

Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, Е.А. Тюкавкин

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

АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА И РЕЛЬСА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В данной работе всесторонне рассматривается система «колесо – колодка - рельс» и температуры в пятне контакта при торможении. В рамках исследования изучаются проблемы взаимодействия элементов, которые образуют данную систему, тщательно анализируются механизмы изнашивания. Была представлена подробная характеристика чугунным и композиционным колодкам. Изучаются физические основы динамики процессов теплообмена при торможении грузового вагона. Рассматриваются вопросы термopовреждения поверхности катания колёс при вхождении их в кривые участки пути. Была получена методика прогнозирования температурного состояния, изучены процессы теплообмена, которые появляются во время контакта колес и тормозной колодки. Проанализированы вопросы износа тормозной колодки при взаимодействии с колесом, принимая во внимание отношение коэффициента трения от времени и взаимодействие колеса, которое в момент вращения взаимодействует с тормозной колодкой методом фрикционного трения с учётом зависимости физико-механических показателей. Предложено внедрение колодок из металлокерамики. Были предложены формулы, с помощью которых можно рассчитать максимальное давление на пятне контакта и его диаметр, предложены методы для снижения износа в системе «колесо – колодка - рельс». Рассматривается связь, которая объединяет прочность и текучесть с температурой стали марки R8, похожей на отечественную колесную сталь марки 2. Результаты исследований дали возможность установить векторы для последующего развития разных типов колодок.

Ключевые слова: анализ, торможение, колодка, колесо, износ, контактное взаимодействие, напряжение.

E.Yu. Dulsky, P.Yu. Ivanov, E.A. Tyukavkin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE CONTACT INTERACTION OF A RAILWAY WHEEL AND A ROLLING STOCK RAIL

Abstract. In this paper, the wheel–pad–rail system and temperatures in the contact spot during braking are comprehensively considered. Within the framework of the study, the problems of interaction of the elements that form this system are studied, the mechanisms of wear are carefully analyzed. A fractional characteristic of cast iron and composite pads was presented. The physical foundations of the dynamics of heat exchange processes during the braking of a freight car are studied. The issues of thermal damage to the surface of the wheels when they enter the curved sections of the path are considered. A method for predicting the temperature state was obtained, the heat exchange processes that appear during the contact of wheels and brake pads were studied. The issues of wear of the brake pad during interaction with the wheel are analyzed, taking into account the ratio of the coefficient of friction against time and the interaction of the wheel, which interacts with the brake pad during rotation by the method of friction, taking into account the dependence of physical and mechanical parameters. The introduction of cermet pads is proposed. Formulas were presented that can be used to calculate the maximum pressure on the contact spot and its diameter, and methods were proposed to reduce wear in the wheel–pad–rail system. The relationship is considered, which combines strength and fluidity with the temperature of steel grade R8, similar to domestic steel grade 2. The results of the research made it possible to establish vectors for the subsequent development of different types of pads.

Keywords: analysis, braking, pad, wheel, wear, contact interaction, voltage.

Подчеркнем, что в качестве основных направлений развития современной железной дороги, которые в положительном контексте влияют на сохранение конкурентного преимущества перед всеми остальными транспортными средствами, выступают снижение расходов, которые направляются на обслуживание, развитие высокоскоростных перевозок и использование длинных и тяжелых поездов, а также повышение безопасности в отношении грузовых перевозок [1,17].

Очевидно, что сейчас при настолько интенсивном использовании подвижного состава колеса обязаны соответствовать целому ряду условий, чтобы оставаться востребованными. Так, каждое из них должно отличаться повышенной твердостью и прочностью, гарантировать в ходе эксплуатации достойные ходовые характеристики. При этом им должна быть свойственна наивысшая износостойкость, чтобы исключить возможность возникновения разного рода поломок.

Поскольку в настоящий момент по железным дорогам, которые пролегают через всю нашу страну, постоянно производится активная транспортировка большой номенклатуры грузов, включая те, которые относятся к категории опасных, поломка обода колеса, появившаяся из-за сильнейшего влияния высоких температур, способна привести к достаточно масштабной катастрофе и даже крушению целого состава.

Получить достойные результаты в данной области нельзя в отсутствии тщательного и всестороннего изучения проблем контакта между основными элементами вагона, в том числе взаимодействие с системой «колесо-колодка». В качестве хорошо себя зарекомендовавшего метода решения данной проблемы выступает повсеместное использование современных программ для моделирования такого взаимодействия, аналогичного реальным условиям работы [2].

Компьютерная модель призвана полностью рассмотреть влияние параметров тормоза на конструктивно-ответственное состояние подвижных элементов конструкции, таких как колесо, изучает процессы, изменения структуры и механических свойств в процессе эксплуатации [3].

Одной из важнейших задач, связанных с решением проблемы безопасности железнодорожного движения, является наиболее эффективные методы описания нестационарных процессов и процессов формирования структуры в процессах движения поездов, с учетом предистории нагрузки. Этому вопросу посвящено множество работ, написанных самыми разными авторами [4].

Работы в своем большинстве сосредоточены на рассмотрении структурных изменений, которые появляются в процессе производства, эксплуатации и ремонта колёс. Авторы данных исследований выполнили анализ НДС для колёс при разных условиях торможения с разным износом обода. Расчеты температуры, расчеты температурных напряжений в колесе при различных видах торможения, осевых и радиальных напряжений в сечении колеса.

Композиционные колодки имеют устойчивый коэффициент трения и высокую износостойкость на высоких скоростях, но их использование приводит к термомеханическому повреждению колес, появляющемуся по причине низкой теплопроводности. В исследованиях специалистов в данной области изучаются физические основы динамики процессов теплообмена при торможении грузового вагона. В случае с композитными колодками брался материал из асбеста ТИИР-300 с проволочным каркасом. В состав такого материала входят барит 47,5%, каучук 20%, сажа 15%, асбест 15%, и сера 2,5%. Во время проведения расчета во внимание бралось воздействие моментов инерции конструкции и угловых скоростей движений. Теплопроводность была принята постоянной и составляет 3,3 Вт/(см·°C). В ходе анализа был подробно изучен поверхностный слой, чья толщина составила 5 мм. При этом определены закономерности рассеяния тепловой энергии, которые возникают во время конвекции и теплового излучения. В связи с этим заключаем, что теплопроводность композиционной колодки низкая, следовательно возникают высокие термические напряжения в зоне контакта [5-6].

В своих исследованиях специалисты уделяют внимание вопросам термомеханического повреждения поверхности катания колёс при вхождении их в кривые участки пути. Было показано, что структурное и фазовое преобразование в верхних слоях являются причиной для возникновения дефектов поверхности катания и рельсов. Была получена методика прогнозирования температурного состояния, изучены процессы теплообмена во время контакта между колесами и тормозной колодкой. Анализ теории тепловой динамики показал, что допустимо наивысшую температуру представить элементами:

$$v_{\text{макс}} = v_v + v^* + v_{\text{всп}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{макс}}$, v_v , v^* – максимальная, объёмная и средняя температуры, °С;

$v_{\text{всп}}$ – температура воспламенения, °С.

Следует отметить, что существующие инструменты не могут измерить температуру в области контакта поверхностей трения, которые постоянно подвергаются постоянным изменениям. Экспериментальные методы позволяют измерять объёмные и менее точные температуры поверхности [7, 15].

В процессе производился анализ напряженно-деформированного положения колесной пары во время преобразования режимов разных видов нагрузки в контексте дополнительного напряженного состояния, которое создается путем напрессовки колеса на ось с натягом.

Было обнаружено, что вертикальная составляющая не вызывает ощутимый рост напряжений.

Результаты расчётов говорят о том, что во время определения износа требуется брать во внимание связь физических и механических характеристик, которые свойственны материалам, и коэффициент трения при контакте с температурой.

В работе был рассмотрен вопрос контактного взаимодействия колеса и тормозной колодки. Их геометрия выполнена по схеме и чертежу.

Для приведённого трибосопряжения рассмотрены вопросы износа тормозной колодки при взаимодействии с колесом, принимая во внимание отношение коэффициента трения от времени и взаимодействие колеса, которое в момент вращения взаимодействует с тормозной колодкой методом фрикционного трения с учётом зависимости физико-механических показателей. [8-9].

Результаты расчётов говорят о том, что во время определения размера износа требуется брать во внимание связь между физико-механическими и теплофизическими характеристиками, которые свойственны материалам, и коэффициентом трения при контакте от температуры.

Анализируя изнашивание выяснилось, что в системе «колесо-колодка-рельс» существуют несколько взаимосвязанных процессов, которые объединяют ее элементы. За счет действия концентраторов напряжения (пластинки из графита) и интенсивного схватывания с поверхностью колеса выходит из строя колодка тормоза чугунного типа. В то же время поверхность колеса изнашивается равномерно. Колодка, которая выполнена из полимерных композитов, разрушается под влиянием процессов, протекающих в пределах трения. При этом по причине невысокой проводимости тепла поверхность колеса перегревается, из-за чего появляются и распространяются трещины.

Очевидно, для того, чтобы минимизировать износ в рассматриваемой в данном случае системе требуется выполнить ряд действий:

1. Ликвидировать концентраторы напряжения в колодке.
2. Увеличить термостойкость и тепловую прочность композиционной тормозной колодки.
3. Гарантировать своевременное удаление с поверхности колес поверхностных слоев материала и грязи в целях избегания распространения трещин.

Целесообразным видится активное распространение колодок, выполненных из металло-керамики, поскольку у них есть ряд достоинств, а именно:

1. Отсутствие концентраторов напряжений.
2. Колодка данного типа выполняется на железной или медной основе, в результате они обеспечены достаточной теплопроводностью.
3. Комбинируя компоненты металлокерамики и разные уровни абразивности, допустимо вовремя убрать с поверхности катания загрязнения и отслоение материала, что положительно влияет на износостойкость непосредственно колеса.

Исследование температур на пятне контакта колеса с рельсом с практической точки зрения целесообразно, если мы способны их контролировать. В настоящее время подобными возможностями мы располагаем, прежде всего, во время действия противоюзных устройств [10-11].

В случае с тормозными колодками имеет место уменьшение интенсивности изнашивания и количества повреждений колес и колодок, которые появляются по причине наличия высоких температур на пятнах контакта. [12-14].

При контакте рельса и колёсной пары на поверхностях катания радиус вагонных колес R в продольном направлении почти соответствует R рельса в поперечном (около 0,5 м), при расчете максимального давления на пятне p_m и его диаметра d используются формулы Герца:

$$p_m = (6N(E^n)^2 / (\pi^3 R^2))^{1/3}. \quad (2)$$

$$d = 2(3NR / (4E^n))^{1/3}, \quad (3)$$

где N – нагрузка на колесо;

E – модуль Юнга, 210 ГПа;

ν – коэффициент Пуассона, 0,3;

p_m – давление на пятне, $p_m = 1000$ МПа;

d – диаметр пятна контакта, $d = 13,7$ мм.

Если соблюдается условие (4), то происходит пластическая деформация сдвига:

$$\psi p_m = \tau(\theta) \approx \sigma(\theta) / 2, \quad (4)$$

где ψ – коэффициент сцепления рельса с колесом;

$\tau(\theta)$ – напряжение сдвига при данной температуре на пятне контакта колеса и рельса;

$\sigma(\theta)$ – прочность стали.

На рисунке 1 представлена связь, которая объединяет температуру прочности и текучесть стали марки R8. При этом она с точки зрения своего состава и характерных ей свойств во многом похожа на колесную сталь марки 2. Так, при $\psi = 0,1$ и $p_m = 1000$ МПа для начала сдвига нужна температура примерно 700 °С.

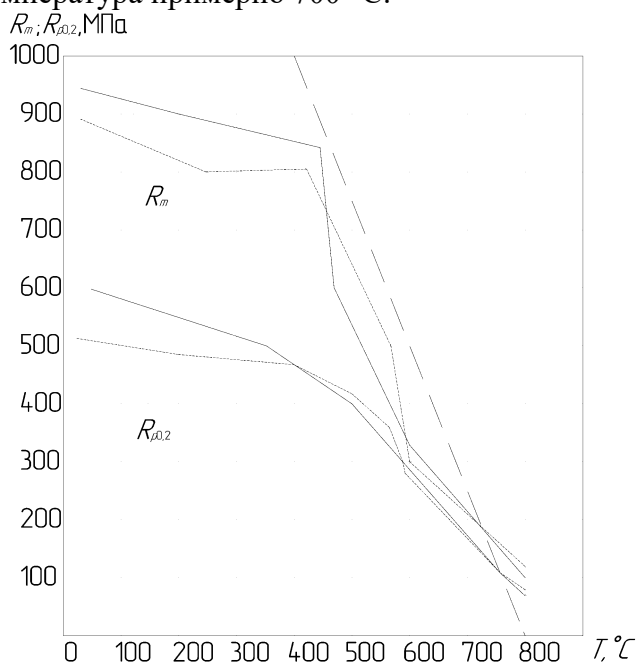


Рисунок 1. Прочность при растяжении и текучесть стали марки R8

Нужно сказать, что та сталь, которая располагается на поверхности катания колеса, отличается существенным упрочнением, которое появляется по причине пластической деформации, происходящей на постоянной основе. В данном случае допустимо использовать линейную зависимость прочности от температуры, чтобы данное упрочнение брать во внимание в контексте разных температур:

$$\sigma(\theta) = \sigma_0(\theta_k - \theta) / \theta_k, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = 1600$ МПа;

$\theta_k = 800$ °С.

Значение σ_0 соответствует микротвердости поверхности катания колеса (480 НВ), что меньше действительных показателей.

Рассматриваемая зависимость выполнена с запасом из-за большой скорости деформаций на пятне.

Если температура более 700 °С, аппроксимация ощутимо уменьшает способность материала фиксировать нагрузку. Данный запас нужен для роста коэффициента сцепления.

Из формул (4) и (5) следует равенство

$$2\psi\theta_k p_m / \sigma_0 + \theta = \theta_k, \quad (6)$$

которое при $p_m = 1000$ МПа переходит в числе равенство (5)

$$1000\psi + \theta = 800 \text{ °С}. \quad (7)$$

Для максимальной температуры контакта верно равенство

$$\theta = \gamma\psi N^{0,5} |v^{0,5} - (\omega R)^{0,5}|, \quad (8)$$

где v – скорость с которой движется подвижная единица;

ω – угловая скорость вращения колесной пары;

γ – размерный коэффициент (20К/Вт^{0,5}).

Подставляя формулу (8) в равенство (6), получаем:

$$2\psi\theta_k p_m / \sigma_0 + \gamma\psi N^{0,5} (v^{0,5} - (\omega R)^{0,5}) = \theta_k. \quad (9)$$

Правую часть равенства (9) определим эквивалентной температурой, не превышающей значение θ_k (800 °С). Через данное равенство допустимо определить максимально допустимые значения.

Форма пятна контакта и распределение давления находятся под влиянием большого количества факторов, к которым относится подуклонность рельсов, положение колесной пары, изношенность рельсов и колес, колебания N (нагрузки на колесо) и некоторые другие условия. В результате такого воздействия эквивалентная температура способна отклоняться на десятки процентов. Поэтому нет потребности в том, чтобы увеличивать точность используемых формул, беря во внимание эффекты второго порядка [16].

Выводы

В данной работе была всесторонне рассмотрена система «колесо – колодка – рельс» и температуры в пятне контакта при торможении. Авторами были изучены проблемы взаимодействия элементов этой системы. Был проведён анализ механизмов изнашивания. Проанализировано контактное взаимодействие железнодорожного колеса и рельса подвижного состава.

В то же время на пятнах можно обнаружить пластический сдвиг стали. С помощью рассмотренных зависимостей можно достаточно точно оценить размеры пятен.

Благодаря работе, проделанной в рамках данного исследования, можно установить векторы, согласно которым в будущем можно улучшить разные виды колодок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мануилов Н.И., Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 12-2 (34). С. 48-57.
2. Жаров И. А. Расчет температур на пятне контакта колеса с рельсом при юзе и боксовании // Трение и износ. 2003. № 3. С. 248-259.
3. Жаров И.А. Методика расчета приповерхностных температур системы «колодка-колесо» в режиме экстренного торможения // Трение и износ. 2003. №4. С. 383-390.
4. Жаров И.А., Курцев С.Б. Обоснование технических требований к противоюзным устройствам // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 6. С. 21-26.
5. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учеб. Пособие для вузов ж.-д. транспорта / М.:Маршрут, 2006. 392 с.
6. Крылов В.И., Крылов В.В. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник для учащихся техникумов ж.-д. транспорта / М.: Транспорт, 1983. 363 с.
7. Петров С.Ю. Закономерности работы трибосистемы «колодка-колесо-рельс» и пути повышения ее долговечности: Дис... док. техн. наук/ М.: МГУПС, 2002.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / М.: Мир, 1989. 510 с.

9. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов / Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
10. Жаров И.А., Воронин И.Н., Курцев С.Б. Приниженный расчёт поверхностных температур системы «колодки-колесо-рельс» // Трение и износ. 2003. №2. С. 144-152.
11. Жаров И.А. Требования к параметрам устройств для борьбы с юзом и боксованием // Вестник ВНИИЖТ. 2004. № 2. С. 35-39.
12. Марков Д.П. Трибология и её применение на железнодорожном транспорте / М.: Интекст, 2007. 408 с.
13. Мануилов Н.И., Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю. Моделирование работы резиновых уплотнений тормозной сети подвижного состава в условиях низких температур // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / 2017. № 3 (55). С. 112-119.
14. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / М.: Metallurgia, 1976. 488 с.
15. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: перев. с англ. / М.: Автоиздат, 1979. 216 с.
16. Иванов П.Ю., Мануилов Н.И., Дульский Е.Ю. Повышение управляемости тормозов поезда // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / 2018. № 1 (57). С. 103-109.
17. Иванов П.Ю., Мануилов Н.И., Дульский Е.Ю., Худогогов А.М. Исследование работы стабилизатора крана машиниста усл. № 395 // В сборнике: инновационные проекты и технологии машиностроительных производств. Материалы второй всероссийской научно-технической конференции. Омский государственный университет путей сообщения. 2017. С. 62-69.

REFERENCES

1. Manuilov N.I., Ivanov P.Yu., Dulsky E.Yu. Analiz vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezotkaznyuyu rabotu tormoznogo oborudovaniya poyezdov [Analysis of the influence of the human factor on the trouble-free operation of train braking equipment] // Science yesterday, today, tomorrow. 2016. No. 12-2 (34). pp. 48-57.
2. Zharov I. A. Raschet temperatur na pyatne kontakta koleasa s rel'som pri yuze i boksovaniy [Calculation of the temperature on the contact patch of the wheel and the rail when SW and spinning] // Friction and wear. 2003. No. 3. pp. 248-259.
3. Zharov I. A. Metodika rascheta pripoverkhnostnykh temperatur sistemy «kolodka-koleso» v rezhime ekstrennogo tormozheniya [Method of calculating the surface temperature of the system to "Shoe wheel" in the mode of emergency braking] // Friction and wear. 2003. No. 4. pp. 383-390.
4. Zharov I.A., Kurtsev S.B. Obosnovaniye tekhnicheskikh trebovaniy k protivoyuznym ustroystvam [Substantiation of technical requirements for anti-skid devices] // Vestnik VNIIZhT. 2006. No. 6. pp. 21-26.
5. Asadchenko V.R. Avtomaticheskiye tormoza podvizhnogo sostava: ucheb. Posobiye dlya vuzov zh.-d. transporta [Automatic brakes of rolling stock: textbook. Manual for universities of railway transport]. Moscow: Route, 2006, 392 p.
6. Krylov V.I., Krylov V.V. Avtomaticheskiye tormoza podvizhnogo sostava: uchebnyy dlya uchashchikhsya tekhnikumov zh.-d. transporta [Automatic brakes of rolling stock: textbook for students of technical schools of railway transport]. Moscow: Transport, 1983, 363 p.
7. Petrov S.Y. Zakonomernosti raboty tribosistemy «kolodka-koleso-rel's» i puti povysheniya yeye dolgovechnosti [Regularities of the work of the "pad-wheel-rail" tribosystem and ways to increase its durability]: Dis... doctor of Technical Sciences / Moscow: MGUPS, 2002.
8. Johnson K. Mekhanika kontaktного vzaimodeystviya [Mechanics of contact interaction]. Moscow: Mir, 1989, 510 p.
9. Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication): Textbook for technical universities / Edited by A.V. Chichinadze. Moscow: Center "Science and Technology", 1995, 778 p.

10. Zharov I.A., Voronin I.N., Kurtsev S.B. Prinizhenny raschot poverkhnostnykh temperatur sistemy «kolodki-koleso-rel's» [Belittled calculation of surface temperatures of the deck-wheel-rail system] // Friction and wear. 2003. No.2. pp. 144-152.

11. Zharov I. A. Trebovaniya k parametram ustroystv dlya bor'by s yuzom i boksovaniyem [Requirements of devices to fight against Hughes and the box office] // Vestnik VNIIZHT. 2004. No. 2. pp. 35-39.

12. Markov D. P. Tribologiya i yeyo primeneniye na zheleznodorozhnom transporte [Tribology and its application in rail transport]. Moscow: Intext, 2007, 408 p.

13. Manuilov N.I., Ivanov P.YU., Dul'skiy Ye.YU. Modelirovaniye raboty rezinovykh uplotneniy tormoznoy seti podvizhnogo sostava v usloviyakh nizkikh temperatur [Modeling of the operation of rubber seals of the brake network of a rolling stock at low temperatures] // Modern technologies. System analysis. Modeling / 2017. No. 3 (55). pp. 112-119.

14. Polukhin P.I., Gun G.YA., Galkin A.M. Soprotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov i splavov [Resistance to plastic deformation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1976, 488 p.

15. Wang H. Osnovnyye formuly i dannyye po teploobmenu dlya inzhenerov: perev. s angl. [Basic formulas and data on heat exchange for engineers: transl. from English / Handbook]. Moscow: Automizdat, 1979, 216 p.

16. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'skiy E.Yu. Povysheniye upravlyayemosti tormozov poyezda [Improving the controllability of train brakes] // Modern technologies. System analysis. Modeling / 2018. No. 1 (57). pp. 103-109.

17. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'skiy E.Yu., Khudonogov A.M. Issledovaniye raboty stabilizatora krana mashinista usl. № 395 [Investigation of the operation of the crane stabilizer of the machinist usl. No. 395] // In the collection: innovative projects and technologies of machine-building industries. Materials of the second All-Russian Scientific and Technical Conference. Omsk State University of Communication Routes. 2017. pp. 62-69.

Информация об авторах

Дульский Евгений Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Тюкавкин Евгений Александрович – студент факультета «Транспортные системы», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: e.a.tyukavkin@gmail.com

Information about the author

Dulsky Evgeny Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Wagons and Wagon Management", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Ivanov Pavel Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electric Rolling Stock", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Tyukavkin Evgeny Aleksandrovich – student of the Faculty of Transport Systems, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: e.a.tyukavkin@gmail.com