

# Вісник

## аграрної науки

ISSN 2542-4371

2024

БІОТЕХНОЛОГІЇ, ГЕНЕТИКА ТА АГРОНОМІЯ

РОСЛИННИЦТВО, ЖИВІТНИЦТВО

ПЕДАГОГІКА, ВЕТЕРИНАРНА МЕДИЦИНА

ГЕНЕТИКА, СЕЛЕКЦІЯ, БІОТЕХНОЛОГІЇ

МЕДИЦИНА, ЕКОЛОГІЯ

АГРОНОМІЯ, ПЕДАГОГІКА, ВЕТЕРИНАРНА

МЕДИЦИНА ТА СІЛЬСЬКА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ

ІНЖЕНЕРИЯ



# Механізація, електрифікація

УДК 631.372

© 2024

## **ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РІВНЯ ЕНЕРГОНАСИЧЕНОСТІ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ**

*В.Т. Надикто*

*доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН*

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*імені Дмитра Моторного Міносвіти України*

*вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69063, Україна*

*e-mail: nadyktonvt@meta.ua;*

*ORCID: 0000-0002-1770-8297*

*Надійшла 24.04.2024*

**Мета.** Визначити рівень енергонасиченості колісного трактора, що дасть змогу використовувати такий трактор максимально ефективно — насамперед у складі тягових машинно-тракторних агрегатів, які мають можливість досягти заданого рівня завантаженості двигуна трактора за потужністю. **Методи.** Теоретичні дослідження проводили з використанням основ вищої математики, теорії тягової динаміки трактора, які розглядають процес перекочування еластичного колеса по деформованій ґрунтовій поверхні, описують суть тягової і перспективи тягово-енергетичної концепції розвитку мобільних тягових засобів стосовно рівня їх енергонасиченості. Розрахунки здійснювали у програмному середовищі Mathcad 15.0 із застосуванням аналітичних залежностей, які відображають вплив конструктивних параметрів трактора і характеристик ґрунтового середовища на максимальне значення дотичної сили тяги енергетичного засобу при заданому рівні буксування його рушіїв. **Результати.** Проаналізовано аналітичну залежність енергонасиченості колісного трактора від параметрів, які визначають стан оброблюваного тяговим агрегатом агротехнічного фону (коефіцієнти опору коченню, буксування, тертя ковзання ґрунту) за різних швидкісних режимів. **Висновки.** За швидкості робочого руху тягового агрегату до 4 м/с (14,4 км/год) енергонасиченість трактора не має перевищувати 17 кВт/т. За реально-го швидкісного режиму його роботи на рівні 2 м/с (7,2 км/год) бажане значення цього показника у два рази менше. Поступове збільшення частки агротехнічних фонів із більшими значеннями їх опору коченню колісного рушія сприяє використанню тракторів із меншим (9 – 10 кВт/т) рівнем енергонасиченості. За умови збереження структури ґрунту внаслідок обмеження максимального значення буксування рушіїв колісних енергетичних засобів до 15% достатнім рівнем їх енергонасиченості є

**9–10 кВт/т. У разі зменшення максимально допустимого значення буксування до 10–12% рівень енергонасиченості тракторів може (і має) бути ще меншим. За невеликого (9–10 кВт/т) рівня енергонасиченості колісних тракторів найраціональнішим методом підвищення продуктивності роботи тягових агрегатів є використання їх широкозахватних і комбінованих варіантів із широким застосуванням подвоєних/потроєних або аروحних рушіїв із низьким тиском повітря у їх шинах.**

**Ключові слова:** трактор, потужність двигуна, експлуатаційна маса, швидкість руху, буксування.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202406-08>

Одним із способів підвищення продуктивності роботи того чи іншого машинно-тракторного агрегату (МТА) є збільшення швидкості його робочого руху. Щоправда, таке технологічне рішення висуває відповідні вимоги до потужності двигуна трактора ( $N_e$ , кВт) [1]. Впродовж останніх років у світі спостерігається тенденція до випуску енергетичних засобів із високим значенням параметра  $N_e$ . Так, за інформацією Швейцарської асоціації сільськогосподарської техніки SVLT, потужність двигуна окремих тракторів зросла до 710 кВт і навіть більше. І це показово, оскільки таку прогресуючу тенденцію зумовлює попит на потужні трактори серед аграріїв. Що стосується вітчизняних сільгоспвиробників, то попит на потужні трактори зумовлюють розміри (відносно велика площа) та конфігурація (вирівняність профілю і довжина гонів) полів.

За ходовою системою у світі, і в Україні зокрема, переважають колісні енергетичні засоби формул 4К4а і 4К4б. Причому в тракторів першої формули діаметр передніх керованих коліс поступово збільшується, наближаючись до діаметра задніх рушіїв. Таке конструктивне рішення забезпечує можливість збільшити допустиме вертикальне навантаження на колеса до 40–45% від експлуатаційної маси трактора. За старим (але поки що чинним) типажем СТ СЕВ 628-85 склад тракторів обох колісних формул в основному репрезентують енергетичні засоби тягових класів 2, 3 і 5.

Якщо потужність двигуна трактора  $N_e$  визначає швидкісний режим його роботи,

то експлуатаційна маса ( $G$ , т) — тяговий. Відношення цих параметрів характеризує такий важливий показник, як рівень енергонасиченості ( $E_p$ , кВт/т) трактора:

$$E_p + N_e/G.$$

Донедавна колісні трактори проектувалися в рамках тягової концепції. Відповідно до її положень рівень енергонасиченості тракторів є таким, за якого практично вся потужність двигуна енергетичного засобу може бути реалізована через тягове зусилля [2]. З урахуванням саме цієї умови свого часу була створена Система машин, технічно і технологічно узгоджена з типажем тракторів СТ СЕВ 628-85.

Сучасний період тракторобудування характеризується відмовою від тягової і зародженням нової — тягово-енергетичної концепції [3]. Згідно з її положеннями, зростання потужності двигуна трактора суттєво випереджає пов'язане з цим збільшення його експлуатаційної маси. Вона зростає тільки до того рівня, який забезпечує надійність конструкції енергетичного засобу більшої потужності. У підсумку зростає енергонасиченість тракторів. За даними авторів праці [4], значення показника  $E_p$  до 2030 р. може сягнути позначки щонайменше 25 кВт/т.

Водночас слід зазначити, що використання трактора у складі МТА є ефективним за умови завантаження двигуна за потужністю і тяговим зусиллям щонайменше на 95%. Практична реалізація таких вимог може створювати проблему, пов'язану з використанням високоенергонасиченого трактора в тяговому варіанті. Справа в тому,

що наявність «зайвої» потужності двигуна енергетичного засобу потребує розроблення відповідної системи його агрегування, яка може виявитися досить неординарною. З огляду на це конструктор трактора і його користувач мають добре знати основи і особливості розроблення/агрегування трактора високої енергонасиченості.

**Мета досліджень** — визначити такий рівень енергонасиченості трактора, який забезпечить його ефективне використання, насамперед у складі тягових МТА, що дають можливість досягти згаданого вище (95%) рівня завантаженості двигуна трактора за потужністю.

**Матеріали і методи досліджень.** Теоретичні дослідження проводили з використанням основ вищої математики, теорії тягової динаміки трактора, які розглядають процес перекочування еластичного колеса по деформованій ґрунтовій поверхні, описують суть тягової і перспективи тягово-енергетичної концепції розвитку мобільних тягових засобів стосовно рівня їх енергонасиченості. Розрахунки здійснювали у програмному середовищі Mathcad 15.0 із застосуванням аналітичних залежностей, які відображають вплив конструктивних параметрів трактора і характеристик ґрунтового середовища на максимальне значення дотичної сили тяги енергетичного засобу при заданому рівні буксування його рушіїв

**Результати досліджень.** За умови 95-відсоткового завантаження трактора його функціонування відбувається практично на межі реалізації максимальної дотичної сили тяги ( $F_d$ ). З достатньою для практичного застосування точністю величину цієї сили для одного колісного рушія можна розрахувати, скориставшись виразом [5]:

$$F_d = \frac{f_{кз} \cdot k_r \cdot G}{\delta \cdot L} \times \left[ \ln \left( \operatorname{ch} \frac{\delta \cdot L}{k_r} \right) - f_{np} \cdot \left( \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{\delta \cdot L}{k_r}} - 1 \right) \right] + 2 \cdot \tau_{зр} \cdot \frac{h_r \cdot L}{t_r}, \quad (1)$$

де  $f_{кз}$  — коефіцієнт тертя ковзання ґрунту;  $k_r, \tau_{зр}$  — коефіцієнт деформації і модуль зрізу ґрунту відповідно;  $G, \delta$  — вертикальне навантаження на колісний рушій і його буксування;  $L$  — довжина плями контакту шини рушія з ґрунтом;  $f_{np}$  — приведений коефіцієнт тертя ґрунту;  $h_r, t_r$  — висота і крок ґрунтозацепів шини колеса.

Сила  $F_d$  є сумою двох складових. Перша із них витрачається на деформацію, друга — на зріз ґрунту ґрунтозацепами рушія. Задля збереження родючості ґрунту руйнування його структури в результаті зрізу має бути унеможливлене. З огляду на це другий доданок виразу (1) ми не розглядатимемо.

Ще одна методична обставина полягає в тому, що для тракторів тягових класів 2, 3 та 5 значення гіперболічного косинусу у формулі (1) відрізняється від одиниці лише на 5–6%. З урахуванням цього з достатньою для практики точністю можна прийняти, що:

$$\frac{1}{\operatorname{ch} \frac{\delta \cdot L}{k_r}} - 1 \approx 0. \quad (2)$$

З огляду на викладене, а також враховуючи, що  $k_r = 0,4 \cdot t_r$  [6], вираз (1) можна трансформувати до такого вигляду:

$$F_d = 0,4 \cdot \frac{f_{кз} \cdot t_r \cdot G}{L \cdot \delta} \cdot \ln \left( \operatorname{ch} \frac{2,5 \cdot L \cdot \delta}{t_r} \right). \quad (3)$$

Добуток сили  $F_d$  та швидкості руху трактора у складі МТА ( $V$ ) дає потужність, яка, з урахуванням ККД трансмісії енергетичного засобу ( $\eta_{тр} = 0,93$  [7]), репрезентує потужність його двигуна:

$$N_e = \frac{F_d \cdot V}{\eta_{тр}}. \quad (4)$$

Поділивши цю потужність на виражене через масу вертикальне навантаження на колісний рушій  $G$  і приймаючи її кількість рівною 4, отримуємо вираз для розрахунку енергонасиченості трактора за умови реалізації ним максимального дотичного тягового зусилля:

$$E_p = \frac{4 \cdot F_d \cdot V \cdot g}{G \cdot \eta_{тр}} = 1,6 \cdot g \cdot \frac{f_{кз} \cdot t_r \cdot V}{L \cdot \delta \cdot \eta_{тр}} \times \ln \left( \operatorname{ch} \frac{2,5 \cdot L}{t_r} \right), \quad (5)$$

де  $g$  — прискорення вільного падіння ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ).

Слід взяти до уваги, що вираз (5) отримано для трактора з однаковими задніми і передніми рушіями (колісна формула 4К46). Для тракторів колісної формули 4К4а замість множника 1,6 буде інший. Проте загальний алгоритм розв'язання розглядуваної проблеми при цьому не змінюється. У підсумку для подальшого аналізу остаточно приймаємо, що:

$$E_p = 15,7 \cdot \frac{f_{к3} \cdot t_r \cdot V}{L \cdot \delta \cdot \eta_{тп}} \cdot \ln \left( \text{ch} \frac{2,5 \cdot L \cdot \delta}{t_r} \right), \quad (6)$$

де, згідно з [5],

$$L = R_k \cdot \left( \arctg \frac{f_k \cdot \sqrt{1 - f_k^2}}{0,5 - f_k^2} + 2 \cdot f_k^2 \right). \quad (7)$$

У формулі (7)  $R_k$  — радіус кочення колеса трактора, а  $f_k$  — коефіцієнт опору кочення. У подальших дослідженнях значення цього параметра розглядали в діапазоні 0,10–0,18. Він є характерним для таких типових агротехнічних фонів, як «стерня» сільськогосподарської культури і «поле, підготовлене до сівби» [8]. Водночас останніми роками застосовуються технології мінімального обробітку ґрунту. Під впливом цього агровиробники навіть сівбу ярових культур досить часто здійснюють на фоні, який за своїм станом ближчий до фону «злущена стерня». З огляду на це в дослідженнях значення коефіцієнта опору коченню приймали рівним 0,10. Виняток становив випадок, коли цей параметр розглядали як перемінний у діапазоні значень 0,10–0,18.

Що стосується радіуса кочення колеса  $R_k$ , то у дослідженні його приймали рівним 0,77 м. Таке значення параметра є приблизно середнім для шин тракторів тягових класів 2 (задні рушії), 3 і 5. Величина кроку ґрунтозацепів для них відрізняється мало і у подальших розрахунках прийнята рівною 0,23 м. Значення коефіцієнта  $f_{к3}$  варіювало у діапазоні 0,7–0,8.

Швидкість робочого руху МТА змінювали від 2 до 4 м/с (тобто в межах 7,2–

14,4 км/год). Саме такі значення параметра  $V$  на сучасному етапі характерні для роботи енергонасичених тракторів у складі тягових агрегатів [9].

Як впливає з аналізу розрахунків за формулами (6) і (7), збільшення швидкості руху трактора у складі тягового МТА передбачає підвищення його енергонасиченості. За умови  $V = 4 \text{ м/с}$  (14,4 км/год) значення цього параметра може становити 17 кВт/т (рис. 1). Однак такий швидкісний режим роботи тягового МТА нині є скоріше декларативним, а реальний становить 7–9 км/год. У такому разі за швидкості руху МТА 7,2 км/год достатній рівень енергонасиченості трактора — 8,5 кВт/т. Проте якщо застосовується трактор із більшою енергонасиченістю, то виникає проблема практичного використання тієї частини потужності двигуна, яка не може бути реалізована в тяговому варіанті МТА.

Суттєвий вплив на рівень енергонасиченості трактора має стан агротехнічного фону поля, що виражається коефіцієнтом опору коченню (рис. 2).

Як показали розрахунки, залежність між параметрами  $f_k$  і  $E_p$  майже прямо пропорційна. На перший погляд це нелогічно,

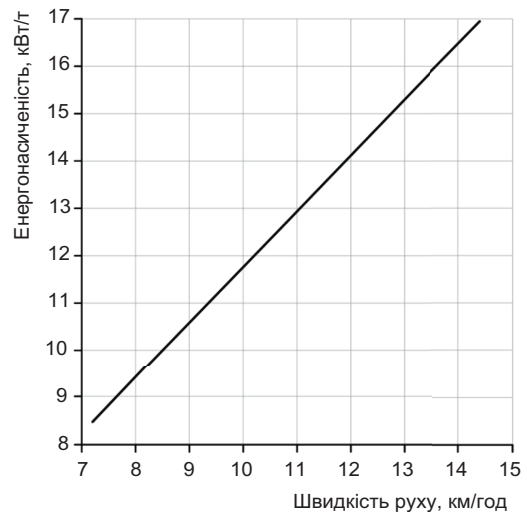
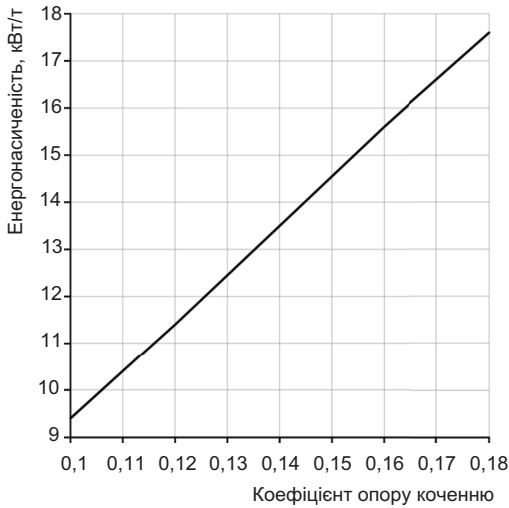


Рис. 1. Залежність енергонасиченості трактора від швидкості робочого руху агрегату на його основі



**Рис. 2.** Залежність енергонасиченості трактора від значення коефіцієнта опору коченню його рушіїв

тому що більше значення коефіцієнта опору коченню репрезентує більш пухке середовище, яке потенційно здатне витримувати менші дотичні зусилля з боку рушії енергетичного засобу. Для пояснення отриманого результату подамо аналітичний вираз (6) у вигляді множників  $S_1$  і  $S_2$ :

$$E_p = S_1 \cdot S_2, \quad (8)$$

де

$$S_1 = 15,7 \cdot \frac{f_{кз} \cdot t_r \cdot V}{L \cdot \delta \cdot \eta_{тр}}, \quad (9)$$

а

$$S_2 = \ln \left( \operatorname{ch} \frac{2,5 \cdot L \cdot \delta}{t_r} \right). \quad (10)$$

Як бачите, до наведених вище формул (9) і (10) безпосередньо входить параметр  $L$ , а через нього, як впливає із виразу (7), — опосередковано і коефіцієнт  $f_k$ . З огляду на це, множники  $S_1$  і  $S_2$  так само залежать від значення параметра  $f_k$ .

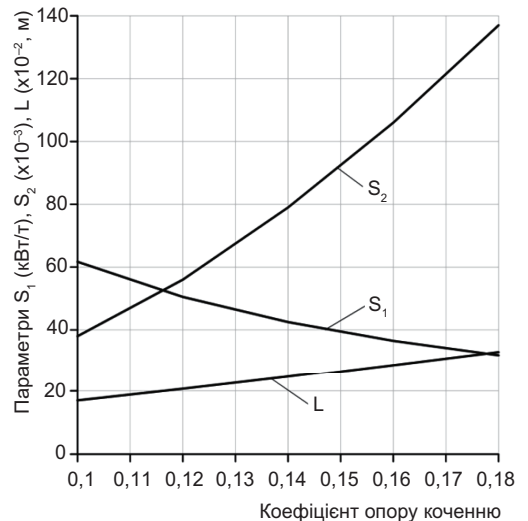
Інша річ, що природа цієї залежності є різною. Як показують розрахунки за виразом (7), збільшення значення коефіцієнта опору коченню  $f_k$  зумовлює збільшення довжини плями контакту шини рушії з ґрунтом (параметр  $L$ , рис. 3).

Збільшення значення параметра  $L$ , своєю чергою, приводить до зменшення значення множника  $S_1$  (див. вираз (9))

і збільшення значення множника  $S_2$  (див. вираз (10)). Водночас інтенсивність зростання другого множника значно перевищує інтенсивність зменшення першого. У підсумку, в міру збільшення значення коефіцієнта  $f_k$  значення множника  $S_2$ , випереджаючи у своєму зростанні зменшення значення множника  $S_1$ , зумовлює поступове збільшення їх добутку — енергонасиченості трактора загалом. Саме цим і пояснюється результат, поданий на рис. 2.

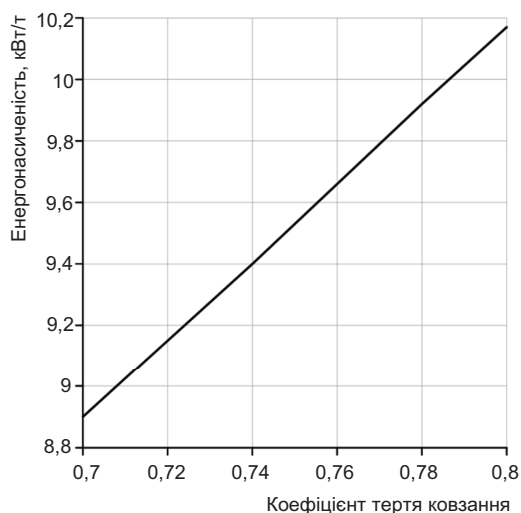
Що стосується коефіцієнта тертя ковзання ґрунту ( $f_{кз}$ ), то чим більше його значення, тим більше напруження деформації він здатний витримувати [10]. Це означає, що на ґрунтовому фоні з більшим значенням цього коефіцієнта колісним рушієм можна реалізувати більше дотичне тягове зусилля. Для практичної реалізації цього, згідно з виразом (6), прийнятним є енергетичний засіб з вищим рівнем енергонасиченості (рис. 4).

Згідно з рис. 4, вплив коефіцієнта  $f_{кз}$  на параметр  $E_p$  значно менш відчутний, ніж вплив коефіцієнта опору коченню  $f_k$  (див. рис. 2). Це означає, що для практичного визначення енергонасиченості трактора за виразом (6) достатньо оперувати середнім значенням параметра  $f_{кз} = 0,75$ .

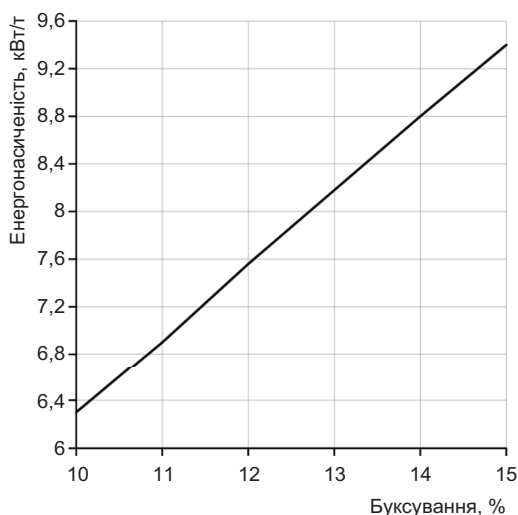


**Рис. 3.** Залежність складових виразів (6) і (7) від коефіцієнта опору коченню





**Рис. 4.** Залежність енергонасиченості трактора від коефіцієнта тертя ковзання частинок ґрунту



**Рис. 5.** Залежність енергонасиченості трактора від значення максимально допустимого буксування його коліс

Насамкінець розглянемо природу залежності параметра  $E_p$  від максимально допустимого буксування рушіїв трактора (рис. 5). Викладені вище результати отримані за обґрунтованої умови, коли  $\delta = 15\%$  [5]. Слід зазначити, що нині цей показник ніде і ніким не стандартизований. Та попри це, з огляду на необхідність збереження родючості ґрунту, все більшої актуальності набуває вимога зменшення його значення до 10–12% [11].

Як впливає з рис. 5, при  $f_{кз} = 0,75$ ,  $f_k = 0,1$ ,  $R_k = 0,77$  м,  $t_r = 0,23$  м,  $\eta_{тр} = 0,93$ ,  $V = 8$  км/год і  $\delta = 15\%$  допустимий рівень енергонасиченості колісного трактора становить лише 9,4 кВт/т.

Прийняття допустимого буксування рушіїв трактора на рівні 10% зумовлює використання трактора з енергонасиченістю не більш ніж 6,3 кВт/т. Але значення цього показника конфліктує із розповсюдженим нині рівнем параметра  $E_p$ , який перебуває в діапазоні 10–16 кВт/т. Можливе подальше збільшення енергонасиченості тракторів призведе до ще більшого протиріччя між спробою зростання продуктивності МТА за рахунок збільшення швидкості його руху через реалізацію більшої потужності двигуна, з одного

боку, і потребою у збереженні родючості ґрунтів за рахунок зменшення допустимого рівня буксування рушіїв колісних тракторів — з іншого.

Сучасний стан структури ґрунтів країни свідчить про те, що не рахуватися із цим протиріччям не можна. Тому і конструктори тракторів, і їх експлуатаційники мають шукати способи його розв'язання. Нині актуальним є підвищення продуктивності роботи МТА завдяки застосуванню компромісних варіантів стосовно збільшення швидкості їх робочого руху за рахунок зростання рівня енергонасиченості тракторів. Одним із таких варіантів є застосування більш широкозахватних та комбінованих агрегатів. Насамперед таких, що створені за перспективною в усьому світі конструктивною схемою «push-pull» [1].

Певна річ, що технологічні аспекти експлуатації менш енергонасичених і більш важких енергетичних засобів слід розглядати з урахуванням максимально допустимого буксування і «екофільності» їх рушіїв [12]. У контексті цього на увагу заслуговують варіанти експлуатації колісних енергетичних засобів, обладнаних подвоєними/потроєними шинами [13], арочними рушіями наднизького (до 0,05 мПа) тиску тощо.

## Висновки

Розроблення й експлуатація тракторів із високою енергонасиченістю, з одного боку, дає змогу підвищити продуктивність роботи тягових МТА, а з іншого породжує низку проблем, пов'язаних з ефективним використанням потужності двигунів енергетичних засобів у технологічних процесах. По-перше, навіть за швидкості робочого руху тягового МТА до 4 м/с (14,4 км/год) енергонасиченість трактора не має перевищувати 17 кВт/т. За реально-го швидкісного режиму роботи машинно-тракторного агрегату на рівні 2 м/с (7,2 км/год) бажане значення цього показника у два рази менше. По-друге, поступове збільшення частки агротехнічних фонів із більшим значенням його опору коченню колісного рушія сприяє використанню тракторів із меншим

(9–10 кВт/т) рівнем енергонасиченості. По-третє, за необхідності збереження структури ґрунту внаслідок обмеження максимального значення буксування рушіїв колісних енергетичних засобів до 15% достатнім рівнем їх енергонасиченості є 9–10 кВт/т. У разі зменшення максимально допустимого значення буксування тракторів до 10–12% рівень енергонасиченості останніх може (і має) бути ще менший. По-четверте, за невеликого (9–10 кВт/т) рівня енергонасиченості колісних тракторів найраціональнішим способом підвищення продуктивності роботи тягових МТА є використання їх широкозахватних і комбінованих варіантів із широким застосуванням подвоєних/потроєних або ачочних рушіїв із низьким тиском повітря в їх шинах.

### Nadykto V.

*Dmytro Motornyj Tavrja State Agrotechnological University, 66 Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063; e-mail: nadyktonvt@meta.ua; ORCID: 0000-0002-1770-8297*

### Determination of the rational level of energy saturation of wheeled tractors

**Goal.** To determine the level of energy saturation of a wheeled tractor, which will make it possible to use such a tractor as efficiently as possible — primarily as a part of traction machine-tractor units that can reach a given level of load on the tractor engine in terms of power.

**Methods.** Theoretical studies were carried out using the foundations of higher mathematics, the theory of traction dynamics of a tractor, which considered the process of rolling an elastic wheel on a deformed soil surface, described the essence of the traction and the prospects of the traction energy concept of the development of mobile traction vehicles concerning the level of their energy saturation. Calculations were carried out in the Mathcad 15.0 software environment using analytical dependencies that reflected the influence of the structural parameters of the tractor and the characteristics of the soil environment on the maximum value of the tangential traction force of the power vehicle at a given level of skidding of its engines. **Results.** The analytical dependence of the energy saturation of the wheeled tractor

on the parameters that determine the state of the agricultural background processed by the traction unit (coefficients of rolling resistance, skidding, soil sliding friction) under different speed regimes was analyzed. **Conclusions.** At the working speed of the traction unit up to 4 m/s (14.4 km/h), the energy saturation of the tractor should not exceed 17 kW/t. Under the real speed mode of its operation at the level of 2 m/s (7.2 km/h), the desired value of this indicator is two times less. The gradual increase in the share of agrotechnical backgrounds with higher values of their resistance to rolling of the wheeled drive contributes to the use of tractors with a lower (9–10 kW/t) level of energy saturation. If the soil structure is preserved due to the limitation of the maximum towing value of wheeled power vehicles to 15%, the sufficient level of their energy saturation is 9–10 kW/t. If the maximum permissible value of towing is reduced to 10–12%, the level of energy saturation of tractors can (and should) be even lower. At a small (9–10 kW/t) level of energy saturation of wheeled tractors, the most rational method of increasing the productivity of traction units is the use of their wide-grip and combined options with the wide use of double/triple or arch drives with low air pressure in their tires.

**Key words:** tractor, engine power, operating weight, speed, skidding.

**DOI:** <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202406-08>



**Бібліографія**

1. *Надикто В., Кюрчев В.* Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегата. *Техніка і технології АПК*. 2018. № 7. С. 26–31.
2. *Macmillan R.H.* The Mechanics of Tractor-Implement Performance: Theory and Worked Examples. *Melbourne*, 2002. 166 с.
3. *Надикто В.Т., Крижачківський М.Л., Кюрчев В.М.* та ін. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві. Мелітополь: ММД, 2006. 337 с.
4. *Надикто В.Т., Величко О.В.* Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2015. Вип. 1 (100). С. 147–151.
5. *Bulgakov V., Chernysh O., Adamchuk V.* et al. Theoretical study of the conditions of the maximum allowable slipping of wheel tractors. *Agronomy Research*. 2023. V. 21. Is. 1. P. 28–38.
6. *Nadykto V., Arak M., Olt J.* Theoretical research into the frictional slipping of wheel-type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy Research*. 2015. V. 13. Is. 1. P. 148–157.
7. *Білоконь Я.Ю., Окоча А.І., Войцехівський С.О.* Трактори та автомобілі: підруч. Київ: Вища освіта, 2003. 560 с.
8. *Ільченко В.Ю., Нагірний Ю.П., Джолос П.А.* та ін. *Машиновикористання в землеробстві*. Київ: Урожай, 1996. 384 с.
9. *Selivanov N.I., Makeeva Y.N.* Rational Use of High Power Saturated Wheeled Tractors in Soil Cultivation Technologies. *Vestnik KrasGAU*. 2017. V. 3. P. 58–65.
10. *Evans M.T., Zhang L.* A numerical study of particle friction and initial state effects on the liquefaction of granular assemblies. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. V. 126. P. 105773.
11. *Majdan R., Abraham R., Tkac Z.* et al. Drawbar Parameters of Tractor with Prototypes of Driving Wheels and Standard Tyres. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. V. 21. N 2. P. 63–68.
12. *Bulgakov V., Nadykto V., Kyurchev S.* et al. Theoretical background for increasing grip properties of wheeled tractors based on their rational ballasting. *Agraarteadus: J. of Agricultural Science*. 2019. V. 30. Is. 2. P. 78–84.
13. *Адамчук В.В., Булгаков В.М., Надикто В.Т.* та ін. Дослідження умов застосування подвоєних або потроєних шин колісних енергетичних засобів. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 8. С. 60–66.