

УДК 629.33

Трение в контакте ошипованного колеса с твердой обледенелой опорной поверхностью

С.Р. Кристальный¹, Е.В. Балакина², Н.В. Попов¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр-т, д. 64, г. Москва 125319, Россия

²Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), пр-т им. В.И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Россия

Поступила в редакцию 06.04.2021.

После доработки 18.02.2022.

Принята к публикации 21.02.2022.

Проведены натурные экспериментальные исследования процесса торможения автомобиля и измерены $\varphi_x - s_x$ -диаграммы сцепного взаимодействия ошипованных автомобильных колёс с твёрдой обледенелой опорной поверхностью. Испытания проводились при температуре воздуха $-7,2$ °С и при температуре льда $-9,2$ °С. Объектом натурных испытаний был легковой автомобиль массой 1123 кг (конструктивная масса и масса водителя). Ошипованные шины были установлены на заднюю ось автомобиля с принудительно заблокированным задним межколёсным дифференциалом. Так обеспечивались приблизительно одинаковые значения продольного скольжения задних колёс. Тормозные механизмы передних колёс были отключены. Измеренные экспериментальные $\varphi_x - s_x$ -диаграммы были аппроксимированы с целью получения их математического описания. С их использованием разработана и реализована основанная на расчёте коэффициента $SFPC$ универсальная методика теоретического определения $\varphi_x - s_x$ -диаграммы для ошипованного колеса, контактирующего с обледенелой опорой при разных внешних условиях. Методика позволяет при моделировании движения транспортного средства рассчитывать текущие значения коэффициентов сцепления на всех ошипованных колёсах, силы и моменты в контакте каждого колеса для описания его траектории в плоскости опорной поверхности.

Ключевые слова: ошипованное колесо, обледенелая опорная поверхность, трение в контакте, $\varphi_x - s_x$ -диаграмма, расчёт.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

Адрес для переписки:

Е.В. Балакина
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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

С.Р. Кристальный, Е.В. Балакина, Н.В. Попов.
Исследование трения в контакте ошипованного колеса с твердой обледенелой опорной поверхностью.

Трение и износ.
2022. – Т. 43, № 1. – С. 92–104.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

For citation:

S.R. Kristalnyi, E.V. Balakina, and N.V. Popov.
[Friction in Contact of a Thorning Wheel with Solid Ice-Covered Support Surface].

Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 1, pp. 92–104 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

Friction in the Contact of a Thorning Wheel with Solid Ice-Covered Support Surface

S.R. Kristalnyi¹, E.V. Balakina², and N.V. Popov¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University» (MADI),
Leningradsky prospect, 64, Moscow 125319, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University» (VSTU),
Lenin Avenue, 28, Volgograd 400005, Russia

Received 06.04.2021.

Revised 18.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

Abstract

The paper presents the results of a contact friction study of a thorning elastic wheel with a solid ice-covered support surface. Full-scale experimental studies of the car braking process have been carried out and $\varphi_x - s_x$ -diagrams of the adhesion interaction of thorning automobile wheels with a solid ice-covered support surface have been measured. The tests were carried out at an air temperature of -7.2 °C and at an ice temperature of -9.2 °C. The full-scale tests object was a passenger car weighing 1123 kg (design weight and driver weight). Thorning tires were installed on the car rear axle with a forcibly locked rear cross-axle differential. This ensured approximately the same values of the rear wheels longitudinal sliding. The front wheel brakes were disabled. The measured experimental $\varphi_x - s_x$ -diagrams were approximated in order to obtain their mathematical description. With their use, a universal method based on the *SFPC* coefficient calculation was developed and implemented for the theoretical determination of the $\varphi_x - s_x$ -diagram for a thorning wheel in contact with an icy support under different external conditions. The technique allows, when simulating the vehicle movement, to calculate the adhesion coefficients current values on all thorning wheels, the forces and moments in the contact of each wheel to describe its trajectory in the supporting surface plane.

Keywords: thorning wheel, ice-covered support surface, friction in contact, $\varphi_x - s_x$ -diagram, calculation.

DOI:10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

Адрес для переписки:

Е.В. Балакина
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:

С.Р. Кристальный, Е.В. Балакина, Н.В. Попов.
Исследование трения в контакте ошипованного колеса с твердой
обледенелой опорной поверхностью.
Трение и износ.
2022. — Т. 43, № 1. — С. 92—104.
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

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:

S.R. Kristalnyi, E.V. Balakina, and N.V. Popov.
[Friction in Contact of a Thorning Wheel with Solid Ice-Covered
Support Surface].
Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 1, pp. 92–104 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104

Список использованных источников

1. **Балакина Е.В.** Расчет геометрического положения и размеров зон трения покоя и скольжения в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорной поверхностью // Трение и износ. — 2017 (38), № 2, 136—143
2. **Балакина Е.В.** Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы // Трение и износ. — 2019 (40), № 6, 756—765
3. **Задворнов В.Н., Балакина Е.В., Мищенко Н.А.** Прогнозирование износа протектора по жесткостным характеристикам шин // Трение и износ. — 2020 (41), № 4, 485—490
4. **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
5. **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
6. **Khaleghian S. et al.** A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation // Friction (China). — 2017 (5), no. 2, 123—146
7. **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
8. **Ivković I. et al.** Dynamic Friction in the Braking, Tire-Road Contact // Int. Conf. on Traffic and Transport Engineering, Belgrade. — 2014, 420—430
9. **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
10. **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
11. **Anahita Emami et al.** Physics-Based Friction Model with Potential Application in Numerical Models for Tire-Road Traction // Dynamic Systems and Control Conference, USA. — 2017
12. **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.
13. **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
14. **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
15. **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
16. **Ružinskas A. and Sivilevičius H.** Investigation and Comparison of Tires Performance on Ice // Environmental Engineering. 10th Int. Conf., Lithuania, April, 2017. — 2017
17. **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
18. **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
19. **Ivanov A.M., Gaevskiy V.V., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Shadrin S.S., and Fomichev V.A.** Adhesion Properties of Studded Tires Study // Journal of Industrial Pollution Control (India). — 2017 (33), no. 1, 988—993
20. **Ivanov A.M., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Toporkov M.A., and Isakova M.I.** Method of Determining Coupling Characteristics of Studded Tires with Slipping and Experience of Its Application // Journal of Physics: Conference Series. — 2020 (788), 012023, doi:10.1088/1757-899X/788/1/012072

References

1. **Balakina E.V.** Calculation of the geometric position and the sizes of the static friction and sliding friction zones at the point of contact between an elastic wheel and a firm surface // Journal of Friction and Wear. — 2017 (38), № 2, 144—149
2. **Balakina E.V.** Calculation of the Friction Coefficient between a Steady Elastic Wheel and a Solid Support Surface in the Presence of a Lateral Force // Journal of Friction and Wear. — 2019 (40), № 6, 573—579
3. **Zadvornov V.N., Balakina E.V. Mishenkov N.A.** Protector Wear Forecasting on Elastic Characteristics of Tires // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), № 4, 354—358
4. **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
5. **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
 6. **Khaleghian S. et al.** A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation // Friction (China). — 2017 (5), no. 2, 123—146
 7. **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
 8. **Ivković I. et al.** Dynamic Friction in the Braking, Tire-Road Contact // Int. Conf. on Traffic and Transport Engineering, Belgrade. — 2014, 420—430
 9. **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
 10. **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
 11. **Anahita Emami et al.** Physics-Based Friction Model with Potential Application in Numerical Models for Tire-Road Traction // Dynamic Systems and Control Conference, USA. — 2017
 12. **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
 13. **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
 14. **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
 15. **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
 16. **Ružinskas A. and Sivilevičius H.** Investigation and Comparison of Tires Performance on Ice // Environmental Engineering. 10th Int. Conf., Lithuania, April, 2017. — 2017
 17. **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
 18. **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
 19. **Ivanov A.M., Gaevskiy V.V., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Shadrin S.S., and Fomichev V.A.** Adhesion Properties of Studded Tires Study // Journal of Industrial Pollution Control (India). — 2017 (33), no. 1, 988—993
 20. **Ivanov A.M., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Toporkov M.A., and Isakova M.I.** Method of Determining Coupling Characteristics of Studded Tires with Slipping and Experience of Its Application // Journal of Physics: Conference Series. — 2020 (788), 012023, doi:10.1088/1757-899X/788/1/012072

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