

УДК 629.33

Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса

Е.В. Балакина

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ),
пр-т им. В.И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Россия

Поступила в редакцию 30.01.2023.

После доработки 03.04.2023.

Принята к публикации 17.04.2023.

Рассмотрены вопросы фрикционного взаимодействия в контакте упругого колеса транспортного средства и плоской твёрдой опорной поверхности при разных условиях нагружения силой и моментом. Исследованы параметры этого взаимодействия: коэффициент сцепления; его составляющие, реализуемые участками с трением покоя и скольжения; коэффициент использования трения покоя; коэффициент пропорциональности трения покоя и относительный коэффициент предельного реализованного трения покоя. Предложены математические зависимости в виде гладких непрерывных функций для физически правильного расчёта указанных параметров. Рассмотрены два варианта нагружения упругого колеса силой и моментом. Показано, что значение коэффициента сцепления при заданном продольном скольжении колеса зависит от условий нагружения: боковой силы вдоль оси вращения колеса и момента в плоскости вращения, а также их последовательности появления. При одних и тех же значениях силы и момента, коэффициент сцепления может изменяться при разной последовательности их появления: до 70 % — при больших боковых силах (близких к весу) и до 12 % — при малых боковых силах (до 20 % от веса). Предложены три методики расчёта коэффициента сцепления в контакте упругого колеса с плоской твёрдой опорной поверхностью. Для получения усреднённых нулевых диаграмм производилась аппроксимация экспериментальных данных, полученных разными исследователями. Разработанные методики справедливы для всех упругих колёс транспортных средств и всех видов и состояний твёрдых опорных поверхностей. Результаты работы могут быть использованы с достаточной для практических расчётов точностью при проектном моделировании свойств устойчивости, управляемости и тормозной динамики колёсных машин.

Ключевые слова: упругое колесо, твёрдая опорная поверхность, фрикционное взаимодействие, условия нагружения, коэффициент сцепления, участки трения, разные универсальные зависимости.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Адрес для переписки:

Е.В. Балакина
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ),
пр-т им. В.И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Россия
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru; balakina@vstu.ru

Для цитирования:

Е.В. Балакина.
Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 2. — С. 122–134.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Address for correspondence:

E.V. Balakina
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Volgograd State Technical University» (VSTU),
Lenin avenue, 28, Volgograd 400005, Russia
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru; balakina@vstu.ru

For citation:

E.V. Balakina.
[Universal Dependences of Frictional Interaction Parameters in the Elastic Wheel — Road Contact].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 2, pp. 122–134 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Universal Dependences of Frictional Interaction Parameters in the Elastic Wheel — Road Contact

E.V. Balakina

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University» (VSTU),
Lenin avenue, 28, Volgograd 400005, Russia

Received 30.01.2023.

Revised 03.04.2023.

Accepted 17.04.2023.

Abstract

The questions of frictional interaction in the contact of an vehicle elastic wheel and a flat solid support surface under different loading conditions by force and moment are considered. The parameters of this interaction are investigated: the adhesion coefficient; its components by areas with static and sliding friction; static friction use coefficient; static friction proportionality coefficient; relative coefficient of limiting realized static friction. Mathematical dependences in the form of smooth continuous functions are proposed for physically correct calculation of the specified parameters. Two options for loading an elastic wheel with a force and a moment are considered. It is shown that the adhesion coefficient for a given longitudinal wheel slip depends on the loading conditions: the lateral force along the wheel rotation axis and the moment in the rotation plane, as well as their sequence of occurrence. With the same values of force and moment, the adhesion coefficient can change at different sequences of their occurrence: up to 70 % for high lateral forces (near to weight) and up to 12 % for small lateral forces (up to 20 % of weight). Three methods for calculating the adhesion coefficient in the contact of an elastic wheel with a flat solid support surface are proposed. When calculating the proposed characteristics of the methods, averaged zero diagrams were used in the absence of lateral wheel force for different elastic wheels and different types and conditions of road surfaces. To obtain them, the procedure of approximation of numerous experimental data of different researchers was carried out. The developed methods are valid for all vehicles elastic wheels and all types and conditions of solid supporting surfaces. The results of the work can be used with sufficient accuracy for practical calculations in the design modeling of the properties of stability, controllability and braking dynamics of wheeled vehicles.

Keywords: elastic wheel, solid support surface, frictional interaction, loading conditions, adhesion coefficient, friction areas, various universal dependencies.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Адрес для переписки:

Е.В. Балакина
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ),
пр-т им. В.И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Россия
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru; balakina@vstu.ru

Для цитирования:

Е.В. Балакина.
Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 2. — С. 122–134.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Address for correspondence:

E.V. Balakina
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Volgograd State Technical University» (VSTU),
Lenin avenue, 28, Volgograd 400005, Russia
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru; balakina@vstu.ru

For citation:

E.V. Balakina.
[Universal Dependences of Frictional Interaction Parameters in the Elastic Wheel — Road Contact].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 2, pp. 122–134 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134

Список использованных источников

1. **Balakina E.V.** Forms of $\phi_x - s_x$ -Diagrams of an Automobile Tire // International Scientific Conference “Balttrib’2017”, Aleksandras Stulginskis University Akademija, Kaunas, Lithuania, 16-17 November 2017. — 2017, 118—124
2. **Pacejka H.B.** Tire and Vehicle Dynamics. — Elsevier Ltd., USA. — 2012
3. **Клебанов Я.М., Бражникова А.М., Поляков К.А.** Взаимодействие торцов роликов и борта кольца конического роликоподшипника при гидродинамическом контакте // Трение и износ. — 2022 (43), № 6, 594—602
4. **Кристалный С.Р., Балакина Е.В., Попов Н.В.** Трение в контакте ошипованного колеса с твердой обледенелой опорной поверхностью // Трение и износ. — 2022 (43), № 1, 92—104
5. **Jimenez E. and Sandu C.** Experimental Investigation of the Tractive Performance of Pneumatic Tires on Ice // Tire Science and Technology (USA). — 2020 (48), no. 1, 22—45
6. **Jimenez E. and Sandu C.** Towards a Real-Time Pneumatic Tire Performance Prediction Using an Advanced Tire-Ice Interface Model // Journal of Terramechanics (UK). — 2018. doi:10.1016/j.jterra.2018.04.004
7. **Khaleghian S., Ghasemalizadeh O., and Taheri S.** Estimation of the Tire Contact Patch Length and Normal Load Using Intelligent Tires and Its Application in Small Ground Robot to Estimate the Tire-Road Friction // Tire Science and Technology (USA). — 2016 (44), no. 4, 248—261
8. **Kubba A.I., Hall G.J., Varghese S., Olatunbosun O.A., and Anthony C.J.** Modeling Of Contact Patch In Dual-Chamber Pneumatic Tires // Tire Science and Technology (USA). — 2018 (46), no. 2, 78—92
9. **Xueliang Gao, Yi Xiong, Weiping Liu, and Ye Zhuang.** Modeling and Experimental Study of tire Deformation Characteristics under High-Speed Rolling Condition // Polymer Testing (UK). — 2021 (99), 107052
10. **Garcia-Pozuelo D., Olatunbosun O.A., Romano L., Strano S., Terzo M., Tuononen A.J., and Xiong Y.** Development and Experimental Validation of a Real-Time Analytical Model for Different Intelligent Tyre Concepts // Vehicle System Dynamics (UK). — 2019, 1—19. doi:10.1080/00423114.2019.1566560
11. **Lee Hojong, Min Tae Kim, and Taheri Saied.** Estimation of Tire—Road Contact Features Using Strain-Based Intelligent Tire // Tire Science and Technology (USA). — 2018 (46), no. 4, 276—293
12. **Viehweger M., Vaseur C., van Aalst S., Acosta M., Regolin E., Alatorre A., Desmet W., Naets F., Ivanov V., Ferrara A., and Victorino A.** Vehicle State and Tyre Force Estimation: Demonstrations and Guidelines // Vehicle System Dynamics (UK). — 2020, no. 1, 1—28
13. **Farroni F., Russo R., and Timpone F.** Experimental Investigations on Rubber Friction Coefficient Dependence on Visco-Elastic Characteristics, Track Roughness, Contact Force, and Slide Velocity // Tire Science and Technology (USA). — 2017 (45), no. 1, 3—24
14. **Khaleghian S. et al.** A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation // Friction (China). — 2017 (5), no. 2, 123—146
15. **Khaleghian S., Ghasemalizadeh O., Taheri S., and Flintsch G.** A Combination of Intelligent Tire and Vehicle Dynamic Based Algorithm to Estimate the Tire-Road Friction // SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems. — 2019 (12), no. 2. doi:10.4271/06-12-02-0007
16. **Motamedi Mehran, Taheri Saied, and Sandu Corina** Rubber—Road Contact: Comparison of Physics-Based Theory and Indoor Experiments // Tire Science and Technology (USA). — 2016 (44), no. 3, 150—173
17. **Shao L., Jin C., Lex C., and Eichberger A.** Robust Road Friction Estimation During Vehicle Steering // Vehicle System Dynamics (UK). — 2019 (57), no. 4, 493—519

References

1. **Balakina E.V.** Forms of $\phi_x - s_x$ -Diagrams of an Automobile Tire // International Scientific Conference “Balttrib’2017”, Aleksandras Stulginskis University Akademija, Kaunas, Lithuania, 16-17 November 2017. — 2017, 118—124
2. **Pacejka H.B.** Tire and Vehicle Dynamics. — Elsevier Ltd, USA. — 2012
3. **Klebanov I.M., Brazhnikova A.M., and Polyakov K.A.** Tapered Roller Bearing Rib-Roller End Interaction at Hydrodynamic Contact // Journal of Friction and Wear. — 2022 (43), no. 6, 391—397
4. **Kristalnyi S.R., Balakina E.V., and Popov N.V.** Friction in Contact between a Studded Wheel and a Solid Ice-Covered Supporting Surface // Journal of Friction and Wear. — 2022 (43), no. 1, 65—73
5. **Jimenez E. and Sandu C.** Experimental Investigation of the Tractive Performance of Pneumatic Tires on Ice // Tire Science and Technology (USA). — 2020 (48), no. 1, 22—45
6. **Jimenez E. and Sandu C.** Towards a Real-Time Pneumatic Tire Performance Prediction Using an Advanced Tire-Ice Interface Model // Journal of Terramechanics (UK). — 2018. doi:10.1016/j.jterra.2018.04.004
7. **Khaleghian S., Ghasemalizadeh O., and Taheri S.** (2016) Estimation of the Tire Contact Patch Length and Normal Load Using Intelligent Tires and Its Application in Small Ground Robot to Estimate the Tire-Road Friction // Tire Science and Technology (USA). — 2016 (44), no. 4, 248—261
8. **Kubba A.I., Hall G.J., Varghese S., Olatunbosun O.A., and Anthony C.J.** Modeling of Contact Patch in Dual-Chamber Pneumatic Tires // Tire Science

- and Technology (USA). — 2018 (46), no. 2, 78—92
9. **Xueliang Gao, Yi Xiong, Weiping Liu, and Ye Zhuang.** Modeling and Experimental Study of Tire Deformation Characteristics under High-Speed Rolling Condition // Polymer Testing (UK). — 2021 (99), 107052
 10. **Garcia-Pozuelo D., Olatunbosun O.A., Romano L., Strano S., Terzo M., Tuononen A.J., and Xiong Y.** Development and Experimental Validation of a Real-Time Analytical Model for Different Intelligent Tyre Concepts // Vehicle System Dynamics (UK). — 2019, 1—19, doi:10.1080/00423114.2019.1566560
 11. **Lee Hojong, Min Tae Kim, and Taheri Saied.** Estimation of Tire-Road Contact Features Using Strain-Based Intelligent Tire // Tire Science and Technology (USA). — 2018 (46), no. 4, 276—293
 12. **Viehweger M., Vaseur C., van Aalst S., Acosta M., Regolin E., Alatorre A., Desmet W., Naets F., Ivanov V., Ferrara A., and Victorino A.** Vehicle State and Tyre Force Estimation: Demonstrations and Guidelines // Vehicle System Dynamics (UK). — 2020, no. 1, 1—28
 13. **Farroni F., Russo R., and Timpone F.** Experimental Investigations on Rubber Friction Coefficient Dependence on Visco-Elastic Characteristics, Track Roughness, Contact Force, and Slide Velocity // Tire Science and Technology (USA). — 2017 (45), no. 1, 3—24
 14. **Khaleghian S. et al.** A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation // Friction (China). — 2017 (5), no. 2, 123—146
 15. **Khaleghian S., Ghasemalizadeh O., Taheri S., and Flintsch G.** A Combination of Intelligent Tire and Vehicle Dynamic Based Algorithm to Estimate the Tire-Road Friction // SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems. — 2019 (12), no. 2. doi:10.4271/06-12-02-0007
 16. **Motamedi Mehran, Taheri Saied, and Sandu Corina.** Rubber-Road Contact: Comparison of Physics-Based Theory and Indoor Experiments // Tire Science and Technology (USA). — 2016 (44), no. 3, 150—173
 17. **Shao L., Jin C., Lex C., and Eichberger A.** Robust Road Friction Estimation During Vehicle Steering // Vehicle System Dynamics (UK). — 2019 (57), no. 4, 493—519

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by