

УДК 621.865.8: 629.016

Экспериментальное определение коэффициента сцепления колесных робототехнических устройств с ферромагнитной поверхностью

С.И. Корягин, О.В. Шарков, Н.Л. Великанов

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Experimental determination of the wheeled robotic machine engagement coefficient on the ferromagnetic surface

S.I. Koryagin, O.V. Sharkov, N.L. Velikanov

Immanuel Kant Baltic Federal University

Робототехнические устройства, перемещающиеся по ферромагнитным поверхностям, применяют для обследования и ремонта резервуаров, корпусов морских судов и металлических сооружений. Контакт между колесами робототехнических устройств и поверхностью обеспечивают постоянные или переменные магниты. Перемещается устройство только при обеспечении достаточного сцепления колес с опорной поверхностью. Сцепление характеризуется коэффициентом, зависящим от многих факторов, включая материалы поверхностей и их физическое состояние. Коэффициент сцепления определяют экспериментальным путем. Исследовано влияние на коэффициент сцепления слоя краски и коррозии на поверхности. Предложена экспериментальная установка, позволяющая находить коэффициент сцепления в движении при наличии проскальзывания. При натурном эксперименте использована крашенная ферромагнитная поверхность с язвенной, равномерной коррозией и без нее. Варьируемыми параметрами являлись нагрузка робототехнического устройства и скорость скольжения колес. Установлено, что на некрашенных поверхностях увеличение скорости скольжения приводит к уменьшению коэффициента сцепления, на крашенных — коэффициент сцепления остается почти неизменным.

EDN: MKSUHP, <https://elibrary/mksuhp>

Ключевые слова: робототехническое устройство, коэффициент сцепления, ферромагнитная поверхность, скорость скольжения, натурный эксперимент

Robotic machines moving on the ferromagnetic surfaces are used to inspect and repair tanks, ship hulls and metal structures. Permanent or variable magnets ensure the contact between machine wheels and the surface. The machine moves only with the ensured sufficient adhesion between the wheels and the surface. Adhesion is characterized by a coefficient that depends on many factors, including surface materials and their physical condition. The adhesion coefficient is determined experimentally. Paint layer and surface corrosion effect on the adhesion coefficient was studied. An experimental setup was proposed making it possible to find the adhesion coefficient in motion with slipping. The full-scale experiment used a painted surface with and without pitting and uniform corrosion. Variable parameters included the robotic machine load and the sliding speed. It was established that an increase in sliding speed on the unpainted surface led to a decrease in the adhesion coefficient, while on painted surfaces the adhesion coefficient remained practically unchanged.

EDN: MKSUHP, <https://elibrary/mksuhp>

Keywords: robotic machine, adhesion coefficient, ferromagnetic surface, sliding speed, full-scale experiment

В современной технике находят применение роботы и робототехнические устройства (РТУ), перемещающиеся по различным инженерным конструкциям, выполненным из ферромагнитных материалов [1–4].

Среди них следует выделить РТУ колесного типа [5–8], обладающие такими достоинствами, как простота конструкции и удобство эксплуатации, хорошая маневренность, достаточная грузоподъемность и др.

Возможность перемещения РТУ по произвольно ориентированной ферромагнитной поверхности (ФП) достигается применением в их конструкции магнитов разного типа — постоянных, электрических, комбинированных, установленных в корпусе или непосредственно в колесах.

При проектировании и эксплуатации таких РТУ необходимо знать значения коэффициентов сцепления в контакте колес и ФП.

К настоящему времени выполнено большое количество теоретических [9–13] и экспериментальных [14–18] исследований, посвященных определению силы сцепления колес автотранспортных средств с дорожными покрытиями разного типа — асфальтовыми, бетонными и др. Полученные данные нельзя использовать для РТУ вследствие различия физико-механических свойств ФП.

Результаты исследований коэффициента сцепления колес поездов с рельсом [19–22] тоже нельзя применять, так как в этом случае происходит контакт между двумя ферромагнитными материалами. Оценка коэффициента сцепления обрешиненных колес с ФП является малоизученной задачей.

Цель работы — экспериментальное исследование влияния типа и состояния ФП на коэффициент сцепления колеса РТУ.

Основные положения задачи определения коэффициента сцепления. Сила сцепления между колесами РТУ и опорной ФП существенно влияет на устойчивость его передвижения.

По физической сущности сила сцепления представляет собой разновидность силы сухого трения, реализуемого в процессе перекатывания колеса по опорной поверхности.

Коэффициентом сцепления между колесом и опорной поверхностью передвижения принято называть отношение максимальной силы сцепления колеса с поверхностью $F_{\text{сц}}$ к нормальной реакции поверхности в точке контакта с колесом F_N [23–25]:

$$\psi = \frac{F_{\text{сц}}}{F_N} = \frac{M}{rF_N}, \quad (1)$$

где M — момент сцепления колеса с поверхностью; r — динамический радиус (расстояние от оси колеса до горизонтальной плоскости, проходящей через равнодействующую касательных реакций в зоне контакта).

Буксование колес РТУ сопровождается его скольжением по поверхности передвижения, что указывает как на единую природу сил трения и сцепления, так и на их взаимное влияние. Поэтому будем использовать единое понятие силы сцепления, включающее в себя оба определения. Силу трения покоя будем рассматривать как силу сцепления покоя.

ФП могут быть различными: крашеными и некрашеными, гладкими, с различной степенью коррозии и т. п. Вследствие такого разнообразия состояния поверхностей существует широкий диапазон коэффициента сцепления, а теоретическое описание различных состояний ФП не представляется возможным.

Наличие большого количества факторов, влияющих на сцепление, и необходимость изучения их действия в совокупности и взаимовлиянии требует проведения экспериментальных исследований.

Испытательный стенд и методика проведения эксперимента. Для определения коэффициентов сцепления обрешиненного колеса РТУ с ФП разработан испытательный стенд (рис. 1), позволяющий реализовать натурный эксперимент.

Испытательный стенд состоит из рамы 1, на которой размещен регулируемый привод, состоящий из реверсивного электродвигателя 2 с регулируемой частотой вращения. Электродвигатель 2 посредством конической передачи 3 соединен с тяговым барабаном 4, на который наматывается трос 5, взаимодействующий с динамометром 6, закрепленным на передней поверхности тележки 7. Последняя имеет че-

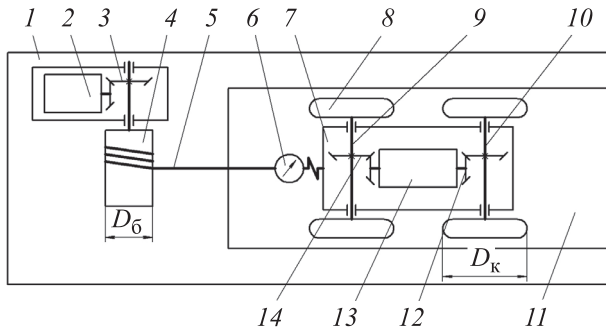


Рис. 1. Кинематическая схема испытательного стенда

тыре колеса 8, установленных на переднем 9 и заднем 10 валах, которые с помощью конических передач 12 и 14 связаны с реверсивным электродвигателем 13 с регулируемой частотой вращения, имеющим два выходных вала. Колеса тележки взаимодействуют со сменной опорной ферромагнитной площадкой 11, закрепленной на раме.

Испытательный стенд позволяет определять коэффициент сцепления колеса с ФП в двух режимах: при одновременном качении и скольжении (буксовании) колес и без учета скольжения колес.

В первом режиме на раме закрепляют сменную опорную ферромагнитную площадку, на которой размещают тележку. Затем подают питание на электродвигатель 2 и с помощью регулируемого привода устанавливают заданную частоту вращения тягового барабана, после чего трос начинает разматываться с линейной скоростью.

Одновременно подают питание на электродвигатель 13 тележки, вследствие чего устанавливается и поддерживается заданная частота вращения переднего и заднего валов. Колеса тележки вращаются с окружной скоростью v_k . При этом скорость линейного перемещения тележки должна быть несколько больше линейной скорости разматывания троса.

Окружные скорости барабана (линейная скорость разматывания троса) v_t и колеса v_k определяют по формулам

$$v_t = \frac{\pi D_\delta n_\delta}{60}; \quad v_k = \frac{\pi D_\kappa n_\kappa}{60},$$

где D_δ и n_δ — диаметр и частота вращения барабана; D_κ — диаметр качения (принимаемый равным реальному диаметру колеса); n_κ — частота вращения колеса.

Тележка перемещаясь, начинает натягивать трос, и вследствие разности скоростей v_k и v_t колеса начинают пробуксовывать со скоростью скольжения $v_{ск} = v_k - v_t$. В этот момент динамометр измеряет силу тяги.

Коэффициент сцепления определяют по формуле (1). Силу сцепления колеса с ФП принимают равной силе тяги, а силу нормальной реакции на колесо F_N создают набором грузов, устанавливаемых на тележку. При определении коэффициента сцепления вводят допущение, что сила веса тележки равномерно распределена между всеми колесами.

Во втором режиме на раме закрепляют сменную опорную ферромагнитную площадку, где размещают тележку. Затем подают питание на электродвигатель 2 и с помощью регулируемого привода устанавливают заданную частоту вращения барабана, после чего трос начинает наматываться на него. Питание на электродвигатель 13 тележки не подают, вследствие чего она сдвигается под действием силы натяжения троса, значение которой фиксирует динамометр. Коэффициент сцепления определяют по формуле (1).

При натурном эксперименте коэффициент сцепления определяли для шести типов ФП. В качестве базовых выбрали крашеную и некрашеную поверхности, каждая из которых была гладкой, с равномерной или язвенной коррозией. Материал ФП — сталь Ст5сп. В экспериментах использовали тележку, имеющую обрезиненные колеса.

Как независимые факторы принимали скорость скольжения колеса $v_{ск}$ и нормальную реакцию F_N .

Результаты экспериментов и обсуждение. Зависимости коэффициента сцепления колеса μ от нормальной реакции F_N при отсутствии скольжения колеса для некрашеной и крашеной ФП, находящихся в различных состояниях (с язвенной, равномерной коррозией и без нее — гладких), приведены на рис. 2, а и б.

Анализ полученных результатов показал, что при отсутствии скольжения колеса с увеличением нагрузки коэффициент сцепления падает для всех видов ФП, нелинейно стремясь к некоторому пределу. На крашеной ФП коэффициент сцепления в среднем на 10...20 % меньше, чем на некрашеной ФП.

Равномерно корродированная ФП увеличивает коэффициент сцепления в 1,12...1,34 раза

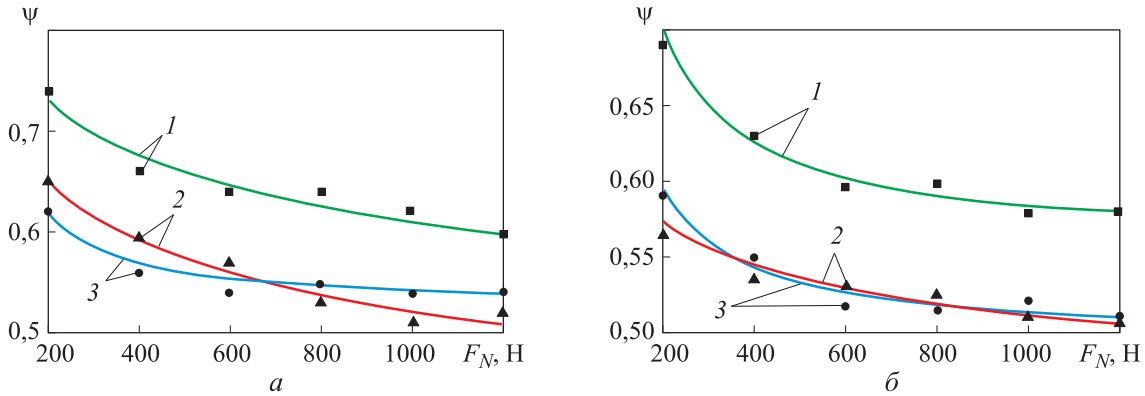


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости коэффициента сцепления ψ от нормальной реакции F_N для некрашеной (а) и крашеной (б) ФП, находящихся в различных состояниях: 1 и 2 — ФП с язвенной и равномерной коррозией; 3 — ФП без коррозии

по сравнению с гладкой ФП, у ФП с язвенной коррозией коэффициент сцепления в 1,15...1,36 раза больше, чем у других ФП. Это объясняется внедрением резинового покрытия колеса в неровности поверхности.

На гладкой ФП и равномерно корродированной крашеной ФП коэффициенты сцепления примерно одинаковые, что обусловлено сглаживанием неровностей равномерно корродированной ФП в результате окраски.

Зависимости коэффициента сцепления ψ от скорости скольжения $v_{ск}$ при нагрузке на каждое колесо 1200 Н для некрашеной и крашеной ФП, находящихся в различных состояниях (с язвенной, равномерной коррозией и без нее), приведены на рис. 3, а и б.

Анализ полученных результатов, показал, что с увеличением скорости скольжения коэффициент сцепления некрашеной ФП уменьшается в среднем в 1,11...1,14 раза, причем для равномерно корродированных ФП проходит через максимум. Снижение коэффициента

сцепления связано с попаданием под поверхность колес продуктов коррозии.

В отличие от нормальной нагрузки, скорость скольжения колеса оказывает существенно меньшее влияние на коэффициент его сцепления с крашеной и некрашеной ФП. Уменьшение коэффициента сцепления для некрашеной ФП составляет 2,8...6,9 %. Для крашеной ФП коэффициент сцепления остается примерно постоянным, изменяясь в относительно узком диапазоне в 1,01...1,06 раза.

Выводы

1. Разработана установка и методика эксперимента, позволяющие проводить замеры коэффициента сцепления колес РТУ и ФП с учетом скольжения.
2. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии нормальной нагрузки на коэффициент сцепления.

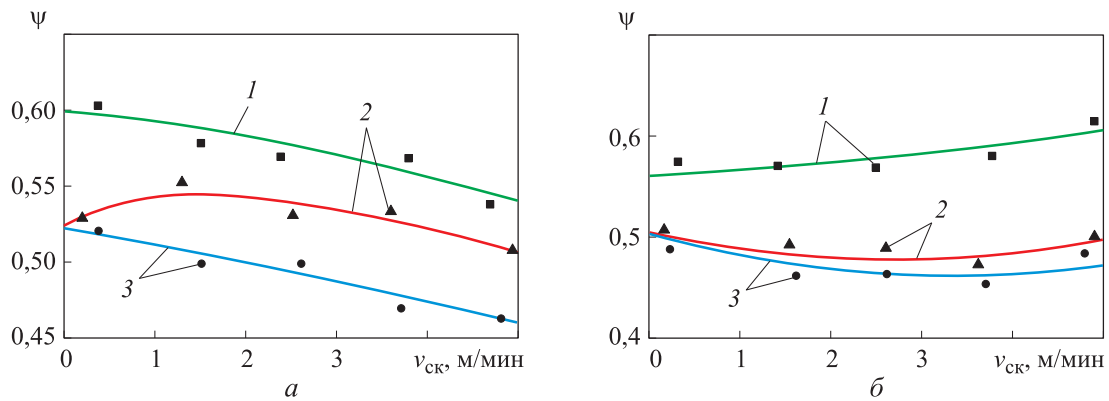


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости коэффициента сцепления ψ от скорости скольжения колеса $v_{ск}$ для некрашеной (а) и крашеной (б) ФП, находящихся в различных состояниях: 1 и 2 — ФП с язвенной и равномерной коррозией; 3 — ФП без коррозии

3. Скорость скольжения колеса больше влияет на коэффициент его сцепления с некрашеной ФП, чем с крашеной ФП.

4. Результаты эксперимента можно использовать при проектировании колесных РТУ, перемещающихся по ФП.

Литература

- [1] Сырых Н.В., Чашухин В.Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2019, № 5, с. 163–173, doi: <https://doi.org/10.1134/S0002338819050135>
- [2] Серебрянный В.В., Лапин Д.В., Мокаева А.А. Экспериментальные исследования динамики мобильного робота с механизмом вертикального перемещения на магнитных гусеничных движителях. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2020, № 4, с. 68–75, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920040136>
- [3] Fan J., Yang C., Chen Y. et al. An underwater robot with self-adaption mechanism for cleaning steel pipes with variable diameters. *Ind. Robot*, 2018, vol. 45, no 2, pp. 193–205, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-09-2017-0168>
- [4] Song W., Jiang H., Wang T. et al. Design of permanent magnetic wheel-type adhesion-locomotion system for water-jetting wall-climbing robot. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 7, art. 168781401878737, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018787378>
- [5] Градецкий В.Г., Князьков М.М. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2014, № 1, с. 9–16.
- [6] Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Применение мобильных устройств магнитного типа для очистки поверхностей корпусов судов. *Морские интеллектуальные технологии*, 2022, № 2–1, с. 57–65, doi: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.007>
- [7] Tavakoli M., CarlosViegas C., Marques L. et al. OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures. *Rob. Auton. Syst.*, 2013, vol. 61, no. 9, pp. 997–1007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.05.005>
- [8] Yanqiong F.E.I., Libo S. Design and analysis of modular mobile robot with magnetic wheels. *WSEAS Trans. Appl. Theor. Mech.*, 2008, vol. 3, no. 12, pp. 902–911.
- [9] Балакина Е.В. Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы. *Трение и износ*, 2019, т. 40, № 6, с. 756–765.
- [10] Молев Ю.И., Прошин Д.Н., Черевастов М.Г. Статистические результаты определения коэффициента сцепления шин с дорогой на основе данных, приведенных в автомобильных журналах Российской Федерации. *Транспортные системы*, 2022, № 3, с. 19–22, doi: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2022_3_19
- [11] Колесникович А.Н., Выгонный А.Г., Гончарко А.А. и др. Расчетная оценка влияния коэффициентов сцепления на силовые и мощностные показатели в приводе двоясных колес самосвала особо большой грузоподъемности при повороте. *Актуальные вопросы машиноведения*, 2021, т. 10, с. 97–100.
- [12] Lian Y., Liu S., Sun Z. et al. A braking force distribution strategy for four-in-wheel-motor-driven electric vehicles on roads with different friction coefficients. *Int. J. Automot. Technol.*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 1057–1073, doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0095-2>
- [13] Ping X., Cheng S., Yue W. et al. Adaptive estimations of tyre-road friction coefficient and body's sideslip angle based on strong tracking and interactive multiple model theories. *P. I. Mech. Eng. D-J. Aut.*, 2020, vol. 234, no. 14, pp. 3224–32381, doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020941410>
- [14] Соустова Л.И., Чуйко И.Ю. Определение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2019, № 2, с. 68–77, doi: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).68-77](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).68-77)
- [15] Гончарова М.А., Бондарев Б.А., Акчурин Т.К. Определение коэффициента сцепления колес автотранспорта с дорожной разметкой. *Транспортные сооружения*, 2019, т. 6, № 3, doi: <https://doi.org/10.15862/37SATS319>

- [16] Бочкарев Д.И., Шаповалов В.М., Петрусеви́ч В.В. и др. Методология оценки воспроизводимости коэффициента сцепления асфальтобетонного покрытия при его профилактической обработке в лабораторных и реальных условиях дорожных испытаний. *Автомобильные дороги и мосты*, 2019, № 1, с. 25–30.
- [17] Hsu C-Y., Ni S-P., Hsiao T. Look-up table-based tire-road friction coefficient estimation of each driving wheel. *IEEE Contr. Syst. Lett.*, 2022, vol. 6, pp. 2168–2173, doi: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3137722>
- [18] Tung N.T. Experimental analysis for determination of longitudinal friction coefficient function in braking tractor semi-trailer. *Int. J. Eng. Trans. A: Basics*, 2021, vol. 34, no. 7, pp. 1799–1803, doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.07a.24>
- [19] Корсун А.А., Иванов П.Ю., Круглов С.П. и др. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде. *Вестник РГУПС*, 2022, № 2, с. 104–113, doi: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_2_104
- [20] Майба И.А., Глазунов Д.В. Способы регулирования коэффициента сцепления в контакте «колесо-рельс». *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2018, № 1, с. 27–31.
- [21] Keropyan A., Gorbatyuk S. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 150, pp. 406–410, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
- [22] Matsumoto A., Michitsuji Y., Ichiyanagi Y. et al. Safety measures against flange-climb derailment in sharp curve-considering friction coefficient between wheel and rail. *Wear*, 2019, vol. 432–433, art. 202931, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202931>
- [23] Кузнецов Н.П., Рассохин С.А. Определение коэффициента сцепления шины автомобиля с полотном дороги на месте дорожно-транспортное происшествие. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2009, № 2, с. 34–41.
- [24] ГОСТ 33078–2014. *Дороги автомобильные общего пользования. Методы измерения сцепления колеса автомобиля с покрытием*. Москва, Стандартинформ, 2016. 12 с.
- [25] Чичинадзе А.В., ред. *Основы трибологии*. Москва, Машиностроение, 2001. 663 с.

References

- [1] Syrykh N.V., Chashchukhin V.G. Wall-climbing robots with permanent-magnet contact devices: design and control concept of the contact devices. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2019, no. 5, pp. 163–173, doi: <https://doi.org/10.1134/S0002338819050135> (in Russ.). (Eng. version: *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 818–827, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230719050137>)
- [2] Serebrennyy V.V., Lapin D.V., Mokaeva A.A. Experimental studies of the dynamics of a mobile robot with a vertical movement mechanism on magnetic caterpillar movers. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2020, no. 4, pp. 68–75, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920040136> (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 4, pp. 329–334, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618820040135>)
- [3] Fan J., Yang C., Chen Y. et al. An underwater robot with self-adaption mechanism for cleaning steel pipes with variable diameters. *Ind. Robot*, 2018, vol. 45, no 2, pp. 193–205, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-09-2017-0168>
- [4] Song W., Jiang H., Wang T. et al. Design of permanent magnetic wheel-type adhesion-locomotion system for water-jetting wall-climbing robot. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 7, art. 168781401878737, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018787378>
- [5] Gradetskiy V.G., Knyazkov M.M. Present and future trends of wall climbing robot's development for extreme conditions. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2014, no. 1, pp. 9–16. (In Russ.).
- [6] Koryagin S.I., Velikanov N.L., Sharkov O.V. The use of mobile devices of magnetic type for cleaning the surfaces of ship hulls. *Morskie intellektualnye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2022, no. 2–1, pp. 57–65, doi: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.007> (in Russ.).
- [7] Tavakoli M., CarlosViegas C., Marques L. et al. OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures. *Rob. Auton. Syst.*, 2013, vol. 61, no. 9, pp. 997–1007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.05.005>

- [8] Yanqiong F.E.I., Libo S. Design and analysis of modular mobile robot with magnetic wheels. *WSEAS Trans. Appl. Theor. Mech.*, 2008, vol. 3, no. 12, pp. 902–911.
- [9] 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. *Trenie i iznos*, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 756–765. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 573–579, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366619060047>)
- [10] Molev Yu.I., Proshin D.N., Cherevastov M.G. Statistical results of tyre grip coefficient determination based on data given in Russian Federation car magazines. *Transportnye sistemy*, 2022, no. 3, pp. 19–22, doi: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2022_3_19 (in Russ.).
- [11] Kolesnikovich A.N., Vygonyy A.G., Goncharko A.A. et al. Calculated estimation of the adhesion coefficient effect on power indicators in the drive of doubled wheels of a dump truck with extra high load capacity when turning. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical Issues of Mechanical Engineering], 2021, vol. 10, pp. 97–100. (In Russ.).
- [12] Lian Y., Liu S., Sun Z. et al. A braking force distribution strategy for four-in-wheel-motor-driven electric vehicles on roads with different friction coefficients. *Int. J. Automot. Technol.*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 1057–1073, doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0095-2>
- [13] Ping X., Cheng S., Yue W. et al. Adaptive estimations of tyre-road friction coefficient and body's sideslip angle based on strong tracking and interactive multiple model theories. *P. I. Mech. Eng. D-J. Aut.*, 2020, vol. 234, no. 14, pp. 3224–32381, doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020941410>
- [14] Soustova L.I., Chuyko I.Yu. Determining the ratio of the wheel grip with the road by means of a calculation and experiments. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, no. 2, pp. 68–77, doi: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).68-77](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).68-77) (in Russ.).
- [15] Goncharova M.A., Bondarev B.A., Akchurin T.K. Determination of the coefficient of adhesion of the wheels of vehicles with road markings. *Transportnye sooruzheniya* [Russian Journal of Transport Engineering], 2019, vol. 6, no. 3, doi: <https://doi.org/10.15862/37SATS319> (in Russ.).
- [16] Bochkarev D.I., Shapovalov V.M., Petrusovich V.V. et al. Methodology for the evaluation of the reproducibility of the coefficient coupling asphalt-concrete coating with his preventive treatment in laboratory and real conditions of road tests. *Avtomobilnye dorogi i mosty*, 2019, no. 1, pp. 25–30. (In Russ.).
- [17] Hsu C-Y., Ni S-P., Hsiao T. Look-up table-based tire-road friction coefficient estimation of each driving wheel. *IEEE Contr. Syst. Lett.*, 2022, vol. 6, pp. 2168–2173, doi: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3137722>
- [18] Tung N.T. Experimental analysis for determination of longitudinal friction coefficient function in braking tractor semi-trailer. *Int. J. Eng. Trans. A: Basics*, 2021, vol. 34, no. 7, pp. 1799–1803, doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.07a.24>
- [19] Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Kruglov S.P. et al. Mathematical model of the operation of the train braking system in the process of braking according to the dynamics of the friction pad coefficient on the wheel and the rail coupling in a computer environment. *Vestnik RGUPS*, 2022, no. 2, pp. 104–113, doi: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_2_104 (in Russ.).
- [20] Mayba I.A., Glazunov D.V. Ways of regulation of the coefficient of friction to contact "wheel-rail". *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2018, no. 1, pp. 27–31. (In Russ.).
- [21] Keropyan A., Gorbatyuk S. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 150, pp. 406–410, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
- [22] Matsumoto A., Michitsuji Y., Ichiyanagi Y. et al. Safety measures against flange-climb derailment in sharp curve-considering friction coefficient between wheel and rail. *Wear*, 2019, vol. 432–433, art. 202931, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202931>
- [23] Kuznetsov N.P., Rassokhin S.A. Determination of the grip coefficient of the car tyre on the road surface at the crash site. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2009, no. 2, pp. 34–41. (In Russ.).
- [24] GOST 33078–2014. *Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Metody izmereniya stsepleniya koleasa avtomobilya s pokrytiem* [State standard GOST 33078-2014. Automobile

roads of general use. Methods of measuring friction of vehicle wheel with the road surface]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 12 p. (In Russ.).

[25] Chichinadze A.V., ed. *Osnovy tribologii* [Fundamentals of tribology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 663 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 25.09.2023

Информация об авторах

КОРЯГИН Сергей Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий». Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru).

ШАРКОВ Олег Васильевич — доктор технических наук, доцент, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий». Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий». Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. Экспериментальное определение коэффициента сцепления колесных робототехнических устройств с ферромагнитной поверхностью. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 18–25.

Please cite this article in English as:

Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Experimental determination of the engagement coefficient of wheeled robotic devices with a ferromagnetic surface. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 4, pp. 18–25.

Information about the authors

KORYAGIN Sergey Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Educational and Scientific Cluster "Institute of High Technologies". Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru).

SHARKOV Oleg Vasilyevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of Educational and Scientific Cluster «Institute of High Technologies». Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

VELIKANOV Nikolai Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Educational and Scientific Cluster «Institute of High Technologies». Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru).