

Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс»

И. Л. Парахненко✉

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ iparahnenko@usurt.ru

Резюме

Взаимодействие пути и подвижного состава, а именно, снижение износа рельсов и колес, актуальное направление исследования в настоящее время в железнодорожной отрасли. Первоочередной мерой по улучшению взаимодействия в паре «колесо – рельс» в странах Европы, Америки и России принята лубрикация боковой поверхности наружной рельсовой нити. Вопрос эффективности лубрикации приобрел большое значение после опытов по нанесению смазочного материала на поверхность головки рельса (дорожку катания), проведенных на дорогах Северной Америки. По итогам экспериментов в прямых участках получено снижение силового воздействия на путь от колес подвижного состава, значительное снижение расходов, затрачиваемых на электрическую тягу и ремонт элементов верхнего строения и подвижного состава. В статье приведены результаты исследований вариантов трибологического состояния (изменение коэффициентов трения на дорожках катания) рельсовых нитей и выбор оптимального способа, обеспечивающего наилучшее взаимодействие колес подвижного состава и рельсов. Представленные варианты получены путем моделирования продольных и боковых сил в программном комплексе «Универсальный механизм». На основании полученных в ходе моделирования результатов сделаны выводы о положительном влиянии снижения коэффициента трения по дорожке катания рельсов на продольные и боковые силы, возникающие в зоне контакта «колесо – рельс», доказана безопасность нанесения смазочного материала на поверхность головок рельсов, рассчитана возможная экономия эксплуатационных расходов от снижения расходов на топливно-энергетические ресурсы.

Ключевые слова

коэффициент трения, продольная сила, боковая сила, дорожка катания рельса, лубрикация

Для цитирования

Парахненко И. Л. Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс» // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 165–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).165-170

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.09.2021, поступила после рецензирования: 25.09.2021, принята к публикации: 02.10.2021

Control friction on the skate as a method of reducing force interaction in the «wheel – rail» contact

I. L. Parakhnenko✉

Ural State Transport University, Yekaterinburg, the Russian Federation

✉ iparahnenko@usurt.ru

Abstract

The interaction between track and rolling stock and, namely, the reducing of the wear of rails and wheels, is currently an up to date direction in the railway industry. The primary measure to improve the interaction in the "wheel-rail" pair in the countries of Europe, America and Russia is the lubrication of the side surface of the outer rail thread. The question of the effectiveness of lubrication has become very important after experiments on the application of a lubricant material on the surface of the rail head (skating track), conducted on the North American railroads. As a result of the experiments in straight sections, a reduction in the impact force on the track from the wheels of the rolling stock was obtained, as well as a significant reduction in the costs of electric traction and repair of elements of the upper structure and rolling stock. The article presents the results of studies of the variants of the tribological state (the friction coefficients changes on the riding tracks) of the rail threads and the choice of the optimal way to ensure the best interaction of the wheels of the rolling stock and the rails. The variants presented are obtained by modeling the longitudinal and lateral forces in the software package "Universal Mechanism". Based on the results obtained during the simulation, conclusions are drawn about the positive effect of the reduction of the friction coefficient along the track of the rails on the longitudinal and lateral forces arising in the contact zone "wheel-rail", the safety of applying lubricant to the surface of the rail heads is proved, the possible savings in operating costs from reducing the cost of fuel and energy resources are calculated.

Keywords

factor of friction, longitudinal force, lateral force, rail track, lubrication

For citation

Parakhnenko I. L. Upravlenie treniem na dorozhke kataniya, kak sposob snizheniya silovogo vzaimodejstviya v kontakte «koleso – rel's» [Friction control on the skate as a method of reducing force interaction in the «wheel – rail» contact]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 165–170.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).165-170

Article Info

Received: 10.09.2021, Revised: 25.09.2021, Accepted: 02.10.2021

Введение

Взаимодействие пути и подвижного состава, определяющие безопасность и бесперебойность движения, характеризуются скоростью, параметрами пути, динамическими процессами, трибологическими состояниями контактирующих поверхностей [1–4].

При анализе движения экипажа в кривой особого внимания заслуживают силы, возникающие в контакте «колесо – рельс»: вертикальная, горизонтальная, боковая [5].

Моделирование динамики контактного взаимодействия позволяет выполнить верифицированный программный комплекс «Универсальный механизм» [6, 7]. Использование данного комплекса обусловлено возможностью расчета сил взаимодействия, возникающих при одноточечном и многоточечном контактах, с вариантно-трибологического состояния рельсовых нитей при прохождении составом кривых участков [8].

Для расчета сил в программном комплексе используется система нелинейных уравнений, учитывающих относительную деформацию рельса и нормальные реакции в точках контакта. В работе принят алгоритм расчета сил, основанный на теории Калкера [9, 10]. Имитационное моделирование лубрикации в кривых задавалось изменением коэффициентов трения на поверхности катания.

Основной задачей исследования является построение зависимостей изменения продольных и боковых сил при изменении коэффициентов трения [11] на дорожке катания рельсовой нити, которые получены в ходе натурного эксперимента [12]. Для сухого трибологического состояния рельсовой колеи принято значение $f = 0,4$, при наличии третьего тела (смазки) $f = 0,25$ [13, 14]. На основании принятых коэффициентов составлены варианты:

- сухое состояние рельсов ($f = 0,4$);
- лубрификация дорожки катания наружного рельса ($f = 0,25$);
- лубрификация дорожки катания внутреннего рельса ($f = 0,25$).

Для моделирования создан грузовой состав длиной 968 м, общим весом 6 494 т. Для возможности разностороннего анализа выбран участок железнодорожного пути с кривыми различного радиуса – 990, 630, 540 и 380 м, общая длина 3 600 м. Расчеты велись для четырех скоростных режимов – от 40 до 80 км/ч.

Оценка «эффективности» рассматриваемых вариантов (2 и 3), т. е. уменьшение сил проведено в сравнении с сухим состоянием рельсов (вариант 1).

Результаты экспериментального моделирования продольных и боковых сил

Профиль участка пути, по которому проводилось моделирование – подъем, подразумевает тяговый режим движения поездов. Для максимального приближения результатов к реальным условиям проведены тяговые расчеты, в системе комплексных расчетов «ИСКРА – ПТР». Полученные для всех рассматриваемых скоростей данные интегрированы в ПК «Универсальный механизм».

Для обработки полученного массива данных и установления зависимостей принят метод статистической обработки исследований с помощью регрессионного анализа. Результаты представлены на рис. 1.

Полученные графики позволяют сделать вывод о максимально «эффективном» снижении продольных сил в контакте «колесо – рельс» относительно сухого состояния рельсов в варианте управления трением на дорожке катания наружной нити: 28 % в кривых радиусом до 1 000 м, 39 % в кривых малого радиуса. На дорожке катания внутреннего рельса в пологих кривых силы снижаются на 8 %. В кривых радиусом менее 400 м «эффективность» равна 27 %. При других радиусах силы снижаются на 14–19 %.

Далее представлены результаты моделирования боковых сил (рис. 2).

Полученные результаты зависимости боковых сил от радиуса при лубрикации на дорожке катания наружной рельсовой нити (вариант 2) показали увеличение сил относительно сухого состояния рельсов. На 11 % вырастают боковые силы в кривых радиусом менее 600 м. Эффективное снижение (до 23 %) при скорости 40 км/ч получено при снижении коэффициента трения на дорожке катания внутренней рельсовой нити (вариант 3). С увеличением радиусов кривых (от 600 до 800 м) боковые силы снижаются на 5 %. Применение лубрикации в кривых $R > 1 000$ м с целью снижения боковых сил не имеет эффективности.

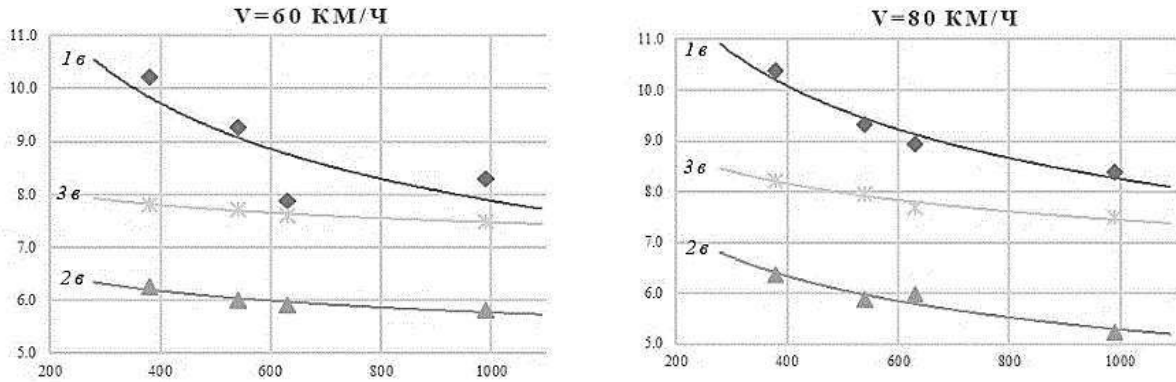


Рис. 1. Зависимость продольных сил от скорости, радиуса и трибологического состояния рельсов:
 1 в – сухое состояние рельсовых нитей; 2 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания наружной рельсовой нити; 3 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания внутренней рельсовой нити

Fig. 1. Dependence of the longitudinal forces on the speed, radius, and tribological state of the rails:
 1 в – dry state of rail threads; 2 в – reduction of a friction coefficient on the skating track of the outer rail thread; 3 в
 – reduction of a friction coefficient on the skating track of the inner rail thread

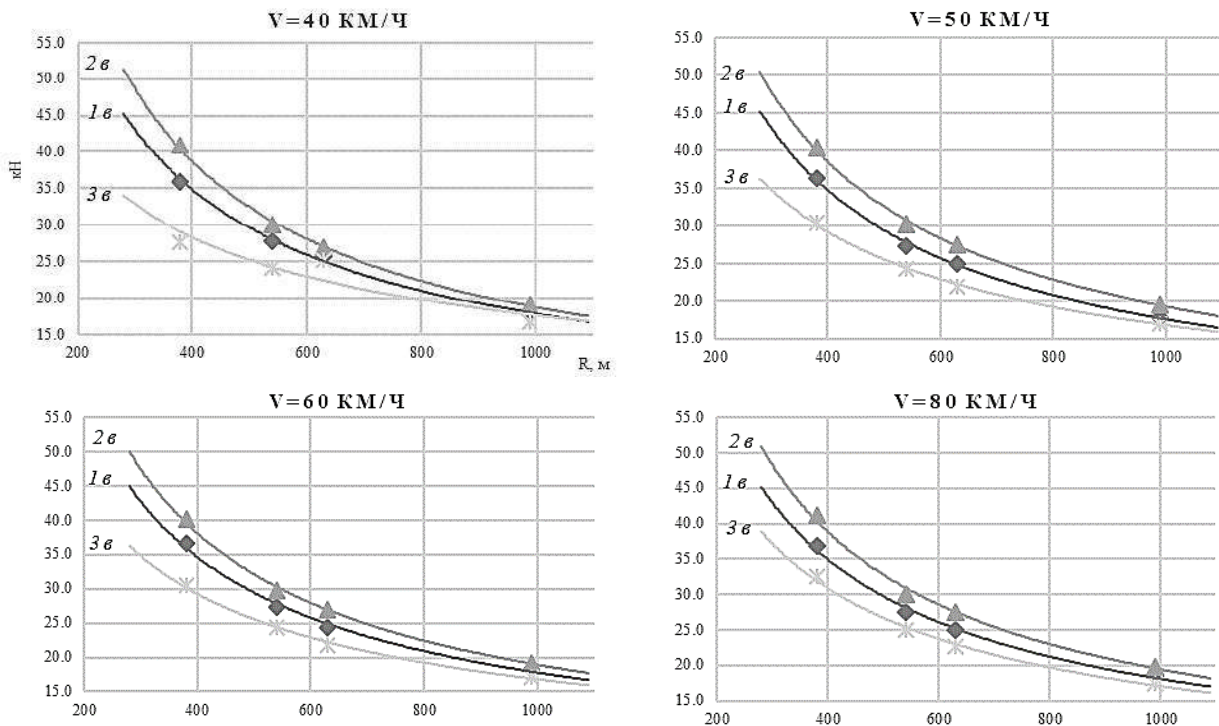


Рис. 2. Зависимость боковых сил от скорости, радиуса и трибологического состояния рельсов:
 1 в – сухое состояние рельсовых нитей; 2 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания наружной рельсовой нити; 3 в – уменьшение коэффициента трения
 на дорожке катания внутренней рельсовой нити

Fig. 2. Dependence of the lateral forces on the speed, radius, and tribological state of the rails:
 1 в – dry state of rail threads; 2 в – reduction of a friction coefficient on the skating track of the outer rail thread; 3 в
 – reduction of a friction coefficient on the skating track of the inner rail thread

Полученные результаты зависимости боковых сил от радиуса при лубрикации на дорожке катания наружной рельсовой нити (вариант 2) показали увеличение сил относительно сухого состояния рельсов. На 11 % вырастают боковые силы в кривых радиусом менее 600 м. Эффективное снижение (до 23 %) при скорости 40 км/ч получено при снижении коэффициента трения на дорожке катания внутренней рельсовой нити (вариант 3). С увеличением радиусов кривых (от 600 до 800 м) боковые силы снижаются на 5 %. Применение лубрикации в кривых $R > 1000$ м с целью снижения боковых сил не имеет эффективности.

Оценка влияния управлением трения на безопасность движения

Основной критерий обеспечения безопасности движения – длина тормозного пути с начала торможения до полной остановки состава.

Применение лубрикации способно увеличить длину тормозного пути, что может спровоцировать аварийную ситуацию. Целью расчета служит определение разницы в длинах тормозного пути состава при рассматриваемых вариантах трибологического состояния рельсовой колеи. Выбран метод численного интегрирования по интервалам времени [15].

Для определения тормозного пути необходимо рассчитать сопротивление движению подвижного состава ω_0 . Согласно ПТР, сопротивление зависит от скорости движения и веса подвижного состава, коэффициент трения в контакте «колесо – рельс» не учитывается. Проведено моделирование в программном комплексе «Универсальный механизм» и получены значения сил в межвагонном пространстве, возникающих в автосцепке между тяговым модулем и первым грузовым вагоном, численно равным сопротивлению, возникающему при равномерном движении состава [16].

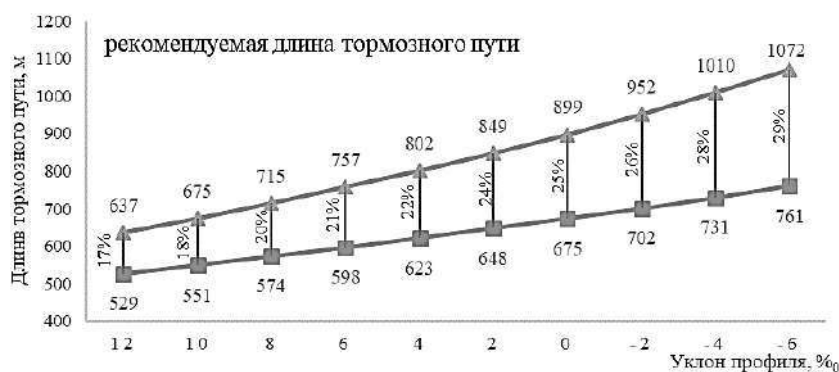


Рис. 3. Расчетное увеличение длины тормозного пути лубрикации дорожек катания обеих нитей относительно сухого трибологического состояния

Fig. 3. Calculated increase in the length of the braking distance of the lubrication of the skating tracks of both threads, relative to the dry tribological state

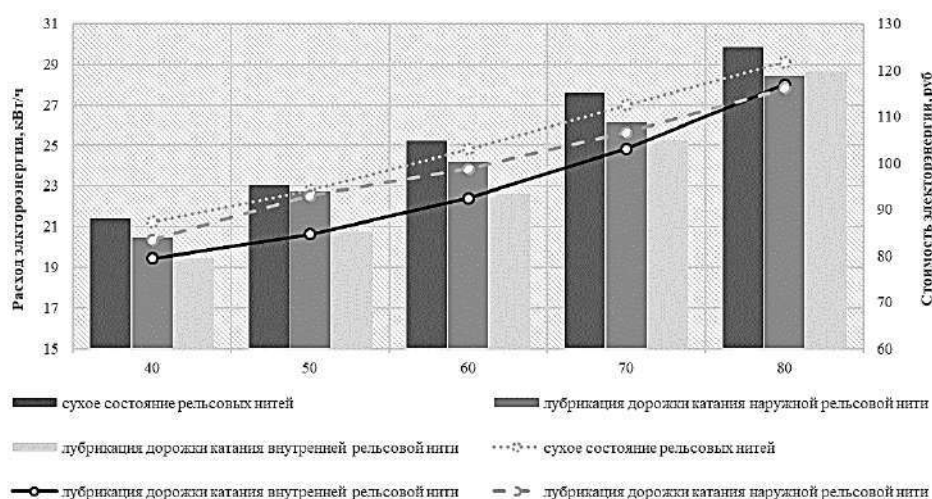


Рис. 4. Расход и стоимость топливно-энергетических ресурсов на 1 км пути при вариантах управления трением

Fig. 4. Consumption and costs of fuel and energy resources per 1 km under different variants of friction management

Выполнен расчет длины тормозного пути состава по формулам для уклонов пути от –10 до 10 %. Результаты представлены на рис. 3.

Полученные результаты дают возможность говорить об изменении коэффициента трения на дорожках катания рельсовых нитей, которое приводит к увеличению длины тормозного пути при самом неблагоприятном уклоне, т. е. на спуске, равном 10 %, на 20 м, что составляет 2 %. Это безопасное управление трением.

Технико-экономическое обоснование управления трением

Приоритетом ОАО «РЖД» является оптимизация расходов с помощью применения ресурсосберегающих технологий, позволяющих снижать сопротивление движению поездов и, как следствие снижение энергоресурсов на тягу поездов [16].

Согласно «Методике оценки энергоэффективности применения лубрикации зоны контакта «колесо – рельс»» проведено сравнение расчетных величин расходов топливно-энергетических затрат без применения и с при-

менением лубрикации [18]. Стоимость топливно-энергетических затрат на 1 км пути рассчитана исходя из стоимости 1 кВт/час (4,08 руб.) на 2020 г. для Свердловской области (рис. 4).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что затраты на топливно-энергетические ресурсы снижаются:

– при лубрикации дорожки катания наружной рельсовой нити на 4 % при $V = 50$ км/ч и до 5 % при остальных скоростях движения;

– при смазывании дорожки катания внутреннего рельса на 10 % при скорости до 60 км/ч и на 4 % при скорости 80 км/ч/

Заключение

Проведенный анализ показывает, что управление коэффициентом трения на дорожке катания внутренней нити снижает продольные силы до 27 %, боковые силы на 23 %, тем самым способствуя повышению стабильности железнодорожного пути и снижению затрат на топливно-энергетические ресурсы и не влияет на безопасность и бесперебойность движения поездов.

Список литературы

1. Концепция развития лубрикации в системе «колесо – рельс». ОАО «РЖД». М.: 2008. 75 с.
2. Kumar S. Railway Track & Structures. 2009. No 5, p. 35–38.
3. Эффективность лубрикации рельсов // Железные дороги мира. 2011. № 1. С. 65–68.
4. UM. Электрон. журн. Лаборатория вычислительной механики, 2019. URL: <http://www.umlab.Ru/pages/index.php?id=1>.
5. Iwnicki Simon D. The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation. Lisse: Swets & Zeitlinger, 1999.
6. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе «колесо – рельс» при движении поезда в кривых // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 1. С. 17–25.
7. Ромен Ю.С., Суслов О.А., Баляева А.А. Определение сил взаимодействия в системе «колесо – рельс» на основании измерений напряжений в шейке рельса // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 354–361.
8. Моделирование динамики железнодорожных экипажей (Руководство пользователя «Универсальный механизм 8»). 2016. URL: <http://www.umlab.ru/pages/index.php?id=1>.
9. Калкер И.И., де Патер А.Д. Обзор теории локального скольжения в области упругого контакта с сухим трением // Прикладная механика. 1971. Т. 7. № 5. С. 9–20.
10. Kalker Y.Y. Uber die Mechanik des Kontaktes zwischen Rad und Schiene // Zev Glasers Annalen. 1978. Vol. 102. № 7/8. pp. 214–218.
11. Захаров С.М., Жаров И.А., Комаровский И.А. Трибологические аспекты взаимодействия колеса и рельса // Проблемы взаимодействия колеса и рельса. М.: 1999. Т. 1. С. 221–228.
12. Парахненко И.Л., Аккерман С.Г. Эффективность управления трением в контакте «колесо – рельс» // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 58–61.
13. Парахненко И.Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо – рельс» при различных трибологических вариантах. Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 54–57.
14. Парахненко И.Л., Аккерман С.Г. Исследование влияния вариантов лубрикации на силы, возникающие в контакте «колесо – рельс» // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (Рилттранс-2019): сборник трудов Третьей междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1 Развитие транспортной инфраструктуры и управление перевозками. ПГУПС, 2020. С. 367–382.
15. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
16. Парахненко И.Л. Влияние лубрикации на безопасность движения грузовых поездов // Инновационный транспорт. 2020. № 1(35). С. 43–45.
17. Методические рекомендации по расчету экономического эффекта внедрения научно-технических достижений и передового опыта на железных дорогах – филиалах ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 21.09.2005. № 1392р.
18. Методика оценки энергоэффективности применения лубрикации зоны контакта «колесо – рельс». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» 09.10.2012 № 1998р.

References

1. Kontseptsiya razvitiya lubrikatsii v sisteme «koleso – rel's» [The concept of lubrication development in the «wheel – rail» system]. Moscow: OAO RZHD Publ. 2008. 75 p.
2. Kumar S. Railway Track & Structures, 2009, No. 5, pp. 35–38.
3. Effektivnost' lubrikatsii rel'sov [Efficiency of rail lubrication]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the world]*, 2011, No. 1, pp. 65–68.
4. UM. Laboratory of Computational Mechanics, 2019. URL: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1>.
5. Iwnicki, Simon D. The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation. Lisse: Swets & Zeitlinger, 1999.
6. Romen Yu. S. Faktory, obuslavlivayushhie protsessy vzaimodejstviya v sisteme «koleso – rel's» pri dvizhenii poezda v krivykh [Factors that determine the processes of interaction in the wheel – rail system when moving a train in curves]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin of VNIIZHT]*, 2015, No. 1, pp. 17–25.
7. Romen, Yu.S., Suslov, O.A., Balyaeva, A.A. Opredelenie sil vzaimodejstviya v sisteme «koleso – rel's» na osnovanii izmerenij napryazhenij v shejke rel'sa [Determination of interaction forces in the wheel-rail system on the basis of stress measurements in the rail neck]. *Vestnik VNIIZHT [Bulletin of VNIIZHT]*, 2017, Vol. 76, No. 6, pp. 354–361.
8. Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ehkipazhej (Rukovodstvo pol'zovatelya «Universal'nyj mekhanizm 8») [Modeling the dynamics of railway crews (User's guide «Universal mechanism 8»)]. 2016. URL: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1>.
9. Kalker I.I. de Pater A.D. Obzor teorii lokal'nogo skol'zheniya v oblasti uprugogo kontakta s sukhim treniem [Review of the theory of local sliding in the field of elastic contact with dry friction]. *Prikladnaya mekhanika [Applied Mechanics]*, 1971, Vol. 7, No. 5, pp. 9–20.
10. Kalker Y.Y. Uber die Mechanik des Kontaktes zwischen Rad und Schiene. *Zev Glasers Annalen*, 1978, Vol. 102, No. 7/8. pp. 214–218.
11. Zakharov S.M. Zharov I.A., Komarovskiy I.A. Tribologicheskie aspekty vzaimodejstviya kolesa i rel'sa [Tribological aspects of the interaction between wheel and rail]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj konferentsii assotsiatsii tyazhelovesnogo dvizheniya «Problemy vzaimodejstviya kolesa i rel'sa» [Proceedings of the International conference of the Association of heavy-weight traffic «Problems of interaction of a wheel and a rail»]*. Moscow, 1999, Vol. 1, pp. 221–228.
12. Parakhnenko I.L., Akkerman S.G. Effektivnost' upravleniya treniem v kontakte «koleso – rel's» [Efficiency of friction control in the contact «wheel – rail»]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2014, No. 2(41), pp. 58–61.
13. Parakhnenko I.L. Analiz sil vzaimodejstviya v kontakte «koleso-rel's» pri razlichnykh tribologicheskikh variantakh [Analysis of interaction forces in the «wheel-rail» contact under various tribological variations]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2019, No. 2(61), pp. 54–57.
14. Parakhnenko I.L., Akkerman, S.G. Issledovanie vliyaniya variantov lubrikatsii na sily, voznikayushhie v kontakte «koleso – rel's» [Research of the influence of lubrication variants on the forces arising in the «wheel – rail» contact]. *Razvitie infrastruktury i logicheskikh tekhnologii v transport sistemakh (Riltrans-2019): sbornik trudov tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Chast' I Razvitie transportnoj infrastruktury i upravlenie perevozkami [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems: proceedings of the Third International scientific-practical conference. Part I Transport infrastructure development and transport management]*, 2020, pp. 367–382.
15. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty [Rules of traction calculations for train work]. Moscow: Transport Publ., 1985. 287 p.
16. Parakhnenko I.L. Vliyanie lubrikatsii na bezopasnost' dvizheniya gruzovykh poezdov [The influence of lubrication on the safety of freight train traffic]. *Innovatsionny transport [Innovational transport]*, 2020, No. 1(35), pp. 43–45.
17. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu ehkonomicheskogo ehffekta vnedreniya nauchno-tekhnicheskikh dostizhenij i peredovogo opyta na zheleznykh dorogakh – filialakh OAO «RZHD» [Methodological recommendations for calculating the economic effect of the introduction of scientific and technical achievements and best practices on the railways-branches of JSC «Russian Railways»]. Order of JSC «Russian Railways» 21.09.2005. No. 1392r.
18. Metodika otsenki ehnergoehffektivnosti primeneniya lubrikatsii zony kontakta «koleso – rel's» [Methodology for assessing the energy efficiency of the application of the wheel – rail contact zone lubrication]. Approved by JSC «Russian Railways» 09.10.2012. No. 1998r.

Информация об авторах

Парахненко Инна Леонидовна – старший преподаватель кафедры пути и железнодорожного строительства, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: iparahnenko@usurt.ru

Information about the authors

Inna L. Parakhnenko – Assistant professor of the Subdepartment Road and railway construction, Ural State Transport University, Yekaterinburg, e-mail: iparahnenko@usurt.ru