

**Калінін Є.І.**

Харківський національний  
технічний університет  
сізького господарства  
імені Петра Василенка  
м. Харків, Україна.  
E-mail: kalinihntusg@gmail.com

**ВИЗНАЧЕННЯ БУКСУВАННЯ КОЛІСНОГО  
ТРАКТОРА З УРАХУВАННЯМ  
СУПУТНІХ ВИТРАТ**

УДК 631.17.002.5

*У статті запропонований метод визначення буксування колісного рушія за декількома критеріями, які мають як технічне вираження, так і енергетично-ефективне. Обґрунтовано, що розраховане виключно за технічними критеріями, буксування вимагає перевірки з урахуванням узагальнюючих показників, що враховують якомога більше супутніх витрат: зниження продуктивності, підвищена витрата палива і т.п. В якості таких узагальнених критеріїв можна використовувати максимум ефективності праці або ж мінімум приведених витрат, які в більшій мірі визначаються продуктивністю трактора.*

**Ключові слова:** буксування, колісний трактор, зниження продуктивність, підвищення витрати палива.

**Вступ.** У зв'язку з підвищенням енергонасиченості колісних тракторів і проблемою реалізації їх потужності через тягу, визначення оптимального значення буксування в різних експлуатаційних умовах являє собою актуальну задачу. Існують різні точки зору на допустиме буксування і вихідні позиції при його визначенні. Найбільш відомими з них є максимальний тяговий ККД і максимальна продуктивність.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження залежності тягово-зчіпних властивостей ведучого колеса при взаємодії з ґрунтом від буксування вирішувалася в роботі [1], де було зазначено, що для кожної шини можна вибрати раціональне навантаження, при якому будуть отримані найбільш високі тягово-зчіпні властивості.

В роботах [1-6] представлені залежності дотичної сили тяги колеса від коефіцієнта буксування, які можуть бути використані в математичній моделі. Вони дозволяють варіювати параметрами колеса, розмірами шини, а також задавати фізико-механічні властивості ґрунтів.

Проте, в більшості розрахунків, буксування рушія розраховується лише виходячи з технічних критеріїв, без врахування узагальнюючих показників.

**Мета дослідження.** Визначення буксування колісного рушія з урахуванням не тільки технічних показників, але й супутніх витрат (наприкладі зниження продуктивності всього агрегату).

**Основні результати дослідження.** Визначимо буксування трактора, що відповідає максимальному значенню дотичного зусилля. Приймемо припущення, що буксування трактора дорівнює буксуванню його одиничного ведучого колеса.

Дотичне зусилля, що розвивається колесом, може бути визначено на підставі закону зміни тангенціальних напружень від деформації ґрунту [2]:

$$\tau = \tau_{ск} \left( 1 + \frac{a}{ch \frac{s}{K_r}} \right) th \frac{s}{K_r}, \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості ґрунту;  $\tau_{ск}$  – напруження при безграничному збільшенні деформації ґрунту (ковзанні);  $K_{\tau}$  – коефіцієнт деформації;  $s$  – довжина контактної лінії.

Методика визначення коефіцієнту деформації  $K_{\tau}$  наведена в роботі [2]. Коефіцієнт  $a$  визначається емпіричною залежністю виду:

$$a = \frac{2f_n}{f_{ск}} - 1,5,$$

де  $f_n$  та  $f_{ск}$  – коефіцієнти тертя спокою та ковзання.

Встановлено, що дотичне напруження має максимум при деякому значенні деформації, яке позначимо через  $s_0$ . Тоді похідна напруження по деформації при його значенні  $s_0$  буде дорівнювати нулю:

$$\frac{\tau_{ск}}{K_{\tau}} - \frac{2a - a \cdot ch^2 \frac{s_0}{K_{\tau}} + ch \frac{s_0}{K_{\tau}}}{ch^3 \frac{s_0}{K_{\tau}}} = 0,$$

звідки

$$ch \frac{s_0}{K_{\tau}} = \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2}}{2a}. \quad (2)$$

Розв'язуючи рівняння (2) відносно  $s_0$ , отримаємо

$$s_0 = K_{\tau} \operatorname{arch} \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2}}{2a} \right). \quad (3)$$

Величину тангенціальної деформації ґрунту визначає буксування колеса, значення якого при максимальному дотичному напруженні назовемо оптимальним:

$$\delta_{onm} = \frac{s_0}{s} = \frac{K_{\tau} \operatorname{arch} \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2}}{2a} \right)}{R\alpha}, \quad (4)$$

де  $R$  – радіус жорсткого колеса або поверхні пневматичної шини в зоні контакту;  $\alpha$  – кут контакту колеса з ґрунтом.

Таким чином, буксування залежить від фізико-механічних властивостей контактуючих тіл та довжини контактної лінії.

Буксування, що визначено за формулою (4), являє собою гранично допустиме при заданих умовах, оскільки воно відповідає максимально можливому дотичному напруженню. Наприклад, для випадку взаємодії пневматичного колеса з ґрунтом, що має фізико-механічну характеристику  $f_n = 0,5$ ;  $f_{ск} = 0,48$ ;  $f_{np} = 0,58$ ;  $K_{\tau} = 3,16$  см, допустиме буксування дорівнює 18,5%.

Однак, розраховане виключно за технічними критеріями, буксування вимагає перевірки з урахуванням узагальнюючих показників, що враховують якомога більше супутніх витрат: зниження продуктивності, підвищена витрата палива і т.п. В якості таких узагальнених критеріїв можна використовувати максимум ефективності праці або ж мінімум приведених витрат, які в більшій мірі визначаються продуктивністю трактора.

Продуктивність тракторного агрегату, в свою чергу, суттєво залежить від буксування рушіїв, і визначається з залежності виду:

$$W = 0,1Bv_m(1 - \delta_{om})T, \quad (5)$$

де  $B$  – ширина захвату агрегату;  $v_m$  – теоретична швидкість руху агрегату;  $T$  – коефіцієнт використання робочого часу.

Максимальна продуктивність буде досягнута при оптимальному буксуванні, так як в цьому випадку досягається максимум дотичної сили тяги, що розвивається колісним рушієм.

Дотична сила по В.В. Гуськову:

$$P_\kappa = \frac{f_{ck} K_\tau G_\kappa}{\delta s} \left[ \ln ch \frac{\delta s}{K_\tau} - f_{np} \left( \frac{1}{ch \frac{\delta s}{K_\tau}} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

де  $f_{np} = \frac{4f_n - 3f_{ck}}{2f_{ck}}$  – приведений коефіцієнт тертя;  $G_\kappa$  – нормальне навантаження на колесо.

Розклавши логарифмічну функцію в степеневий ряд, після перетворення, отримаємо:

$$P_\kappa = \frac{f_{ck} K_\tau G_\kappa}{\delta s_0} \left( \frac{f_{np}}{ch \frac{\delta s}{K_\tau}} + 1 \right) \left( ch \frac{\delta s}{K_\tau} - 1 \right). \quad (7)$$

Максимальне дотичне зусилля, що розвивається колесом:

$$P_{\kappa \max} = \frac{f_{ck} K_\tau G_\kappa}{\delta s_0} \left( \frac{2af_{np}}{1 + \sqrt{1 + 8a^2}} + 1 \right) \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2}}{2a} - 1 \right). \quad (8)$$

Тоді значення необхідного коефіцієнта зчеплення, яке забезпечує максимальне дотичне зусилля при деформації  $s_0$ , буде:

$$\varphi = \frac{f_{ck} \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2}}{2a} \right) - \left( \frac{4f_n}{f_{ck}} - 3 \right) \left( \frac{a}{1 + \sqrt{1 + 8a^2}} - 1 \right)}{K_\tau G_\kappa \left( 1 + \frac{\sqrt{1 + 8a^2}}{2a} \right)}.$$

Буксування трактора з конкретними конструктивними характеристиками може бути виражено емпіричною залежністю виду:

$$\delta = A(\varphi - \varphi_\kappa)^B e^{D(\varphi - \varphi_\kappa)},$$

де  $A$ ,  $B$  та  $D$  – емпіричні коефіцієнти;  $e$  – основа натурального логарифму;  $\varphi_\kappa$  – коефіцієнт використання зчпної ваги.

Зробимо припущення, що для колісних тракторів однієї конструктивної схеми коефіцієнт зчеплення в заданих ґрунтових умовах має однакове значення. Тоді буксування трактора визначається зчпною вагою та гаковим навантаженням, що характеризується в даному випадку коефіцієнтом використання зчпної ваги. Для колісних тракторів різних тягових класів коефіцієнти  $A$ ,  $B$  та  $D$  можуть бути представлені також емпіричними рівняннями в функції зчпної ваги  $G$ :

$$A = G^b a e^{cG}, \quad B = K_1 G + t_1, \quad D = K_2 G + t_2,$$

де  $a, b, c, K_1, K_2, t_1, t_2$  – коефіцієнти, які для випадку роботи трактора по стерні озимої пшениці при вологості ґрунту на глибині 0...15 см – 11,3...21,1% та щільності 3,4...12,3 кг/см<sup>2</sup> відповідно дорівнюють  $3,46 \cdot 10^{-6}$ ; 2,045;  $-2,71 \cdot 10^{-4}$ ;  $-3,84 \cdot 10^{-6}$ ;  $-1,92 \cdot 10^{-4}$ ;  $-5,55 \cdot 10^{-2}$ ; -2,775. Вказані коефіцієнти визначені за експериментальними даними, які наведені в роботі [1].

Оптимальне буксування і відповідний йому коефіцієнт використання зчіпної ваги в цьому випадку визначені чисельним методом з пошуком експериментальних значень приведених витрат і ефективності праці. Результати розрахунку показують, що для трактора МТЗ-82 на оранці стерні озимої пшениці при питомому опорі плуга 0,70 кг/см на полі площею 24 га і довжиною гону 500 м оптимальне буксування становить 12,8% (табл. 1).

Оптимальне буксування трактора К-714 в аналогічних умовах дорівнює 11,7%, а коефіцієнт використання зчіпної ваги – 0,46.

Таблиця 1

**Результати розрахунку приведених витрат і ефективності трактора МТЗ-82**

Швидкість руху, км/год	Буксування, %	Дотичне зусилля, кН	Зчіпна вага, кН	Коефіцієнт використання зчіпної ваги	Продуктивність, га/год
6,8	9,3	23,00	57,50	0,40	0,68
6,9	10,8	22,40	51,00	0,44	0,69
7,0	12,8	21,80	45,00	0,48	0,70
6,8	17,0	21,00	38,90	0,54	0,68
6,6	21,2	20,40	35,20	0,58	0,66

**Висновки.** Розрахунок екстремальних значень ефективності праці і приведених витрат дозволяє уточнити допустиме буксування трактора в заданих умовах, яке визначене виходячи з максимального дотичного зусилля. Проте, для виконання такого розрахунку необхідна значна за обсягом вихідна інформація.

### Література:

1. Гуськов А.В. Оптимизация тягово-сцепных качеств тракторных шин. – Тракторы и сельхозмашины. – №7, 2007. – С.19-21.
2. Гуськов В.В. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов, и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
3. Шепеленко Г.Н. Основы теории самоходных машин. – Харьков: Основа, 1993. – 216 с.
4. Самородов В.Б. Развитие классических методов тягового расчета трактора с учетом основных технико-экономических показателей МТА / В.Б. Самородов, А.Ю. Ребров // Автомобіле- і тракторобудування. – № 58, 2008. – С.11-20.
5. Калінін Є.І. Вплив нестаціонарності гакового навантаження на буксування рушіїв колісного трактора / Є.І. Калінін, М.Л. Шуляк, В.П. Мальцев // Системи обробки інформації – 2016. – № 5. – С. 27-30.
6. Лебедев А.Т. Опір перекочування колеса, що працює з буксуванням / А.Т. Лебедев, Є.І. Калінін, М.Л. Шуляк // Збірник наукових статей Луцького НТУ: Сільськогосподарські машини – 2015. – №32. – С. 109-115.

### Summary

**E. Kalinin** Determination of slippage of tractors taking into account associated costs

*The article proposes a method for determining the skidding of a wheeled propulsion engine by several criteria that have both a technical expression and an energetically effective one. It is justified that calculated solely on technical criteria, slippage requires verification taking into account generalized indicators that take into account as much as possible associated costs: reduced productivity, increased fuel consumption, etc. As such generalized criteria, you can use the maximum labor efficiency or minimum of the given costs, which are determined to a greater extent by the performance of the tractor.*

**Keywords:** skidding, wheeled tractor, reduced productivity, increased fuel consumption

### References

1. Guskov A.V. Optimizaciya tyagovo-scepnih kachestv traktornyh shin. – Traktory i selhozmashiny. – №7, 2007. – S.19-21.
2. Guskov V.V Traktory: Teoriya / V.V. Guskov, N.N. Velev, Yu.E. Atamanov, i dr. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 376 s.
3. Shepelenko G.N. Osnovy teorii samohodnyh mashin. – Harkov: Osnova, 1993. –216 s.
4. Samorodov V.B. Razvitie klassicheskikh metodov tyagovogo rascheta traktora s uchetom osnovnyh tehniko-ekonomicheskikh pokazatelej MTA / V.B. Samorodov, A.Yu. Reb-rov // Avtomobile- i traktorobuduvannya. – № 58, 2008. – S.11-20.
5. Kalinin Ye.I. Vpliv nestacionarnosti gakovogo navantazhennya na buksuvannya rushiyiv kolisnogo traktora / Ye.I. Kalinin, M.L. Shulyak, V.P. Malcev // Sistemi obrobki informaciyi – 2016. – № 5. – S. 27-30.
6. Lebedyev A.T. Opir perekochuvannya koleasa, sho pracyuye z buksuvannyam / A.T. Lebedyev, Ye.I. Kalinin, M.L. Shulyak // Zbirnik naukovih statej Luckogo NTU: Silskogos-podarski mashini – 2015. – №32. – S. 109-115.