

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 625.1.032.3:[629.463.65.027.23:519.87]

А. В. САЙДОВА^{1*}, А. М. ОРЛОВА²^{1*} Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», ФГБОУ ВПО «ПГУПС», д. 9, Московский проспект, г. Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 335 69 07, эл. почта av-saidova@yandex.ru² Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВПО «ПГУПС», д. 9, Московский проспект, г. Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 335 69 07, эл. почта a-orlova@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВАГОНА НА ТЕЛЕЖКАХ 18-9810 И 18-9855 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОВ КОЛЕС

Цель. Уточнение параметров износа колес при их моделировании является актуальной задачей в связи с отсутствием соответствующих данных для грузовых вагонов в условиях их эксплуатации на российских железных дорогах. Необходимо создание математических моделей движения вагонов на двухосных трехэлементных тележках 18-9810 и 18-9855 с максимальными осевыми нагрузками 23,5 тс и 25 тс, соответственно, а также выбор факторов, варьированием которых можно идентифицировать параметры модели износа колес. **Методика.** Решение поставленной задачи осуществляется методом математического моделирования в программном комплексе «MEDYNA». Вычисление износа в модели основывается на теории абразивного износа (теория Арчарда). **Результаты.** Уточнение модели износа профилей колес может производиться путем варьирования коэффициента трения между колесом и рельсом для различных зон профиля колеса – гребня и поверхности катания, коэффициента износа в модели Арчарда для сильной и слабой стадии и точки перехода между ними. **Научная новизна.** Разработаны математические модели движения универсального полувагона на тележках 18-9810 и 18-9855. Установлено, что величина неровностей рельсовых нитей оказывает незначительное влияние на износ колес при движении вагонов по круговому пути постоянного радиуса. **Практическая значимость.** Разработанные модели движения полувагона на тележках 18-9810 и 18-9855 могут быть использованы при прогнозировании износов колес, определении показателей ходовых качеств движения, взаимодействия вагонов и путей различного типа, конструкций, состояний и т.п. Результаты исследования влияния некоторых факторов на износ колес грузовых вагонов могут быть использованы лицами, заинтересованными в изучении данного вопроса.

Ключевые слова: тележка; износ колес; моделирование износа; модель изнашивания; коэффициент трения; коэффициент износа

Введение

Целью работы является уточнение параметров износа при моделировании железных дорог колеи 1520 мм. Для этого на данном этапе проводилась разработка математических моделей движения вагонов на двухосных трехэлементных тележках 18-9810 и 18-9855 с учетом износа профилей колес, а также выбор факторов, варьированием которых можно идентифицировать параметры в модели износа профилей колес.

Рассматриваемые тележки 18-9810 и 18-9855 предназначены для установки под грузовые вагоны с осевой нагрузкой 23,5 тс и 25 тс, соответственно, и конструкционной скоростью 120 км/ч. Тележки разработаны ОАО «НВЦ «Вагоны» на основе технического проекта компании Stan-

dard Car Truck (корпорация Wabtec, США) для Тихвинского вагоностроительного завода [7].

Основные отличия тележки модели 18-9855 от 18-9810 заключаются в конструкции наддрессорной балки с увеличенным по требованиям нормативных документов диаметром и глубиной подпятника, применении триангеля с безрезьбовым креплением башмака, колесных пар с S-образной формой диска. Остальные детали – боковые рамы, пружины подвешивания, детали фрикционного гасителя колебаний, боковые скользуны постоянного контакта – унифицированы для двух тележек.

1. Математические модели вагона

Математические модели вагона представленных тележке должны отражать важные свойства работы узлов. Для этого разработаны

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

две расчетные схемы вагона, содержащие 23 твердых тела (кузов, две надрессорные балки, четыре боковые рамы, четыре колесные пары, четыре участка пути и восемь участков рельсов).

Моделирование проводилось в программном комплексе «MEDYNA» [5, 6]. Для тел задавались массово-инерционные характеристики и степени свободы в пространстве. Взаимодействие тел друг с другом описывалось специальными элементами связи.

Так, модель боковых скользунов постоянно контакта учитывала работу сил сухого трения на их опорных поверхностях, работу упругого элемента и ограничение хода при опоре колпака на корпус за счет полного прогиба упругого элемента. Механическая схема элемента представлена на рис. 1.

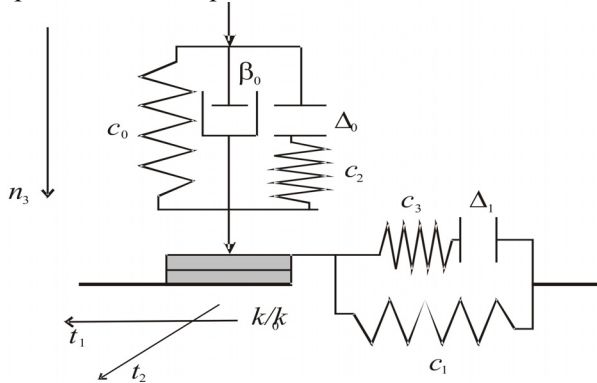


Рис. 1. Механическая схема элемента № 298, описывающего работу сил сухого трения, переменное прижатие и наличие ограничителя хода

Параметры схемы задаются в следующей последовательности:

- C_0 – жесткость поджимающей пружины;
- C_1 – жесткость на сдвиг;
- k – коэффициент трения до замыкания зазора Δ_0 ;
- t_1 и t_2 – вектор действия силы трения;
- n_3 – вектор действия силы прижатия;
- Δ_0 – зазор в направлении действия силы прижатия;
- C_2 – жесткость поджимающей пружины после замыкания зазора Δ_0 ;
- k_0 – коэффициент трения после замыкания зазора Δ_0 ;
- β_0 – коэффициент вязкого трения;
- Δ_1 – зазор в направлении действия силы трения;

- C_3 – жесткость на сдвиг после замыкания зазора Δ_1 .

При моделировании взаимодействия пятника с подпятником использовался набор элементов, показанный на рис. 2:

- сферический шарнир (элемент № 13), допускающий линейное перемещение в вертикальном направлении и угловые перемещения вокруг трех осей;
- упругий элемент (элемент № 61), реализующий эквивалентную жесткость при галопировании тележки под вагоном;
- нелинейные элементы (элемент № 298), реализующие работу сил сухого трения в горизонтальной плоскости и сопротивление при перевалке кузова.

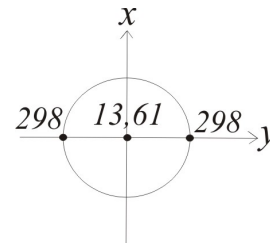


Рис. 2. Расположение элементов при моделировании работы узла «пятник-подпятник»

Элементы № 13 и 61 расположены в центре пятника. Жесткость на галопирование определялась по формуле:

$$c_{\varphi} = \frac{P \cdot (R - h \cdot \sin \varphi)}{\varphi}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, действующая на подпятник;

R – радиус пятника;

h – высота центра масс кузова над уровнем подпятника;

φ – угол галопирования тележки.

Возможный угол галопирования тележки под кузовом вагона оценивался, исходя из максимальной глубины вертикальной неровности:

$$\varphi \approx \frac{h_e}{2l}, \quad (2)$$

где h_e – глубина вертикальной неровности;

$2l$ – база тележки.

Работа сил сухого трения при повороте тележки в плане описывалась двумя элементами № 298, разнесенными на величину y_0 от центра пятника. Особенностью элемента № 298

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

является задаваемая жесткость поджимающей элемент сухого трения пружины C_0 , которая обеспечивает возвращающую силу при перевалке вагона на пятнике. Для обеспечения жесткости, эквивалентной действию гравитационной возвращающей силы при перевалке, расстояние y_0 выбиралось по формуле:

$$y_0 = \sqrt{\frac{P \cdot (R - h \cdot \sin \vartheta)}{2 \cdot C_0 \cdot \vartheta}}, \quad (3)$$

где C_0 – заданная жесткость поджимающей пружины;

ϑ – угол перевалки, определяемый по формуле:

$$\vartheta = \frac{\Delta_{ск}}{b}, \quad (4)$$

где $\Delta_{ск}$ – величина динамического хода скользуна;

$2b$ – расстояние между продольными осями боковых скользунов.

Чтобы момент трения в связи «пятник-подпятник» в модели соответствовал работе этого узла в плоскости, в элементах № 298 задавалась соответствующая величина приведенного коэффициента трения \tilde{k} :

$$\tilde{k} = \frac{2}{3} \cdot k \cdot \frac{R}{y_0}, \quad (5)$$

где k – фактический коэффициент трения на поверхности пятника.

Колесные пары и боковые рамы связаны между собой элементами, реализующими сухое трение в горизонтальной плоскости и горизонтальные перемещения в пределах зазоров в буксовых узлах тележек.

При описании связи колес с рельсами использовалась нелинейная модель контакта колеса и рельса, допускающая двухточечный контакт профилей.

Связь между приведенным участком пути и отсчетной системой координат, а также между подошвой рельса и элементом пути, смоделирована упруго-демпфирующими элементами.

Вычисление износа в модели основывается на теории абразивного износа (теория Арчарда, [10]). Масса изношенного материала пропорциональна работе сил трения, причем различаются фазы слабого и сильного износа, для каждой из которых устанавливается свой коэф-

фициент пропорциональности:

$$I = k_v \cdot A, \quad (6)$$

где k_v – коэффициент износа (лежит в пределах от 10^{-4} мг/Нм до 10^{-2} мг/Нм, [8]);

A – работа сил трения в контакте.

Переход от сильного износа к слабому учитывается путем задания определенного значения отношения мощности сил трения в пятне контакта к его площади.

2. Исследование влияния некоторых факторов на износ

На износ оказывает влияние большое количество факторов, зависящих от параметров пути, ходовых частей, условий контактирования колеса и рельса, [4]. При поиске сходимости результатов моделирования и эксперимента в каждом конкретном случае некоторые факторы остаются неизменными, а другие подлежат варьированию.

Для случая пробега вагонов на тележках моделей 18-9810 и 18-9855 по экспериментальному кольцу ВНИИЖТ в г. Щербинка [2, 3] к постоянным факторам можно отнести:

- параметры пути (радиус кривой, ширина колеи, возвышение наружного рельса, профиль и состояние рельсов и т.п.);
- параметры ходовых частей и вагона в целом (режим движения, скорость, осевая нагрузка, параметры конструкции, первоначальное состояние и геометрические параметры профиля колес, качество металла колес и т.п.).

Обзор работ в области моделирования износа колес показал необходимость исследования влияния величины неровностей пути на него, а также задание коэффициента трения в контакте в виде отдельных значений для зон поверхности катания и гребня колеса.

Для этого были проведены три варианта расчетов износа колес вагона на тележках 18-9855, движущегося по круговому участку пути радиусом 956 м (имитация испытательного кольца ВНИИЖТ, г. Щербинка) с неровностями согласно РД 32.68 [9] – в первом случае, с увеличенными в 1,5 раза неровностями – во втором и уменьшенными в 2 раза – в третьем. Изменение величины неровностей в модели задавалось соответствующим масштабирую-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

щим коэффициентом. Профили колес, полученные после пробега 24 тыс. км, в сравнении с новым неизношенным профилем по ГОСТ 10791 [1] показаны на рис. 3.

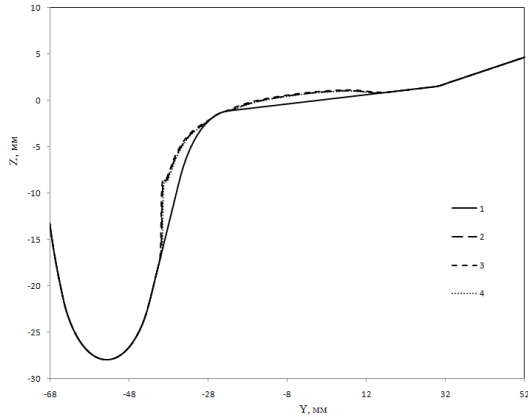


Рис. 3. Профили колес при различных величинах неровностей пути: 1 – неизношенный профиль; 2 – профиль при неровностях по РД 32.68; 3 – профиль при увеличенных неровностях; 4 – профиль при уменьшенных неровностях

Анализ результатов расчета показывает, что полученные профили колес для всех трех случаев отличаются между собой не более чем на 5 %, что позволяет сделать вывод о незначительности влияния величины неровностей на износ при движении вагона по круговому пути т.е. отсутствует необходимость учета точной величины неровностей пути.

Исследование влияния различного коэффициента трения между колесом и рельсом для различных зон профиля колеса проводилось для вагона, движущегося по пути, аналогичному описанному выше, с неровностями по РД 32.68. Полученные профили колес показаны на рис. 4.

Результаты показывают, что увеличение коэффициента трения на гребне колеса приводит к снижению износа на поверхности катания.

Таким образом, точная модель износа профилей колес может быть получена путем уточнения следующих параметров:

- коэффициента трения между колесом и рельсом для различных зон профиля колеса – гребня и поверхности катания (принимается усредненным для различных погодных условий, наблюдаемых при испытаниях);
- коэффициента износа в модели Арчарда

для сильной и слабой стадии;

- точки перехода от сильного износа к слабому.

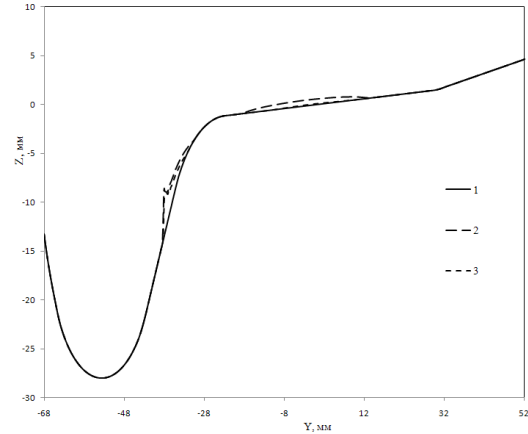


Рис. 4. Профили колес при различных коэффициентах трения между колесом и рельсом: 1 – неизношенный профиль; 2 – профиль при коэффициенте трения 0,25; 3 – профиль при коэффициенте трения 0,3 на гребне и 0,25 на поверхности катания

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия. – Введ. 2012–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 28 с.
2. Двухосная трехэлементная тележка для грузовых вагонов колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 23,5 тс модели 18-9810 : протокол ресурсных пробеговых испытаний (заключит.) / ОАО «НВЦ «Вагоны» ; рук. Ю. П. Бороненко ; исполн. : Лесничий В. С., Сухих И. В., Юрьева Е. И., Карпушина Е. В. – СПб., 2010. – 62 с. – Библиогр.: С. 30.
3. Двухосная трехэлементная тележка для грузовых вагонов колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 25 тс модели 18-9855 : протокол ресурсных пробеговых испытаний (заключит.) / ОАО «НВЦ «Вагоны» ; рук. Ю. П. Бороненко; исполн. : Лесничий В. С., Сухих И. В., Юрьева Е. И., Карпушина Е. В. – СПб., 2011. – 58 с. – Библиогр.: С. 29.
4. Захаров, С. М. Математическое моделирование влияния параметров пути и подвижного состава на процессы изнашивания колеса и рельса / С. М. Захаров, Ю. С. Ромен // Вестн. ВНИИЖТ. – Вып. 2. – 2010. – С. 26–30.
5. Лесничий, В. С. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Ч. 1. Основы моделирования в про-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- граммно комплексе MEDYNA : учебное пособие / В. С. Лесничий, А. М. Орлова. – СПб : ПГУПС, 2001. – 34 с.
6. Лесничий, В. С. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Ч. 3. Моделирование динамики грузовых вагонов в программном комплексе MEDYNA : учебное пособие / В. С. Лесничий, А. М. Орлова. – СПб. : ПГУПС, 2002. – 35 с.
 7. Орлова, А. М. Конструктивные особенности тележек моделей 18-9810 и 18-9855 / А. М. Орлова, Е. А. Щербаков // Вагонный парк. – 2011. – № 6. – С. 48–50.
 8. Погорелов, Д. Ю. Универсальный механизм 7.0. Износ профилей колес и рельсов. Руководство пользователя [Электронный ресурс] / Д. Ю. Погорелов. – 2012. – С. 7–8. – Режим доступа: http://www.universalmecanism.com/download/70/rus/16_um_wheel_wear.pdf. – Загл. с экрана.
 9. РД 32.68-96. Руководящий документ. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. – Введ. 1997–01–01. – М. : ВНИИЖТ, 1996. – 17с.
 10. Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces / J. F. Archard // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24, № 8. – P. 981–988.

А. В. САЙДОВА^{1*}, А. М. ОРЛОВА²

^{1*} Каф. «Вагоны та вагонне господарство», ФДБОУ ВПО «ПДУШС», буд. 9, Московський проспект, м. Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 335 69 07, ел. пошта av-saidova@yandex.ru

² Каф. «Вагоны та вагонне господарство», ФДБОУ ВПО «ПДУШС», буд. 9, Московський проспект, м. Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 335 69 07, ел. пошта a-orlova@yandex.ru

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВАГОНІВ НА ВІЗКАХ 18-9810 І 18-9855 ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КОЛІС

Мета. Уточнення параметрів зносу коліс при їх моделюванні є актуальним завданням у зв'язку з відсутністю відповідних даних для вантажних вагонів в умовах їх експлуатації на російських залізницях. Необхідне створення математичних моделей руху вагонів на двовісних трьохелементних візках 18-9810 і 18-9855 з максимальними осьовими навантаженнями 23,5 тс і 25 тс, відповідно, а також вибір факторів, варіюванням яких можна ідентифікувати параметри в моделі зносу коліс. **Методика.** Рішення даного завдання здійснюється методом математичного моделювання в програмному комплексі «MEDYNA». Обчислення зносу в моделі ґрунтується на теорії абразивного зносу (теорія Арчарда). **Результати.** Уточнення моделі зносу профілів коліс може вироблятися шляхом варіювання коефіцієнта тертя між колесом і рейкою для різних зон профілю колеса - гребеня і поверхні катання, коефіцієнта зносу в моделі Арчарда для сильної і слабкої стадії і точки переходу між ними. **Наукова новизна.** Розроблено математичні моделі руху універсального піввагона на візках 18-9810 і 18-9855. Встановлено, що величина нерівностей рейкових ниток робить незначний вплив на знос коліс при русі вагонів по круговому шляху постійного радіуса. **Практична значимість.** Розроблені моделі руху піввагона на візках 18-9810 і 18-9855 можуть бути використані при прогнозуванні зносів коліс, визначенні показників ходових якостей руху, взаємодії вагонів і шляхів різних типів, конструкцій, станів і т.п. Результати дослідження впливу деяких чинників на знос коліс вантажних вагонів можуть бути використані особами, зацікавленими в вивченні даного питання.

Ключові слова: візок; знос коліс; моделювання зносу; модель зношування; коефіцієнт тертя; коефіцієнт зносу

А. V. SAIDOVA^{1*}, А. M. ORLOVA²

^{1*} Dep. «Railcars and Railcars' Maintenance», FGBOU VPO Saint-Petersburg State Railway Transport University, bld.9, Moskovskiy Av, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 335 69 07, e-mail av-saidova@yandex.ru

² Dep. «Railcars and Railcars' Maintenance», FGBOU VPO Saint-Petersburg State Railway Transport University, bld.9, Moskovskiy Av., Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 335 69 07, e-mail a-orlova@yandex.ru

DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODELS OF WAGONS ON MODELS 18-9810 AND 18-9855 BOGIES TAKING INTO ACCOUNT WHEEL WEAR RESEARCH

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Purpose. Wear parameters clarification in wear simulation is an actual goal because of absence of corresponding data for freight cars in condition of using them on Russian railways. Research is devoted to development of dynamic models of wagons on three-peace two-axle models 18-9810 and 18-9855 bogies with maximum axle-loads 23,5 ts and 25 ts, and to choice of factors, with varying which parameters in the model of wheel wear can be identified. **Methodology.** The problem is solved by method of mathematic simulation in «MEDYNA» software. Wear calculation is based on abrasive wear theory (Archard's theory). **Findings.** Clarification of wheels' wear model may be done with varying of friction coefficient between wheel and rail for different wheel profile areas (flange and tread), wear coefficient in Archard's model for mild and heavy wear and transition between them. **Originality.** Dynamic models of universal gondola on models 18-9810 and 18-9855 bogies are developed. It is established, that rail treads irregularities size effect wheel wear insignificantly, when car is running on circle track of constant radius. **Practical value.** Developed dynamic models of wagons on models 18-9810 and 18-9855 bogies may be used in wear simulation, determination of car running characteristics, interaction of car and rail of different type, construction, condition and etc. Research results of some factors influence on freight car wheel wear may be interesting for people, who study this problem.

Keywords: bogie; wheel wear; wear modelling; wear model; friction factor; wear factor

REFERENCES

1. GOST 10791-2011. *Kolesa tselnokatannyye. Tekhnicheskkiye usloviya* [State Standard 10791-2011. All-rolled wheels. Technical specification]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 28 p.
2. Boronenko Yu.P., Lesnichiy V.S., Sukhikh I.V., YuryevaYe.I., Karpushina E.V. *Dvukhosnaya trekhelementnaya teleshka dlya gruzovykh vagonov kolei 1520 mm s oseyoy nagruzkoy 23,5 ts modeli 18-9810* [Model 18-9810 two-axle three peace bogie for freight cars of 1520 mm track gauge with an axle load of 23,5 tons]. Saint-Petersburg, 2010. 62 p.
3. Boronenko Yu.P., Lesnichiy V.S., Sukhikh I.V., Yuryeva Ye.I., Karpushina Ye.V. *Dvukhosnaya trekhelementnaya teleshka dlya gruzovykh vagonov kolei 1520 mm s oseyoy nagruzkoy 25 ts modeli 18-9855* [Model 18-9855 two-axle three peace bogie for freight cars of 1520 mm track gauge with an axle load of 25 tons: protocol of running tests]. Saint-Petersburg, 2011. 58 p.
4. Zakharov S.M., Romen Yu.S. *Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya parametrov puti i podvizhnogo sostava na protsessy iznashivaniya kolesa i relsa* [Mathematical modeling of parameters of the track and rolling stock influence on processes of wheel and rail wear] *Vestnik VNIIZHT – VNIIZHT Bulletin* (Bulletin of the Railway Research Institute), 2010, no. 2, pp. 26-30.
5. Lesnichiy V.S., Orlova A.M. *Kompyuternoye modelirovaniye zadach dinamiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Chast 1: Osnovy modelirovaniya v programmnom komplekse Medyna* [Computer modeling of dynamic problems in railway rolling stock, Part 1: Modeling bases in MEDYNA]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Railway Transport University Publ., 2001. 34 p.
6. Lesnichiy V.S., Orlova A.M. *Kompyuternoye modelirovaniye zadach dinamiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Chast 3: Modelirovaniye dinamiki gruzovykh vagonov v programmnom komplekse Medyna* [Computer modeling of dynamic problems in railway rolling stock, Part 3: Modeling dynamics of freight wagons in MEDYNA]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Railway Transport University Publ., 2002. 35 p.
7. Orlova A.M., Shcherbakov Ye.A. *Konstruktivnyye osobennosti teleshkek 18-9810 i 18-9855* [Design features of models 18-9810 and 18-9855 bogies]. *Vagonnyy park – Vagon Fleet*, 2011, no. 6, pp. 48-50.
8. Pogorelov D.Yu. *Universalnyy mekhanizm 7.0. Iznos profilei koles i relsov*. (Universal mechanism 7.0. Railway Wheel and Rail Profile Wear Prediction Module), 2012, pp. 7-8. Available at: http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/16_um_wheel_wear.pdf (Accessed 01 September 2012).
9. RD 32.68-96. *Rukovodyashchiy dokument. Raschetnyye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispolzovaniya pri issledovaniyakh i proektirovanii passazhirskikh i gruzovykh vagonov* [Guideline document 32.68-96. Design irregularities of railway track for using in freight and passenger cars simulation]. Moscow, VNIIZHT Publ., 1996. 17 p.
10. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 1953, vol. 24, no. 8, pp. 981-988.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Л. А. Манашиным (США); д.т.н., проф. В. Л. Горбцом (Украина)

Поступила в редколлегию 18.12.2013

Принята к печати 08.04.2013