

А.Л. Rogozinskaya¹, И.Ю. Ermolenko¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В КОНТАКТЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЗУНА НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСА

Аннотация. Наиболее распространенным дефектом на поверхности катания колеса является ползун, возникающий при скольжении колесной пары, заклиненной тормозной колодкой. У специалистов железнодорожного транспорта принято, что при движении кромки ползуна скругляются, и он закатывается с образованием неравномерного проката. В статье рассматриваются процессы силового воздействия различных типов ползуну на динамику грузовой тележки вагона.

Ключевые слова: колесная пара, система «колесо-рельс», ползун.

A.L. Rogozinskaya¹, I.Yu. Ermolenko¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

STUDY OF POWER IMPACT IN THE "WHEEL-RAIL" CONTACT IN THE PRESENCE OF A SLIDER ON THE WHEEL ROLLING SURFACE

Abstract. The most common defect on the rolling surface of a wheel is a slider, which occurs when a wheelset is slipping, jammed with a brake pad. It is accepted by railway transport specialists that when the slide moves, the edges of the slider are rounded, and it rolls up with the formation of uneven rolling. The article discusses the processes of force impact of various types of sliders on the dynamics of the freight carriage.

Keywords: wheelset, wheel-rail system, slider

Введение

Взаимодействие подвижного состава и пути – это основополагающий физический процесс при движении вагонов, локомотивов и поездов по железным дорогам. Именно он во многом определяет такие важнейшие показатели, как нагрузка на ось, статическая нагрузка вагонов, масса и скорость движения составов, а также основу основ - безопасность движения поездов. Условия взаимодействия в системе «колесо-рельс» оказывают существенное влияние на сроки службы и организацию содержания основных устройств пути и подвижного состава, на эксплуатационные затраты железных дорог.

Нормативы графика движения, его фактическое выполнение, расход топливно-энергетических ресурсов на тягу непосредственно связаны с условиями сцепления и трения в зоне контакта колес и рельсов. Такое всеобъемлющее влияние рассматриваемого процесса на работу нашего вида транспорта требует повышенного внимания к нему от всех, кто участвует в организации работы железных дорог, в создании технических средств и условий их правильного содержания.

Движение колесной пары при наличии ползуна на поверхности катания

Неровности на поверхности катания колес бывают двух видов. Наиболее распространенными являются так называемые непрерывные неровности на колесе, когда из-за неравномерности износа рельса искажается первоначальная форма колеса по всей поверхности катания. Но в современных условиях все чаще встречаются изолированные плавные неровности колесных пар из-за повышенного износа колеса вследствие торможений и блокировки колесной пары подвижного состава – ползуны, навары и т.п.

Ползун – плоское место на поверхности катания, возникающее при движении по рельсу заклиненного колеса (скольжения вместо качения). После образования ползуна его края первое время имеют четко очерченные ребра, и статическая траектория центра масс (ЦМ)

при перекачивании через ползун получает перелом (рис.1). В таком случае возникает удар, оказывающий дополнительное воздействие на рельс. Такие удары могут вызывать даже изломы рельсов, особенно в зимние месяцы, когда возрастает хрупкость рельсовой стали вследствие пониженных температур. Это явление – относительно редкое, возникает при малой численности изолированных неровностей на колесе подвижного состава. В процессе эксплуатации форма ползуна изменяется в результате закатывания острых граней и увеличения длины (примерно в 1,21 раза).

При обнаружении ползуна на поверхности катания колеса определяется его глубина. Формы площадки соприкосновения и контактных напряжений, которые могут быть представлены в виде распределенной нагрузки, приложенной по контактной поверхности, зависят от формы соприкасающихся тел.

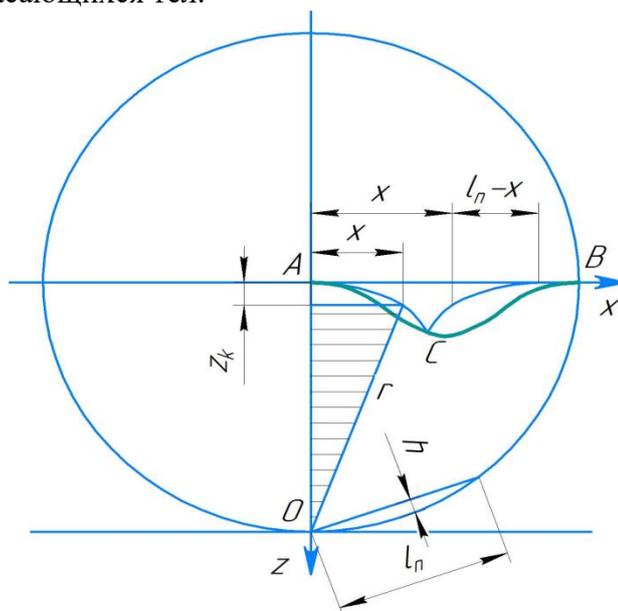


Рис.1. Схема перекачивания колесной пары через ползун и изменение траектории ее ЦМ при закатывании ползуна

l_p – длина ползуна; h – глубина ползуна; r – радиус круга катания; z_k – ордината траектории ЦМ колесной пары; x – координата вдоль оси пути; ABC – траектория ЦМ колесной пары

В случае колесной пары с незакатанным ползуном уравнение нисходящей ветви траектории ЦМ колесной пары (AC) получим из заштрихованного треугольника

$$r^2 = (r - z_k^H)^2 + x^2, r^2 = r^2 - 2rz_k^H + (z_k^H)^2 + x^2,$$

$(z_k^H)^2 = 0$ – как величина более высокого порядка малости.

Следовательно, $z_k^H = \frac{x^2}{2r}$ для x из интервала $0 \leq x \leq \frac{l_p}{2}$.

Уравнение восходящей ветви в указанном случае имеет вид

$$z_k^B = \frac{(l_p - x)^2}{2r} \text{ для } x \text{ из интервала } \frac{l_p}{2} \leq x \leq l_p.$$

Определим соотношение между длиной и глубиной ползуна:

при $x = \frac{l_p}{2}$, $z_k = h$, следовательно, $h = \frac{(\frac{l_p}{2})^2}{2r}$, откуда $l_p = \sqrt{8rh_p}$.

Для колесной пары с закатанным ползуном статическая траектория ЦМ (CB) приближается к косинусоидальной:

$$z_{пз} = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l_{пз}}\right), 0 \leq x \leq l_{пз}.$$

Определим вертикальную скорость ЦМ колесной пары при перекачивании через ползун, от которой зависит сила взаимодействия колеса и рельса, и найдем ее экстремумы. Для этого достаточно выписать первые производные по времени от выражений, представляющих ветви траектории движения ЦМ.

В случае незакатанного ползуна:

1) нисходящая ветвь траектории: $\dot{z}_\Pi^H = \frac{1}{2r} 2x \frac{dx}{dt} = \frac{v}{r} \dot{x}$, $0 \leq x \leq \frac{l_\Pi}{2}$;

$$\dot{z}_\Pi^H \max = \frac{v l_\Pi}{r 2} = \frac{l_\Pi}{2r} v, \rightarrow x = \frac{l_\Pi}{2}; \dot{z}_\Pi^H \min = 0, \rightarrow x = 0.$$

2) восходящая ветвь: $\dot{z}_\Pi^B = \frac{1}{2r} 2(l_\Pi - x) \left(-\frac{dx}{dt}\right) = -\frac{v}{r} (l_\Pi - x)$, $\frac{l_\Pi}{2} \leq x \leq l_\Pi$;

$$\dot{z}_\Pi^H \min = -\frac{v}{r} \left(l_\Pi - \frac{l_\Pi}{2}\right) = -\frac{l_\Pi}{2r} v, \rightarrow x = \frac{l_\Pi}{2}; \dot{z}_\Pi^H \max = 0, \rightarrow x = l_\Pi.$$

В случае закатанного ползуна (траектория АВ):

$$\dot{z}_{\Pi 3} = \frac{d}{dt} z_{\Pi 3} = \frac{h}{2} \cdot \frac{2\pi}{l_{\Pi 3}} \sin \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{\pi h}{l_{\Pi 3}} v \sin \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}}, 0 \leq x \leq l_{\Pi 3}.$$

Экстремальные значения в этом случае будут:

$$\dot{z}_{\Pi 3}^{\max} = \frac{\pi h v}{l_{\Pi 3}} \text{ при } \sin \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}} = 1, \text{ т.е. } \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}} = \frac{\pi}{2} \text{ и } x = \frac{l_{\Pi 3}}{4};$$

$$\dot{z}_{\Pi 3}^{\min} = -\frac{\pi h v}{l_{\Pi 3}} \text{ при } \sin \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}} = -1, \text{ т.е. } \frac{2\pi x}{l_{\Pi 3}} = \frac{3\pi}{2} \text{ и } x = \frac{3}{4} l_{\Pi 3}.$$

В графической форме изменение скорости движения ЦМ колесной пары показано на рисунке 2.

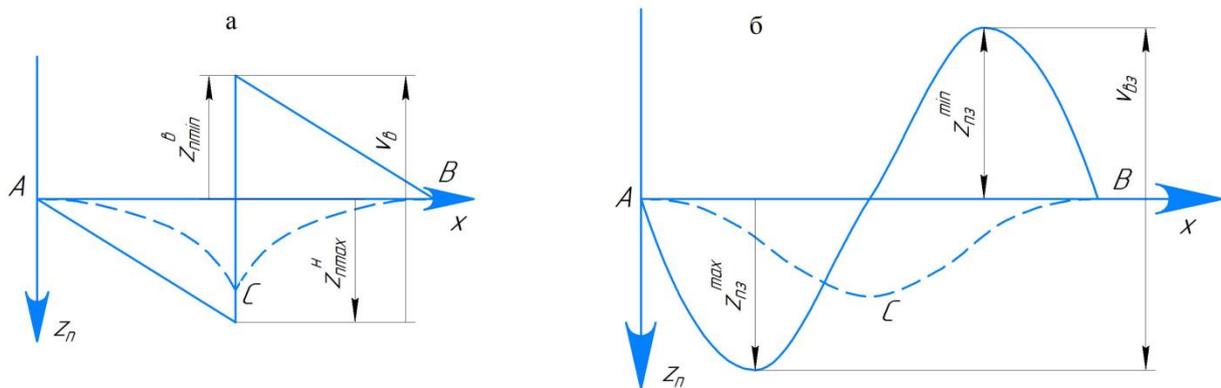


Рис. 2. Схема изменений вертикальной скорости ЦМ колесной пары в случае незакатанного ползуна (а) и закатанного ползуна (б)

Непосредственно из графического представления следует, что величина вектора вертикальной скорости, возникающей при перекатывании:

1) через незакатанный ползун

$$v_B = |\dot{z}_\Pi^H \max| + |\dot{z}_\Pi^H \min| = \frac{l_\Pi}{2r} v + \frac{l_\Pi}{2r} v = \frac{l_\Pi}{r} v;$$

2) через закатанный ползун

$$v_{B3} = |\dot{z}_{\Pi 3}^{\max}| + |\dot{z}_{\Pi 3}^{\min}| = \frac{2\pi h}{l_{\Pi 3}} v.$$

Влияние закатывания ползуна на величину вектора вертикальной скорости ЦМ можно оценить, рассмотрев отношение

$$\frac{v_B}{v_{B3}} = \frac{\frac{l_\Pi v}{r}}{\frac{2\pi h}{l_{\Pi 3}} v} = \frac{l_\Pi \cdot l_{\Pi 3}}{r \cdot 2\pi \cdot h} = \frac{l_\Pi \cdot 1,21 \cdot l_\Pi \cdot 8 \cdot r}{r \cdot 2\pi \cdot l_\Pi^2} = \frac{4,84}{\pi} > 1,$$

где было учтено, что $l_\Pi = \sqrt{8rh_n}$.

Из полученных результатов следует, что сила взаимодействия колеса и рельса, зависящая от вектора вертикальной скорости ЦМ, прямо пропорциональна размерам ползуна и скорости движения вагона. Она уменьшается по мере закатывания ползуна и в пределе составит

$$v_{B3} = \frac{\pi}{4,84} v_B = 0,64 \cdot v_B.$$

Согласно гипотезе А.М. Годыцкого-Цвирко величину ударного импульса определяет соотношение $s(t) = m v_B$. Таким образом, для незакатанного ползуна

$$s(t) = m \frac{l_\Pi}{r} v,$$

а для закатанного $s(t) = m \frac{2\pi h}{l_{\Pi 3}} v$.

Частота воздействия ползуна определяется следующим образом:

$\frac{x}{2\pi r t}$ – число воздействий в единицу времени на пути $x=vt$;

$n = \frac{vt}{2\pi r t} = \frac{v}{2\pi r}$ – частота воздействий (Гц);

$\omega = 2\pi n = \frac{v}{r}$ – частота воздействий (рад/с).

Определим вертикальное ускорение ЦМ колесной пары при перекатывании через ползун. Его определяют вторые производные по времени от выражений, представляющих движения ЦМ.

При незакатанном ползуне:

1) нисходящая ветвь траектории

$$z_k^H = \frac{x^2}{r}, \dot{z}_k^H = \frac{v}{r} x, \ddot{z}_k^H = \frac{v^2}{r};$$

2) восходящая ветвь

$$z_k^B = \frac{(l_n - x)^2}{2r}, \dot{z}_k^B = -\frac{v}{r} (l_n - x), \ddot{z}_k^B = \frac{v^2}{r}.$$

Скачок вертикальной скорости ЦМ при $x = \frac{l_n}{2}$ от ее минимального до максимального значения происходит за очень малый, но конечный промежуток времени. Поэтому возникающее вертикальное ускорение ЦМ за этот временной промежуток будет весьма большим, но конечным по величине.

При закатанном ползуне

$$\dot{z}_{кз} = \frac{\pi h}{l_{пз}} v \sin \frac{2\pi x}{l_{пз}}, \ddot{z}_{кз} = \frac{2\pi^2 h}{l_{пз}^2} v^2 \cos \frac{2\pi x}{l_{пз}}.$$

Аналогичное взаимодействие колеса и рельса происходит при перекатывании колеса через горловину стрелочного перевода.

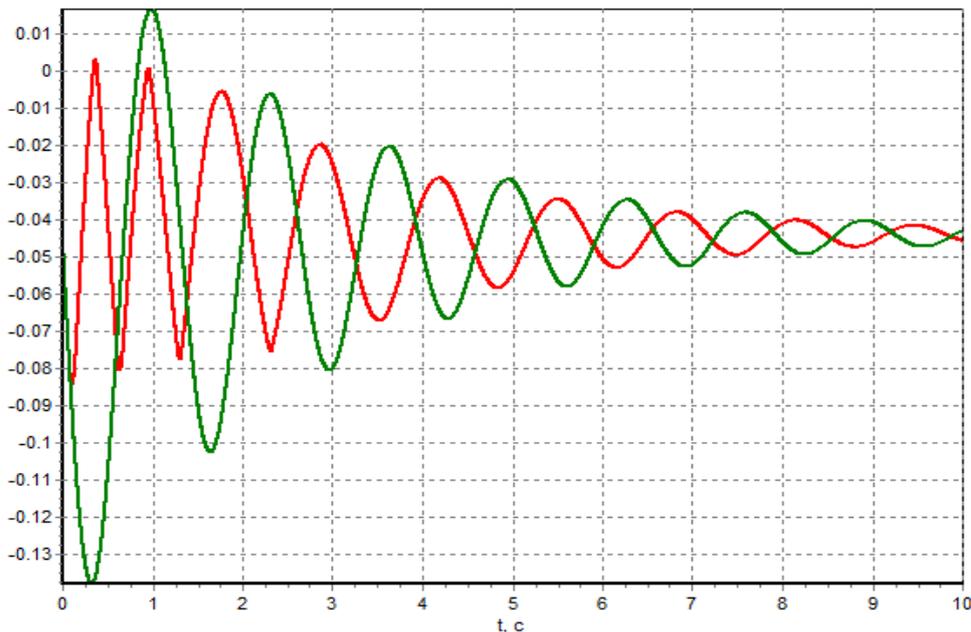


Рис.3. Влияние ползуна на динамику вагонной тележки

Для моделирования динамического воздействия колеса и рельса при скоростях до 90 км/ч для инженерных расчетов вполне подходят соотношения контактной теории Герца. Поскольку в данном случае контактирующие поверхности однородны и изотропны, силы трения в зоне контакта не учитываются, размер контактной площадки мал по сравнению с размерами контактирующих тел и характерными радиусами кривизны недеформированных поверхностей, контактирующие поверхности гладкие. Для моделирования использовался типовой полувагон с грузоподъемность 70 т на тележках модели 18-100, с комплектом двухрядных равновысоких пружин (рис. 3). На графике изображены зеленой линией – график колебаний верхней точки пружин, красной линией – график колебаний наддрессорной

балки. При движении тележки с ползуном на поверхности катания в течение 10 секунд, производится 2 удара в нижний упор и 4 удара в верхний упор, что негативно влияет на работу пружин рессорного комплекта.

Заключение

Более фундаментальные испытания по определению скорости удара и ускорения на рельсе при движении колесной пары с ползуном различной глубины и длины проводились в Японии. Анализ этих результатов показывает, что скорость удара растет пропорционально скорости движения только до 20 км/ч. При более высокой скорости движения величина скорости удара стабилизируется и даже несколько снижается. Это явление можно объяснить частичным перелетом колеса через ползун (эффект сокращения длины ползуна).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермоленко И.Ю., Рогозинская А.Л. Определение динамической нагрузки от колеса на рельс при извилистом движении // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (53). С. 40-44.
2. Мазов Ю.Н., Локтев А.А., Сычев В.П. Оценка влияния дефектов колес подвижного состава на состояние железнодорожного пути // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 61-72.
3. Коган А.Я., Верхотин А.А. Расчет воздействия на путь колесной пары с ползуном // Исследования возможностей повышения скоростей движения поездов: сб. науч. тр. М. : Транспорт, 1984. 224 с.
4. Ермоленко И.Ю. Влияние профиля пути горного участка ВСЖД на силовое взаимодействие «колесо-рельс» с учетом экспериментальных параметров вагона-лаборатории // Вестник Иркутского государственного технического университета: Научный журнал. 2017. Т. 21. № 2 (121). С. 73-80. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-170-180
5. Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н. Оценка динамического воздействия в контакте «колесо-рельс» на примере поездных испытаний при движении по участку горного рельефа местности ВСЖД // Молодежь. Наука. Технологии: сб. науч. трудов международной научно-практ. конф. студентов и молодых ученых в 4 ч. 2017. Ч. 3. С. 24-30.
6. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Methodology for evaluating of the interaction of wagons and path on the mountain-gorge areas // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 760 (2020) 012020 IOP Publishing.

REFERENCES

1. Ermolenko I.Yu., Rogozinskaya A.L. Opredelenie dinamicheskoy nagruzki ot kolesa na rel's pri izvilistom dvizhenii [Determination of the dynamic load from the wheel to the rail during tortuous motion]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railways], 2020, No. 4 (53). pp. 40-44.
2. Mazov Yu.N., Loktev A.A., Sychev V.P. Otsenka vliyaniya defektov koles podvizhnogo sostava na sostoyanie zheleznodorozhnogo puti [Assessing the Influence of Wheel Defects of a Rolling Stock on Railway Tracks]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2015, No. 5, pp. 61-72.
3. Kogan A.Ya., Verkhotin A.A. Raschet vozdejstviya na put' kolesnoj pary s polzunom [Calculation of the impact on the path of a wheelset with a slider]. *Issledovaniya vozmozhnostej povysheniya skorostej dvizheniya poezdov: sb. nauch. tr.* [Research into the possibilities of increasing train speeds]. Moscow: Transport, 1984, 224 p.
4. Ermolenko I.Yu. Vliyanie profilya puti gornogo uchastka VSZHD na silovoe vzaimodejstvie «koleso-rel's» s uchetom eksperimental'nyh parametrov vagona-laboratorii [Influence of the track profile of the mountainous section of the ESRR on the force interaction "wheel-rail" taking into account the experimental parameters of the laboratory car]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: Nauchnyj zhurnal* [Irkutsk State Technical University Bulletin: Scientific Journal], 2017, Vol. 21, No. 2 (121). pp. 73-80. DOI: 10.21285 / 1814-3520-2017-2-170-180

5. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Ocenka dinamicheskogo vozdejstviya v kontakte «koleso-rel's» na primere poezdnyh ispytaniy pri dvizhenii po uchastku gornogo rel'efa mestnosti VSZHD [Evaluation of the dynamic impact in the "wheel-rail" contact on the example of train tests when moving along a section of the mountainous terrain of the East Siberian Railway]. *Molodezh'. Nauka. Tekhnologii: sb. nauch. trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakt. konf. studentov i molodyh uchenyh v 4 ch.* [The youth. The science. Technologies: Sat. scientific. works of international scientific and practical. conf. students and young scientists at 4 o'clock], 2017, Part 3. pp. 24-30.

6. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Methodology for evaluating of the interaction of wagons and path on the mountain-gorge areas // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 760 (2020) 012020 IOP Publishing.

Информация об авторах

Рогозинская Анна Леонидовна – магистрант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: meowcollins@inbox.ru

Ермоленко Игорь Юрьевич – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ermolenko_iy@list.ru

Authors

Anna Leonidovna Rogozinskaya – Master's student of the department "Cars and carriage facilities", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: meowcollins@inbox.ru

Igor Yurievich Ermolenko – Ph.D. of Engineering Sciences, senior lecturer of the department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ermolenko_iy@list.ru

Для цитирования

Рогозинская А.Л. Исследование силового воздействия в контакте «колесо-рельс» при наличии ползуна на поверхности катания колеса [Электронный ресурс] / А.Л. Рогозинская, И.Ю. Ермоленко // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – №1 (11). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

For citation

Rogozinskaya A.L., Ermolenko I.Yu. *Issledovanie silovogo vozdejstviya v kontakte «koleso-rel's» pri nalichii polzuna na poverhnosti kataniya koleasa* [Study of power impact in the "wheel-rail" contact in the presence of a slider on the wheel rolling surface]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. 1 (11).