$ – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від матеріалу шини, конструкції її каркаса та інших факторів (визначається експериментально);

$h_ш$ – величина прогину шини колеса, м;

μ – коефіцієнт тертя протектора шини по опорній поверхні;

k_s – кінематичний коефіцієнт, що враховує відмінність поверхні реальної шини від циліндричної, а також нахил площини обертання колеса до поверхні кочення.

Практичне застосування залежності (3) суттєво обмежують коефіцієнти $k_ш$ і k_s. Для отримання їх значень потрібно провести серію досить складних і трудомістких експериментальних досліджень.

Ураховуючи залежності, які визначають глибину колії (параметр h) та прогин шини колеса (параметр $h_ш$), отримано такий вираз для визначення сили опору коченню одиночного рушія:

$$P_f = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot G_к^4 \cdot \rho \cdot \sqrt{2r \cdot b}}{k_1 \cdot b \cdot D \cdot \left(\sqrt[3]{b \cdot k_1^2 \cdot G_к} + \pi \cdot \rho \cdot \sqrt{2r \cdot D} \right)}}. \tag{4}$$

У виразі (4) прийнято такі позначення: ρ – тиск повітря в шині, кПа; r – радіус шини колеса в поперечному розрізі, м; k_1 – твердість ґрунту, кПа.

Вплив більшості параметрів, які входять до виразів (2)–(4), досліджено й викладено в роботах [6–8]. Аналіз їх матеріалів, а також формул (2)–(4), засвідчує, що сила опору коченню трактора безпосередньо не залежить ні від потужності двигуна (N_e), ні від його (трактора) енергонасиченості ($E_п$). Утім, такий функціональний зв'язок є. У роботі [9] розглядається така залежність:

$$N_e = \frac{(P_{кр} + P_f) \cdot V \cdot G}{\eta_{тр} \cdot \left[G \cdot (1 - a) - P_{кр} \cdot b \right]}, \tag{5}$$

де V – швидкість руху трактора, м/с;

$\eta_{тр}$ – ККД трансмісії трактора;

a, b – константи лінійної апроксимації залежності буксування трактора від сили $P_{кр}$.

 ISSN 2220-8674

Коли врахувати, що $E_н = N_e/G$, то із залежності (5) після відповідних перетворень отримаємо таке:

$$P_f = \frac{E_н \cdot \eta_{тр} \cdot G \cdot (1-a) - P_{кр} \cdot (E_н \cdot \eta_{тр} \cdot b + V)}{V}. \quad (6)$$

На перший погляд, у цьому рівнянні сила опору коченню трактора (P_f) безпосередньо й однозначно залежить від енергонасиченості трактора ($E_н$). А саме: що більше значення параметра $E_н$, то більше значення сили P_f. Насправді це не так однозначно. Нагадаємо, що головною метою зростання енергонасиченості трактора є перспектива збільшення його швидкості руху в складі того чи іншого МТА. З огляду на це, з аналізу рівняння (6) випливає таке. Збільшення значення параметра $E_н$ сприяє зростанню значення сили P_f. Водночас спричинене ростом енергонасиченості трактора збільшення швидкості його руху (параметр V) зумовлює зменшення значення цієї сили. У підсумку можливі три варіанти отримуваного результату:

1) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зростання* сили опору його коченню. Це можливо за випереджального збільшення значення параметра $E_н$ порівняно зі зростанням значення параметра V;

2) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зменшення* сили опору його коченню. Цього можна досягнути за умови випереджального зростання значення параметра V відносно збільшення параметра $E_н$;

3) значення сили опору коченню трактора *інваріантне* відносно зміни рівня його енергонасиченості. Такий результат матиме місце за умови паритетного впливу зміни значень параметрів $E_н$ і V на P_f.

Проблема полягає в тому, що нині науковій спільноті невідомий закон зміни швидкості руху трактора в залежності від збільшення рівня його енергонасиченості. З огляду на це, у подальшому аналізі спробуємо установити приблизний характер функціонального зв'язку $V = f(E_н)$.

З урахуванням тягового балансу трактора (1) рівень його енергонасиченості можна виразити так:

$$E_н = \frac{N_e}{G} = \frac{P_к \cdot V}{G} = \frac{(P_f + P_{кр}) \cdot V}{G}.$$

Звідси можна записати, що:

$$V = K \cdot E_н,. \quad (7)$$

де $K = G/P_f + P_{кр}$ – безрозмірний коефіцієнт.

Якщо тепер вираз (7) підставити у (6), то в підсумку отримаємо, що:

$$P_f = \frac{\eta_{тр} \cdot G \cdot (1-a) - P_{кр} \cdot (\eta_{тр} \cdot b + K)}{K}. \quad (8)$$

Аналізуючи вираз (8), не важко помітити, що величина сили P_f взагалі не залежить від рівня енергонасиченості трактора. Та чи відповідає це дійсності?

Із курсу теорії сільськогосподарських машин відомо, що тяговий опір ґрунтообробного знаряддя залежить від швидкості його руху [10]. Причому за нелінійним законом. Приведемо підтвердження цього факту на основі аналізу даних, отриманих для орного МТА в складі трактора ХТЗ-17021 та п'ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 (рис. 1).

У цьому дослідженні швидкість руху орного МТА змінювали від 6 до 10 км/год шляхом добору відповідної передачі. Тяговий опір плуга реєстрували за допомогою установленої на орному знаряддя спеціальної тензометричної ланки (див. рис. 1).

Необхідні для контролю буксування оберти коліс реєстрували за допомогою установлених на передньому лівому рушії трактора герметичних контактів (герконів). Режим руху орного

Рис. 1. Орний МТА на основі трактора ХТЗ-17021

МТА добирали таким, щоб максимальне значення буксування трактора ХТЗ-17021 не перевищувало δ = 15 %. У такому разі для цього трактора маємо лінійну функціональну залежність $\delta = a \cdot P_{кр} + b$. Значення констант апроксимації при цьому такі: $a = 0{,}27$; $b = 0{,}04$ [9].

Електричні сигнали від тензометричної ланки та герконів записували на microSD, яка була установлена у вимірювальному комплексі на базі Arduino Uno. Оцифровані результати вимірювань обробляли в програмному середовищі Microsoft Excel.

За результатами досліджень з'ясовано, що залежність тягового опору плуга ПЛН-5-35 від швидкості руху МТА в діапазоні 6–10 км/год задовільно (з коефіцієнтом детермінації 0,98) апроксимується параболічною залежністю (рис. 2). Майже всі експериментальні дані функції $P_{кр} = f(V)$ потрапляють у довірчий інтервал, визначений статистичним рівнем значущості 0,05.

За такого результату є всі передумови стверджувати про існування функціонального ланцюжка такого виду:

«*збільшення* $E_н \rightarrow$ зростання $V \rightarrow$ зростання $P_{кр}$».

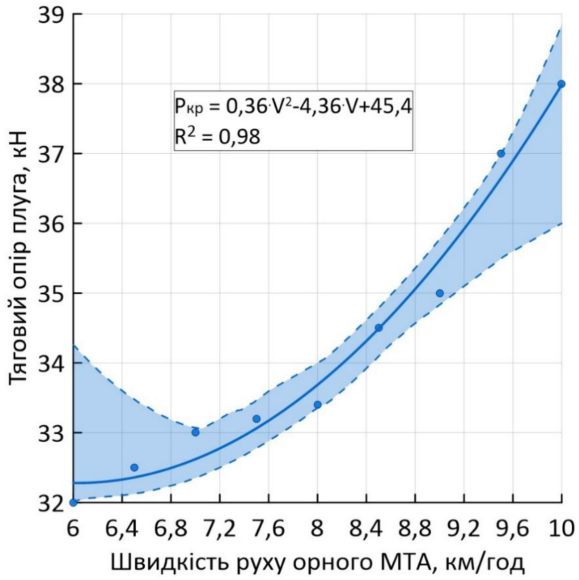

Рис. 2. Залежність тягового опору плуга від швидкості руху орного МТА в межах 6–10 км/год

 ISSN 2220-8674

Результатом дії цієї закономірності, як засвідчує аналіз рівняння (8), мало б бути зменшення значення сили P_f. Тобто величина останньої тим менша, чим більше значення сили $P_{кр}$. Водночас, як випливає з природи коефіцієнта K [вираз (7)], його значення залежить від сили $P_{кр}$. З огляду на це, однозначно стверджувати про те, що зростання тягового опору знаряддя зумовлює зменшення сили опору коченню трактора не можна. Як не можна безпідставно стверджувати й про протилежний результат – збільшення сили P_f.

Неврахування факту зростання швидкості руху МТА (параметр V) завдяки підвищенню рівня енергонасиченості трактора (параметр $E_н$) привело авторів роботи [11] до принципово помилкового висновку. Згідно з виведеним ними рівнянням збільшення рівня енергонасиченості трактора зумовлює зменшення сили опору коченню трактора:

$$P_f = \frac{f \cdot V \cdot g \cdot P_к}{\eta_{тр} \cdot E_н}. \quad (9)$$

Цей постулат вони рекомендують ураховувати при проєктуванні енергонасичених тракторів. Водночас при аналізі рівняння (9) не було враховано, що збільшення енергонасиченості трактора потенційно зумовлює підвищення швидкості його руху. А оскільки при цьому вплив параметрів $E_н$ і V на значення сили P_f у формулі (9) протилежний, то, як і в проаналізованому нами випадку вище, отримуємо три аналогічні варіанти. Перші два з них мають дещо іншу інтерпретацію. А саме:

1) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зменшення* сили опору його коченню. Цього досягнути можна за випереджального збільшення значення параметра $E_н$ порівняно зі зростанням значення параметра V;

2) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *збільшення* сили опору його коченню. Таке можливе за умови випереджального зростання значення параметра V відносно збільшення параметра $E_н$.

Суть третього варіанта, який, найімовірніше, варто вважати скоріше випадковим і перехідним, ніж закономірним, в обох випадках залишається такою ж.

Як бачимо, достовірність висунутого авторами роботи [11] постулату можлива лише за прояву умов першого варіанта. Але доказів цього факту в указаному джерелі немає. Інших спроб з'ясувати вплив підвищення рівня енергонасиченості трактора на силу опору його кочення в наукових джерелах авторами цієї статті не виявлено.

Та попри це, підвищення рівня енергонасиченості трактора – це не абстрактний шлях реалізації його тягово-енергетичної концепції, а вимоги сьогодення. Хоча б тому, що супроводжуване підвищенням енергонасиченості трактора зростання швидкості його робочого руху створює передумови для підвищення продуктивності роботи МТА. А таке завдання було, є і в оглядовому майбутньому постійно залишатиметься актуальною.

Інше діло – доцільний рівень збільшення значення параметра $E_н$ для трактора тягово-енергетичної концепції. Що стосується методичних основ розв'язання цієї проблеми, то вони досить предметно викладені в публікації [4].

Висновки. Зростання рівня енергонасиченості трактора (параметр $E_н$) залежно від зумовленого цим процесом збільшення швидкості руху енергетичного засобу (параметр V) може зумовлювати як зростання, так і зменшення сили опору його кочення (P_f).

За умови паритетного впливу зміни значень параметрів $E_н$ і V на величину сили P_f її значення може бути інваріантним відносно зміни рівня енергонасиченості трактора.

Установлення однозначності впливу рівня енергонасиченості трактора на величину його опору коченню потребує проведення фундаментальних наукових досліджень. Високий пріоритет цього завдання зумовлений прогресувальним у всьому світі напрямом практичної реалізації тягово-енергетичної концепції трактора.

Список використаних джерел

1. Білоконь Я. Ю., Окоча А. І., Войцехівський С. О. Трактори та автомобілі : підручник. Київ : *Вища освіта*. 2003. 560 с.
2. Кутьков Г. М. Трактори і автомобілі. Технологічні властивості. М. : КолосС. 2004. 504 с.
3. Macmillan R.H. The Mechanics of Tractor-Implement Performance: Theory and Worked Examples. *University of Melbourne*. 2002. 166 с.
4. Надикто В. Т. Визначення раціонального рівня енергонасиченості колісних тракторів. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 6. С. 64–71.
5. Надикто В. Т., Величко О. В. Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2015. Вип. 1 (100). С. 147–151.
6. Gent Alan Neville and Walter Joseph D. Pneumatic Tire. *Mechanical Engineering Faculty Research*. 2006. 854 p. https://ideaexchange.uakron.edu/mechanical_ideas/854
7. Sauret C., Bascou J., de Saint Remy, N., Pillet H. et.al. Assessment of field rolling resistance of manual wheelchairs. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2012. Vol. 49. Issue 1. P. 63–74.
8. Wiegand B. P. Estimation of the rolling resistance of tires. *SAE Technical Paper*. 2016. № 2016-01-0445
9. Nadykto V., Golub G., Hutsol T. et al. Optimization of the parameters of tillage units. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 10074.
10. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. та ін. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. Київ : Вища освіта, 2005. 464 с.
11. Гуськов В. В., Вєлєв Н. Н., Атаманов Ю. Є. та ін. Трактори: теорія. М. : Машинобудування, 1988. 376 с.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2025
Стаття прийнята 22.10.2025
Статтю опубліковано 22.12.2025

V. Nadykto[1], V. Kyurchev[1], S. Pohorilyi[2]
[1] Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
[2] Institute of Mechanics and Automatics of agroindustrial production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

DETERMINING THE INFLUENCE OF THE WHEELED TRACTOR ENERGY SATURATION LEVEL ON ITS ROLLING RESISTANCE

Summary

The goal of this article is to investigate the impact of energy saturation on the magnitude of rolling resistance in a wheeled tractor. Theoretical studies were conducted using the basics of tractor theory in terms of the regularities of its traction balance. Experimental studies were performed using strain gauge equipment and the Arduino Uno microcontroller. Experimental data were processed in Microsoft Excel and Grapher 17 software and graphics environments. The functional chain was analyzed in the form of "increase in the level of tractor energy saturation (parameter E_n) – increase in the speed of the energy vehicle movement (parameter V) – increase in the traction resistance of the unit (parameter P_{kp})". It was established that an increase in the value of the force P_{kr} from the parameter V, according to the law of the parabola, under certain conditions can cause both a decrease and an increase in the value of the tractor's rolling resistance force. An increase in the level of the parameter E_n, resulting from the speed of movement of the energy vehicle, can cause both an increase and a decrease in the force of its rolling resistance (P_f). Under the condition of parity, the influence of changes in the values of the parameters E_n and V on the value of the force P_f can be invariant with respect to changes in the level of tractor energy saturation. Establishing the uniqueness of the influence of the level of tractor energy saturation on the value of its rolling resistance requires conducting fundamental scientific research.

***Keywords*:** traction balance, traction force, traction resistance, engine, speed, vertical load.