

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЙ КОЛЕСА З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

**О. А. Бешун, кандидат технічних наук
ORCID 0000-0002-9908-7040**

**В. І. Ачкевич, здобувач
ORCID 0000-0002-1537-6997**

**Я. О. Меланченко, студент
ORCID 0000-0001-5177-1612**

**Д. О. Шеремет, студент
ORCID 0000-0002-6350-1342**

**Національний університет біоресурсів і
природокористування України
e-mail: beshun@ukr.net**

Анотація. В сільськогосподарському виробництві під час виконання машинно-тракторними агрегатами технологічних операцій має місце контактна взаємодія коліс з ґрунтом, яка супроводжується деформуванням та ущільненням останнього, що негативно впливає на зміну його структури. Для зменшення негативного впливу на ґрунт необхідно визначати оптимальні конструкційні параметри колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів.

В статті виконано аналіз існуючих моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею та визначено основні параметри, які впливають на площу контакту та розподілення навантаження на ґрунт при застосуванні сучасної агротехнологічної шини. Виконаний аналіз існуючих моделей контактної взаємодії шини та опорної поверхні дозволив зробити висновок про відсутність математичних моделей, які б враховували властивості ґрунту та їх вплив на деформування гуми.

Враховуючи суттєві зміни в технологіях виготовлення сучасних агротехнологічних шин обґрунтована актуальність проблеми розроблення адекватної узагальнюючої моделі взаємодії шини з опорною поверхнею, яка б охоплювала якомога більше параметрів, що впливають на деформацію шини під дією навантаження та враховувала як конструкційні та технологічні параметри шини, так і властивості агротехнологічного середовища при їх контактній взаємодії.

Ключові слова: рушій, колесо, шина, опорна поверхня, тиск, площа контакту, пляма контакту

Постановка проблеми. Розвиток технічного забезпечення сільського господарства базується на застосуванні широкозахватних агрегатів. Збільшення ширини захвату причіпних машин призводить до збільшення їх конструктивних мас. Збільшення конструктивних мас сучасних МТА в свою чергу викликає збільшення питомих тисків на опорну поверхню, що в свою чергу призводить до ущільнення ґрунту та його руйнування при перевищенні певного критичного значення. Негативна дія на ґрунт з боку ходових систем призводить до зниження продуктивності сільськогосподарських культур [1, 2, 3]. Сучасна техніка вимагає створення та застосування рушіїв, які можуть мінімізувати негативний вплив на ґрунт. Відомі світові виробники розробили різноманітні за формою протектори сільськогосподарських шин для забезпечення роботоздатності в тих чи інших дорожніх умовах. Сучасна агротехнологічна шина може ефективно працювати при внутрішніх тисках близьких до $0,6 \text{ кг/см}^2$. Зниження тиску в шині дозволяє збільшити площу контакту колеса з опорною поверхнею, і тим самим зменшуючи розподілене навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Для визначення тих чи інших параметрів взаємодії колеса з опорною поверхнею колеса використовують різноманітні методи [4, 5, 6] та обладнання [7, 8, 9] з метою моделювання відповідних робочих умов. Результати таких експериментальних досліджень дозволяють отримати показники роботи відповідної шин у конкретних умовах. Проте цілий ряд сучасних досліджень спрямовані на розробку сучасних систем керування роботою МТА. Так, наприклад в роботах [10, 11] з метою оптимізації ефективних показників роботи МТА розроблено алгоритм автоматичного керування глибиною обробітку, а в роботі [12] – систему керування швидкістю та управлінням. Процеси взаємодії колеса з опорною поверхнею безпосередньо впливають на техніко-експлуатаційні показники роботи МТА. Побудова ефективних алгоритмів керування потребує математичних моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею, які б в повній мірі описували б даний процес та враховували всі можливі аспекти такої взаємодії.

Мета досліджень. Аналіз існуючих моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею та визначення основних параметрів, які впливають на площу контакту та розподілення навантаження на ґрунт при застосуванні сучасної агротехнологічної шини.

Результати досліджень. Загальновідомо, тиск на ґрунт є відношенням номінального навантаження шини до площі контакту шини з опорною поверхнею. В роботі [13] пропонується визначати площу контакту за допомогою простої формули (1), як добуток діаметра шини на її ширину:

$$F_K = db, \quad (1)$$

де: d – зовнішній діаметр шини, м; b – ширина протектора шини, м.

Основним недоліком даного підходу, є те, що автор не врахував зміну діаметра шини, що може бути пов'язана зі зміною приведеної маси до осі та зміною внутрішнього тиску шини.

Автори [14] пропонують визначати тиск в плямі контакту наступним чином:

$$p = c_i \cdot p_i + p_c, \quad (2)$$

де: p – тиск на ґрунт у плямі контакту, кПа; c_i – коефіцієнт жорсткості шини ($c_i = 0,6$ для шин високого тиску і $c_i = 1,0$ для шин низького тиску); p_i – внутрішній тиск в шині, кПа; p_c – контактний тиск ненакаченої шини ($p_i = 0$), кПа.

Необхідність врахування жорсткості шини та її коливання, які залежать від виробників, ускладнюють використання залежності (2). Також необхідно відмітити, що в залежностях (1) та (2) не враховується величина вгрузання колеса в ґрунт, яка може коливатися в досить суттєвих межах в залежності від стану ґрунту та маси агрегату. В роботі [15] запропоновано емпіричну модель для оцінки тиску шин сільськогосподарських тракторів на ґрунт, яка полягає в наступних експериментальних залежностях:

$$F_K = 0,77b_c l_c, \quad (3)$$

де: l_c – довжина плями контакту, м; b_c – ширина контакту, м.

Довжина плями контакту може бути визначена наступним чином:

$$l_c = \sqrt{d \cdot (z + \delta) - (z + \delta)^2} + \sqrt{d \cdot \delta - \delta^2}, \quad (4)$$

де: δ та z – прогин колеса відносно вільного радіуса колеса та радіуса з урахуванням деформації, викликаного навантаженням, м.

Ширина плями контакту може бути визначена в свою чергу за наступною формулою:

$$b_c = b + c \frac{W}{W_N}, \quad (5)$$

де: $c = 0,03 \dots 0,05$ – константа деформації відповідної шини в залежності від осьового навантаження, відносних одиниць; W_N – номінальне навантаження колеса (шини), кПа; W – навантаження на колесо (шину), кПа.

Для шин сільськогосподарських тракторів авторами [16] запропонована наступна емпірична математична модель:

$$F_K = \frac{cW^{0.7} \sqrt{\frac{b}{d}}}{p^{0.45}}, \quad (6)$$

де: c – константа нісівної здатності ґрунту, що змінюється від 0,30 до 0,44 відносних одиниць.

Слід зазначити, що застосування емпіричних залежностей (3) та (6) вимагає обережного підходу, особливо для іншого типу шин, ніж для тих, для яких вони отримані авторами.

В моделі [17] припускають, що 10 % від навантаження на колесо підтримується бічними стінками і пропонують у зв'язку з цим наступну модель:

$$F_K = \frac{0.9W}{p_i}. \quad (7)$$

В роботі [18] підтримання бічних стінок прирівнюється до нуля, тому тиск контакту шини дорівнює тиску повітря в шині, а площа контакту визначається за наступною формулою:

$$F_K = \frac{0.9W}{p_i}. \quad (8)$$

Як бачимо, протиріччя в роботах [17] та [18] свідчать про необхідність правильного визначення частки осевого навантаження, яке приведене до колеса і компенсується за рахунок деформації бічної поверхні гуми, що особливо необхідно при використанні сучасних агротехнологічних шин, здатних працювати при низьких тисках. Емпіричні моделі тиску в плямі контакту сільськогосподарських тракторних шин, представлені в праці [19], мають наступний вигляд:

– для радіальних шин:

$$p_m = 267,7 + 0,575 \cdot p_i + 1,1 \cdot W - 16,0 \cdot d, \quad (9)$$

– для шин з діагональним розміщенням ниток корду:

$$p_m = 267,7 + 0,575 \cdot p_i + 1,1 \cdot W - 16,0 \cdot d, \quad (10)$$

де: p_m – середній контактний тиск, кПа.

Значний внесок в дослідження взаємодії колеса з опорною поверхнею зробив В. Л. Бідерман [20]. Закладені ним ідеї лягли в основу наукових праць багатьох відомих вчених. Зокрема В. Л. Бідерман запропонував розрахункову схему, згідно якої пляма контакту має еліптичну форму, довжина напівеліпсів якої залежить від конструктивних та фізико-механічних властивостей шини.

$$a = \sqrt{df}, \quad (11)$$

та

$$b = \sqrt{2Rf}, \quad (12)$$

де: d – зовнішній діаметр шини, м; R – радіус ширини протектора, м; f – прогин шини, відносних одиниць.

Повний прогин шини складається з прогину каркасу і власне протектора та характеризується здатністю каркасу шини нести відповідне корисне навантаження:

$$f = f_{\Pi} - f_K = C_1 \frac{Q}{f} + C_2 \frac{Q}{p + p_0}, \quad (13)$$

де: C_1, C_2 – постійні для даної шини коефіцієнти, m^{-1} ; p – внутрішній тиск в шині, Па; p_0 – постійний коефіцієнт, Па; Q – осьове навантаження, Н.

Звідки площу контакту можна розрахувати за допомогою наступного виразу:

$$F_K = \pi ab = \pi \sqrt{2Rd} \left(C_1 \frac{Q}{f} + C_2 \frac{Q}{p + p_0} \right), \quad (14)$$

де: F_K – площа плями контакту колеса з опорною поверхнею, m^2 .

Практичне застосування даної моделі обмежене необхідністю введення параметрів, які характеризують властивості конкретно визначеної шини.

В роботі [21] запропоновані наступні моделі для визначення показників взаємодії колеса з опорною поверхнею:

$$l_c = 2\sqrt{d\delta}, \quad (15)$$

при $h=b$

$$b_l = 2\sqrt{d\delta}, \quad (16)$$

$$F_K = \pi\delta\sqrt{dh}, \quad (17)$$

для сільськогосподарських приводних шин

$$\delta = 0.54h \left(\frac{p_i dh}{W} \right)^{-0.79}, \quad (18)$$

де: h – висота профілю шини, м.

Емпірична модель площі контакту колеса з опорною поверхнею для самохідних лісових машин [22] представлена у наступному вигляді:

$$F_K = 282.6 + 3769b + 2369d - 257.2PR - 2.291p_i + 18.41W - \\ - 2895bd - \frac{7788.5}{W} + 7.46PR^2 + 17 \frac{p_i}{W} + 2768.5 \frac{W}{p_i}, \quad (19)$$

де: PR – показник, який враховує кількість шарів ниток корду в шині.

Виконаний аналіз існуючих моделей контактної взаємодії шини та опорної поверхні вказує на необхідність створення узагальнюючої математичної моделі, яка б охоплювала якомога більше параметрів, що впливають на деформацію шини під дією навантаження. Варто також відмітити, що виконаний аналіз показав відсутність математичних моделей, які б враховували властивості ґрунту та їх вплив на деформування гуми.

Висновки

1. Проведені дослідження показали відсутність єдиного підходу до визначення параметрів контактної взаємодії агротехнологічної шини та опорної поверхні.

2. Враховуючи суттєві зміни в технологіях виготовлення сучасних агротехнологічних шин постає питання розроблення адекватної моделі взаємодії шини з опорною поверхнею, яка б враховувала як конструкційні та технологічні параметри шини, так і властивості агротехнологічного середовища при їх контактній взаємодії.

Список літератури

1. R.M. Makharoblidze, I.M. Lagvilava, B.B. Basilashvili, R.M. Khazhomia, Theory of turn bodies of mountain tandem wheeled self-propelled chassis, In Annals of Agrarian Science, Volume 15, Issue 3, 2017, Pages 339-343, ISSN 1512-1887, <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.026>.
2. Bogusław Usowicz, Jerzy Lipiec, Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil, In Soil and Tillage Research, Volume 174, 2017, Pages 241-250, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>.
3. Голуб Г. А. Двоємнісна модель гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212, ч. 2. С. 302–307.
4. Zakharov S. P. Raspredeleniye udel'nogo davleniya shiny na dorogu pri vysokikh skorostyakh. Trudy NIISHP. Goskhimizdat, 1957. S. 131–153.
5. Golub G. A. Determining the magnitude of traction force on the axes of drive wheels of self-propelled machines. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017.
6. Botta, G. F.; Tolon-Becerra, A.; Tourn, M.; Lastra-Bravo, X.; Rivero, D. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. *Soil Till. Res.* 2012, 120, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.008>.
7. Taghavifar, H., & Mardani, A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics*, 50, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.01.005>.
8. Kenarsar, A.; Vitton, S.; Beard, J. Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*, 74, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.06.001>
9. Ovsyannikov S. I. Tyagovyie parametry pnevmaticheskikh shin motoagrotekhniki. Nauk. vidannya Vís. KHNTUSG, vip. 2 «Tekhnichniy servis agropromislovogo, lísovogo ta transportnogo kompleksív», KH.: 2014. S. 102–107.
10. Osinenko, P., Geissler, M., Herlitzius, T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. *Biosystems Engineering*, 129, 20-33.
11. Nguyen, V., Matsuo, T., Inaba, S., Koumoto, T. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *Journal of Terramechanics*, 45, 25-44.
12. Liu, Z. Linearized longitudinal dynamic model for tractor cruise control system. ACM International Conference Proceeding Series, 2018. pp. 221-227. DOI: 10.1145/3177457.3177493.
13. Mikkonen, E. & Wuolijoki, E. Pikatestausten suoritusmekaniikka. The technique of short term testing. *Metsätieteiden tutkimus* 9, 1975. 5 p.
14. Karafiath, L. L. & Nowatzki, E. A. Soil mechanics for off-road vehicle engineering. Trans. Tech. Publications, Series on rock and soil mechanics 2:5., 1978. 515 s.

15. *Schwanghart, H.* Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. Proc. 10th ISTVS Conf, Kobe Aug 20-24, 1990. I: 193-204.
16. *Komandi, G.* Establishment of soil-mechanical parameters which determine traction on deforming soil. Journal of Terramechanics 27(2),1990.115-124.
17. *Silversides, C. R. & Sundberg, U.* Operational efficiency in forestry. Vol 2. Practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 169 p. ISBN 0-7923-0063.
18. *Kemp, H. R.* Climbing ability of four-wheel-drive vehicles. Journal of Terramechanics 27(1):7-23.
19. *Steiner, M.* Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigen Boden. M.E.G., Technische Universität München, Lehrstuhl für Landmaschinen. No 33. Söhne, W. 1969. Agricultural engineering and terramechanics. Journal of terramechanics (4): 9-18.
20. *Бидерман В.Л., Гуслицер П.С., Захаров С.П.* Автомобильные шины. Москва. Госхимиздат. 1963. 384 с.
21. *Godbole, R., Alcock, R. & Hettiaratchi, D.* The prediction of tractive performance on soil surfaces. Journal of Terramechanics 30(6), 1993. P. 443-459.
22. *Ziesak, M. & Matthies, D.* Untersuchen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen. KWF, Forsttechnische Informationen, FTI (9+10). 2001. P. 104-110.

References

1. *R. M. Makharoblidze, I. M. Lagvilava, B. B. Basilashvili, R. M. Khazhomia.* (2017). Theory of turn bodies of mountain tandem wheeled self-propelled chassis, In Annals of Agrarian Science, Volume 15, Issue 3, 339-343, ISSN 1512-1887, <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.026>.
2. *Bogusław Usowicz, Jerzy Lipiec.* (2017). Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil, In Soil and Tillage Research, Volume 174, Pages 241-250, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>.
3. *Holub, H. A.* (2015). Dvoiemnisna model humusnoho stanu gruntovoho seredovyscha ahroekosystem. Nauk. visn. NUBiP Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK. Vyp. 212, ch. 2. 302-307.
4. *Zakharov, S. P.* (1957). Raspredeleniye udel'nogo davleniya shiny na dorogu pri vysokikh skorostyakh. Trudy NIISHP. Goskhimizdat. 131-153.
5. *Golub, G. A.* (2017). Determining the magnitude of traction force on the axes of drive wheels of self-propelled machines. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 17.
6. *Botta, G. F., Tolon-Becerra, A., Tourn, M.; Lastra-Bravo, X.; Rivero, D.* (2012). Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. *Soil Till. Res.* 120, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.008>.
7. *Taghavifar, H., & Mardani, A.* (2013). Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. Journal of Terramechanics, 50, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.01.005>.
8. *Kenarsar, A.; Vitton, S.; Beard, J.* (2017). Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. Journal of Terramechanics, 74, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.06.001>
9. *Ovsyannikov, S. I.* (2014). Tyagovyye parametry pnevmaticheskikh shin motoagrotekhniki. Nauk. vidannya Visn. KHNTUSG, vip. 2 «Tekhnichniy servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv». KH. 102-107.

10. Osinenko, P., Geissler, M., Herlitzius, T. (2015). A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. *Biosystems Engineering*, 129, 20-33.
11. Nguyen, V., Matsuo, T., Inaba, S., Koumoto, T. (2008). Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *Journal of Terramechanics*, 45, 25-44.
12. Liu, Z. (2018). Linearized longitudinal dynamic model for tractor cruise control system. *ACM International Conference Proceeding Series*, 221-227. DOI: 10.1145/3177457.3177493.
13. Mikkonen, E. & Wuolijoki, E. (1975). Pikatestausten suoritustekniikka. The technique of short term testing. *Metsätehon katsaus* 9, 5.
14. Karafiath, L. L. & Nowatzki, E. A. (1978). Soil mechanics for off-road vehicle engineering. *Trans. Tech. Publications, Series on rock and soil mechanics* 2:5. 515.
15. Schwanghart, H. (1990). Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. *Proc. 10th ISTVS Conf, Kobe Aug 20-24. I*: 193-204.
16. Komandi, G. (1990). Establishment of soil-mechanical parameters which determine traction on deforming soil. *Journal of Terramechanics* 27(2), 115-124.
17. Silversides, C. R. & Sundberg, U. (1989). Operational efficiency in forestry. Vol 2. Practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 169 p. ISBN 0-7923-0063.
18. Kemp, H. R. (1990). Climbing ability of four-wheel-drive vehicles. *Journal of Terramechanics* 27(1): 7-23.
19. Steiner, M. (1969). Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigen Boden. M.E.G., Technische Universität München, Lehrstuhl für Landmaschinen. No 33. Söhne, W. Agricultural engineering and terramechanics. *Journal of terramechanics* (4): 9-18.
20. Byderman, V. L., Huslytser, R. S., Zakharov, S. P. (1963). *Avtomobyl'nie shyni*. Hoskhymyzdat. 384.
21. Godbole, R., Alcock, R. & Hettiaratchi, D. (1993). The prediction of tractive performance on soil surfaces. *Journal of Terramechanics* 30(6), 443-459.
22. Ziesak, M. & Matthies, D. (2001). Untersuchungen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen. *KWF, Forsttechnische Informationen, FTI* (9+10). 104-110.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КОЛЕСА С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А. А. Бешун, В. И. Ачкевич, Я. А. Меланченко, Д. А. Шеремет

Аннотация. В сельскохозяйственном производстве при выполнении машинно-тракторными агрегатами технологических операций имеет место контактное взаимодействие колес с грунтом, которое сопровождается деформированием и уплотнением последнего, что негативно влияет на изменение его структуры. Для уменьшения негативного воздействия на почву необходимо определять оптимальные конструкционные параметры колесных движителей машинно-тракторных агрегатов.

В статье выполнен анализ существующих моделей взаимодействия колеса с опорной поверхностью и определены основные параметры, влияющие на площадь контакта и

распределение нагрузки на грунт при применении современной агротехнологической шины. Выполненный анализ существующих моделей контактного взаимодействия шины и опорной поверхности позволил сделать вывод об отсутствии математических моделей, которые бы учитывали свойства почвы и их влияние на деформирование резины.

Учитывая существенные изменения в технологиях изготовления современных агротехнологических шин обоснована актуальность проблемы разработки адекватной обобщающей модели взаимодействия шины с опорной поверхностью, которая охватывала бы как можно больше параметров, влияющих на деформацию шины под действием нагрузки и учитывала бы как конструкционные и технологические параметры шины, так и свойства агротехнологической среды при их контактном взаимодействии.

Ключевые слова: *двигатель, колесо, шина, опорная поверхность, давление, площадь контакта, пятно контакта*

ANALYSIS OF EXISTING MODELS OF INTERACTIONS OF WHEEL WITH SUPPORT SURFACE

O. A. Beshun, V. I. Achkevich, Ya. O. Melanchenko, D. O. Sheremet

Abstract. *In agricultural production, when machining and tractor units of technological operations, there is contact interaction of wheels with soil, which is accompanied by deformation and compacting of latter, which negatively affects change in its structure. In order to reduce the negative impact on the soil, it is necessary to determine the optimal structural parameters of the wheel propulsion of machine-tractor aggregates.*

The article analyzes the existing models of interaction of the wheel with the bearing surface and defines the main parameters that influence the contact area and the distribution of the load on the soil when applying the modern agrotechnological tire. The performed analysis of existing models of contact interaction between the tire and the reference surface made it possible to conclude that there are no mathematical models that take into account the properties of the soil and their influence on the deformation of the rubber. Taking into account the significant changes in the technologies of production of modern agrotechnological tires, the urgency of the problem of developing an adequate generalizing model of the interaction of the tire with the bearing surface, which would cover as much as possible the parameters influencing the deformation of the tire under the action of load, and taking into account both the structural and technological parameters of the tire and the properties agrotechnological environment at their contact interaction.

Key words: *propeller, wheel, tire, bearing surface, pressure, contact area, contact spot*