

Транспорт

УДК 004.94:629.4

DOI: 10.30987/article_5c3db112bc9cb6.67262236

С.Е. Гончаров, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПУТЬ И
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ИННОВАЦИОННЫХ ВАГОНОВ
И ВАГОНОВ УСТАРЕВШИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методами компьютерного моделирования выполнен сравнительный анализ сопротивления движению и силового воздействия на путь грузовых вагонов на тележках типов 18-100 (осевая нагрузка 23,5 тс), 18-9855 (осевая нагрузка 25 тс) и 18-6863 (осевая нагрузка 27 тс) в новом и среднеизношенном состоянии при движении в грузе

режиме по прямым и кривым участкам пути с неизношенными и среднеизношенными профилями рельсов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, грузовые вагоны, воздействие на путь, сопротивление движению.

S.E. Goncharov, D.Yu. Pogorelov, V.A. Simonov

COMPARATIVE ASSESSMENT OF IMPACT UPON RAILWAY TRACK AND RESISTANCE TO MOTION OF INNOVATION CARS AND OUTDATED DESIGN CARS BY COMPUTER SIMULATION METHODS

A comparative analysis of resistance to a motion and a force influence upon a freight car motion on the car trucks of 18-100 types (axial load of 23.5 TF), 18-9855 (axial load of 27 TF) at a new and average worn condition is carried out. A motion at a loaded mode on straight and curved lines and also on turnouts with unworn and average worn rail profiles was under consideration.

The work is carried out by the method of computer simulation with the aid of "Universal Mechanism" program complex. For that there are used semi-functional models of freight cars. A force influence up-

on a track in a vertical and transverse directions and a specific resistance to a motion at the expense of friction loss in a "wheel-rail" system was estimated.

It is established that a car on bogies with the axial load of 23.5 TF shows on an average a lesser impact upon a track at the motion on straight and curved sections of a railway route and also on turnouts. Besides, this car shows a lesser specific resistance to a motion caused by a friction interaction of wheels and rails than cars with a larger axial load.

Key words: computer simulation, freight cars, impact upon track, resistance to motion.

Введение

В статье представлены результаты сравнительных исследований движения грузового полувагона на тележках типа 18-100 с нагрузкой от оси 23,5 тс, типа 18-9855 с нагрузкой от оси 25 тс и типа 18-6863 с нагрузкой от оси 27 тс. С этой це-

лью использованы модели, разработанные в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК «УМ») [1; 2]. Полнофункциональные модели тележек разработаны с учетом данных, приведенных в [3–9].



Рис. 1. Общий вид модели полувагона в ПК «УМ»

Модели вагонов на тележках типов 18-100, 18-9855 и 18-6863 разрабатывались средствами ПК «УМ» по единой методике

(рис. 1). Это позволяет свести к минимуму относительную погрешность моделей, которая определяется в данном случае точ-

ностью численных методов. Модель вагона на тележках 18-100 образована 19 абсолютно твердыми телами (кузов, две наддресорные балки, 4 боковые рамы, 8 клиньев, 4 колесные пары) и имеет 114 степеней свободы [10]. Модели вагонов на тележках 18-9855 и 18-6863 образованы 43 абсолютно твердыми телами (кузов, две наддресорные балки, 4 боковые рамы, 16 клиньев, 8 букс, 8 адаптеров, 4 колесные пары) и имеют по 218 степеней свободы.

Инерционные характеристики кузова полувагона для тележки 18-100 соответствуют полувагону 12-132-03 с базой 8,65

м. Моменты инерции кузовов полувагонов с осевыми нагрузками 25 и 27 тс получены путем увеличения этих параметров для вагона 12-123-03 пропорционально отношению масс кузовов. Характеристики рессорного подвешивания инновационных вагонов соответствуют расчетным данным, приведенным в [7–9].

На рис. 2–4 показаны реализованные в моделях силовые характеристики рессорного подвешивания вагонов в графических окнах ПК «УМ», полученные моделированием теста «сброс с клиньев».

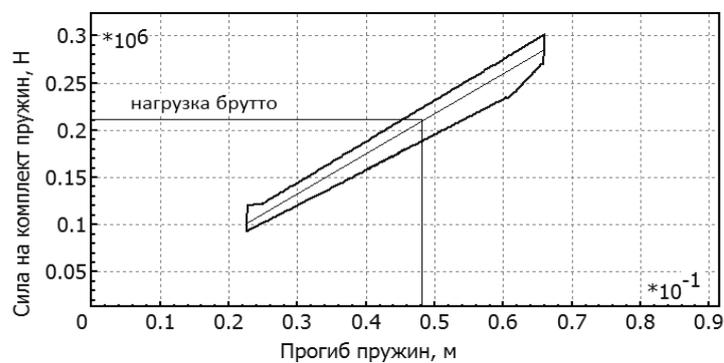


Рис. 2. Силовая характеристика рессорного подвешивания тележки 18-100

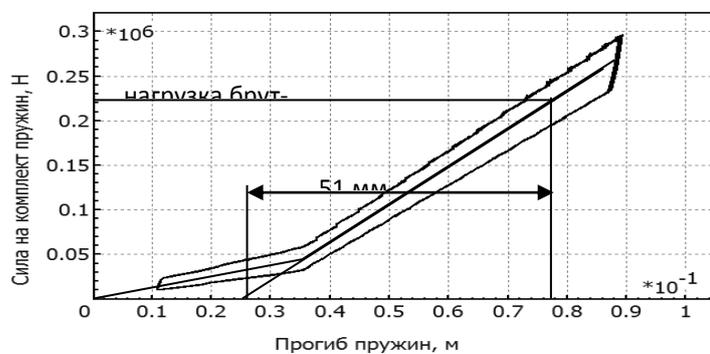


Рис. 3. Силовая характеристика рессорного подвешивания тележки 18-9855

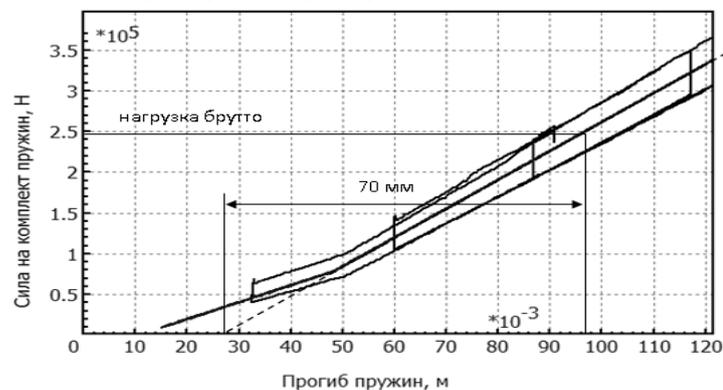


Рис. 4. Силовая характеристика рессорного подвешивания тележки 18-6863

Моделировалось движение вагонов по прямым участкам пути, кривым радиусом 650 и 350 м и стрелочным переводам марок 1/9 и 1/11. Схема исследований для каждой из тележек включает четыре основных этапа для возможных сочетаний состояний тележек и пути, соответствующих новому и изношенному состояниям клиновой системы, профилей колес и рельсов. Выполнены также исследования для профиля колес вагонов с повышенным износом. Проведены контрольные расчеты на уточненных моделях контакта колес с

рельсами с использованием интерфейса ПК «УМ» к программе CONTACT [11].

Учет изношенного состояния вагонов осуществлялся путем снижения эффективности фрикционных гасителей колебаний (за счет возвышения клина) и использования изношенных профилей колес. В качестве изношенного профиля применялся среднеизношенный профиль с прокатом 1,1 мм и износом гребня 3,75 мм. Кроме того, для дополнительных исследований применялся профиль с повышенным износом - с прокатом 1,4 мм и износом гребня 5,22 мм (рис. 5).

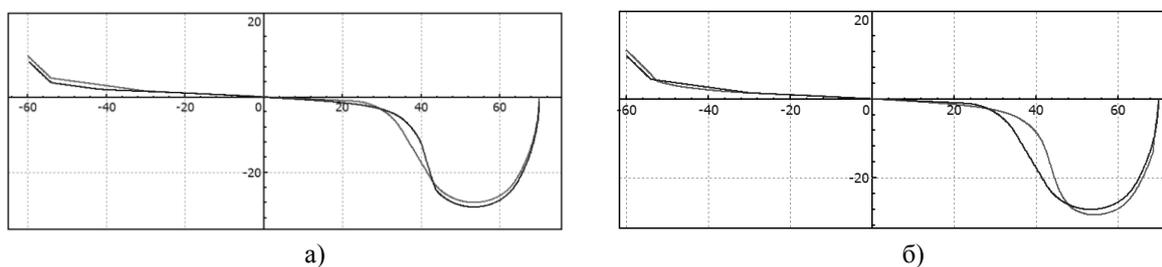


Рис. 5. Профили колес вагонов в новом, среднеизношенном (а) и изношенном (б) состоянии

состояние пути варьировалось за счет использования неизношенных и изношенных профилей рельса. Для прямых участков пути и внутренних рельсовых нитей в кривых принимался рельс с величиной проката 1 мм, для наружных нитей в кривых в качестве изношенного использо-

вался профиль с износом боковой поверхности 5 мм (рис. 6). В стрелочных переводах профиль рельса принимался неизношенным. В численных экспериментах неровности рельсовых нитей соответствовали пути удовлетворительного содержания.

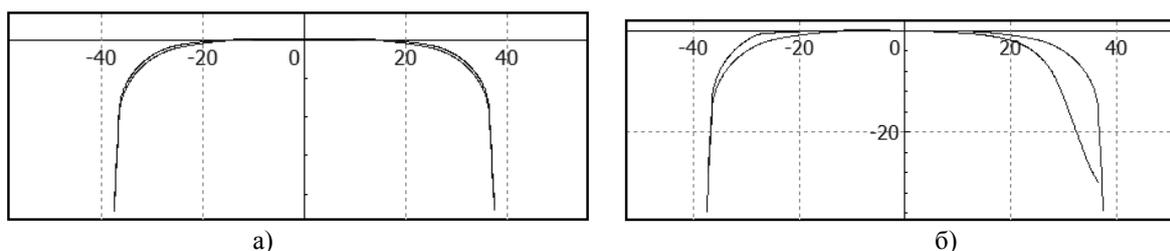


Рис. 6. Профили рельсов для прямых (а) и кривых (б) участков пути в новом и изношенном состоянии

Динамика вагона при движении в прямых и кривых участках пути оценивалась по следующим пяти показателям:

1) удельное сопротивление движению (н/кН) за счет фрикционных потерь в системе «колесо - рельс» (часть полного удельного сопротивления вагона без таких компонент, как сопротивление ветра, трение в подшипниках и т.д.);

2) рамные силы (кН);

3) боковые силы по отжатию рельса (кН);

4) вертикальные силы в контакте «колесо - рельс» (кН);

5) коэффициенты динамики вертикальных сил между колесом и рельсом.

Показатели определялись по наихудшим значениям на всех колесных парах и обрабатывались путем фильтрации процессов фильтром низких частот с частотой среза 20 Гц и оценкой максималь-

ных величин как квантилей распределений с вероятностью 0,999 (для боковых сил - с вероятностью 0,994 без фильтрации).

Процедура осреднения показателей, необходимая для получения интегральных оценок (свертка на множестве условий функционирования), построена при следующих допущениях. Доли прямых участков, кривых с $R = 650$ м и $R = 350$ м приняты 0,82, 0,14 и 0,04 соответственно. Доля эксплуатации тележек и рельсов в среднеизношенном состоянии принята равной 0,8, а в новом - 0,2. В качестве представительных режимов принято движение вагона по прямым и кривым участкам пути радиусом 650 м со скоростями 20, 40, 60, 80

и 100 км/ч с вероятностями, представленными долями пробега. Рассмотрены два варианта распределения вероятностей скоростей. Вариант 2 соответствует режимам движения, исключая скорость 100 км/ч, что во многих случаях соответствует реально существующим распределениям скоростей с учетом действующих ограничений. Для движения по стрелочным переводам использовались свои два варианта распределения скоростей - соответственно для переводов марок 1/9 и 1/11.

Общая схема основных исследований в виде иерархической структуры изображена на рис. 7.

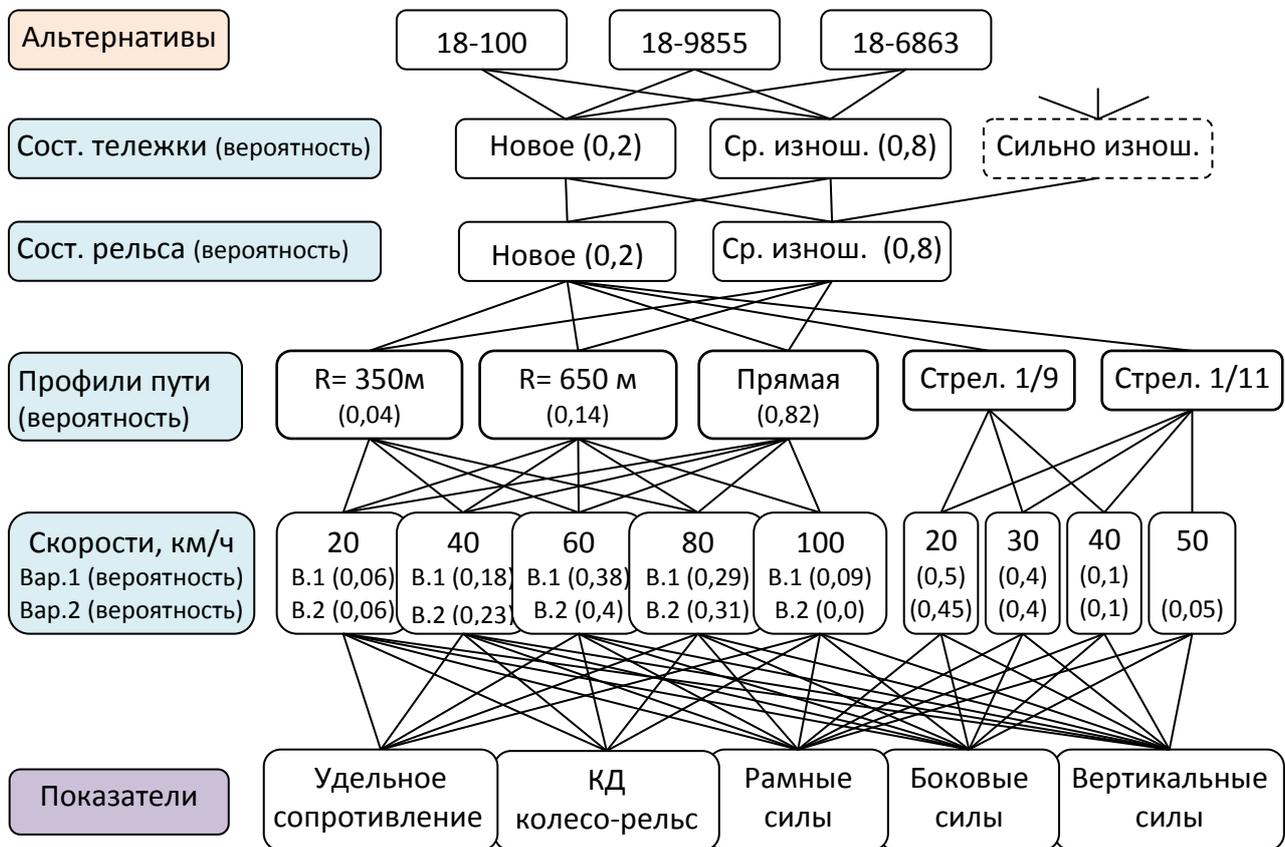


Рис. 7. Общая схема исследований

Результаты исследований

Движение по прямым и кривым участкам пути. Результаты сравнительных исследований движения вагонов с различными типами тележек по прямым и

кривым участкам пути в виде средневзвешенных оценок показателей представлены на рис. 8-12.

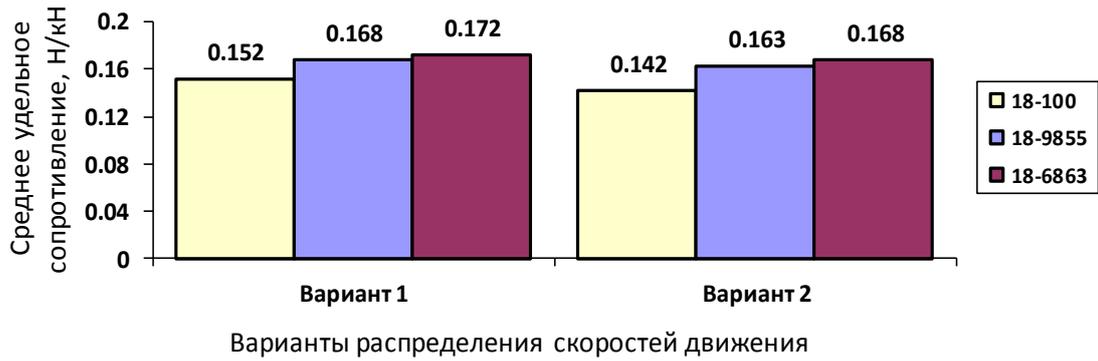


Рис. 8. Сравнение средних удельных сопротивлений движению в продольном направлении

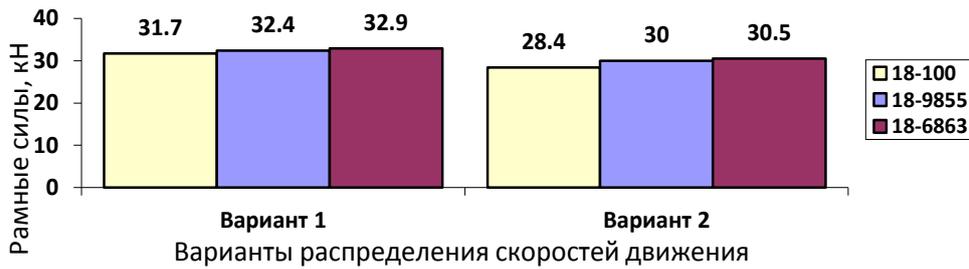


Рис. 9. Сравнение рамных сил

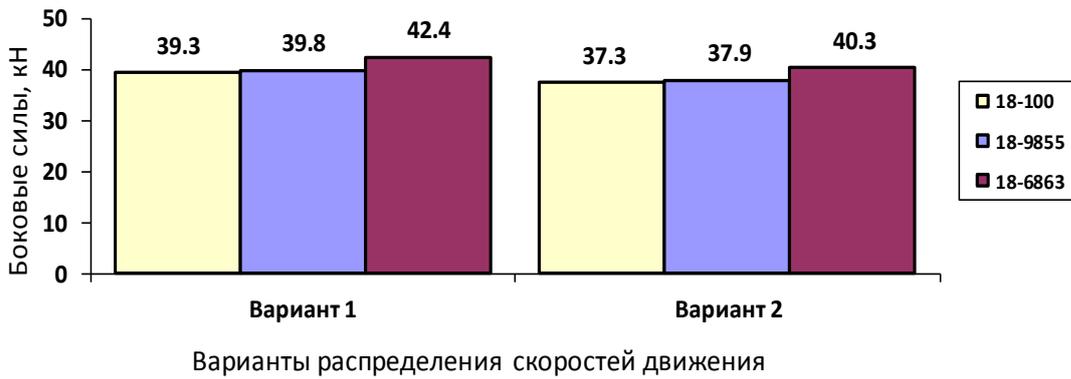


Рис. 10. Сравнение боковых сил

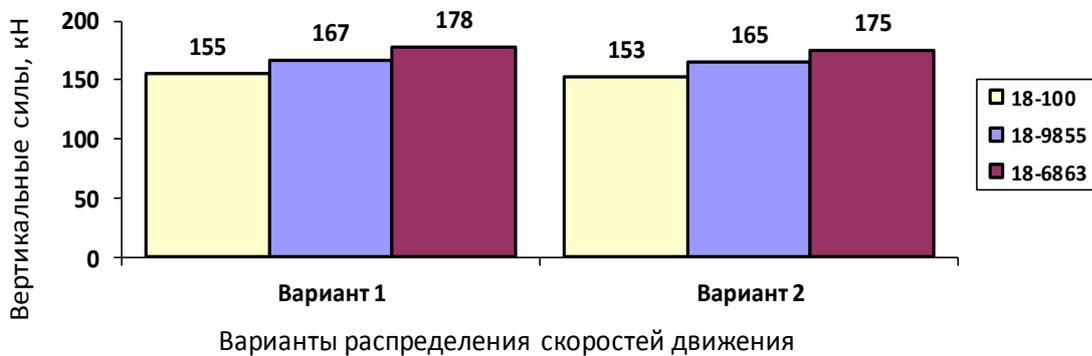


Рис. 11. Сравнение вертикальных сил

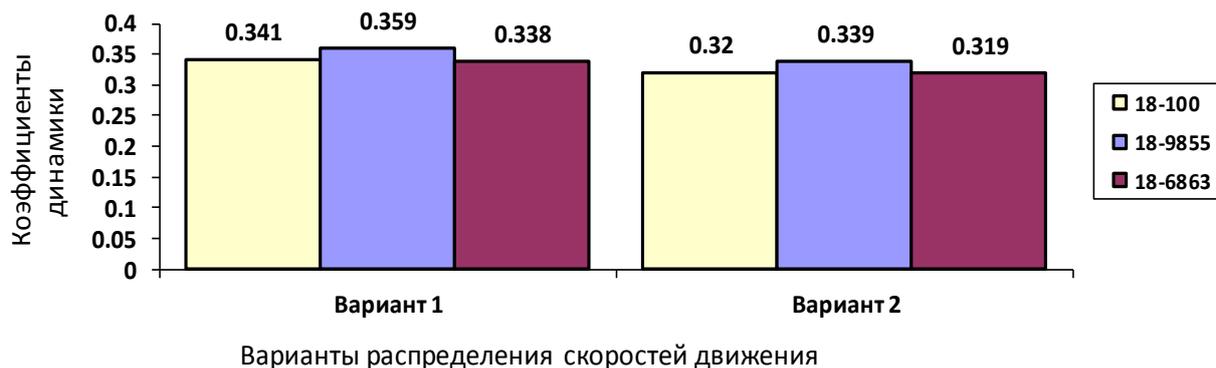


Рис. 12. Сравнение коэффициентов динамики

Результаты сравнительных исследований движения вагонов с различными типами тележек по прямым и кривым участкам пути позволяют сделать следующие выводы:

1. Вагон на тележках типа 18-100 в среднем имеет меньшее удельное сопротивление движению, вызванное силами трения, чем вагоны на тележках типов 18-9855 и 18-6863: на 10 и 13 % соответственно при оценке по варианту 1; на 15 и 18 % соответственно при оценке по варианту 2 (рис. 8).

2. Вагон на тележках типа 18-100 имеет примерно одинаковый с вагонами на тележках типов 18-9855 и 18-6863 средневзвешенный уровень максимальных рамных сил в случае оценки по варианту 1 и меньший уровень рамных сил, чем вагоны на тележках типов 18-9855 и 18-6863, в

среднем на 6 и 7 % соответственно в случае оценки по варианту 2 (рис. 9).

3. Вагон на тележках типа 18-100 имеет меньший уровень боковых и вертикальных сил, чем вагоны на тележках типов 18-9855 и 18-6863 (рис. 10, 11).

4. Вагон на тележках типа 18-100 имеет преимущество перед вагоном на тележках 18-9855 по величине коэффициентов динамики в среднем на 5-6 % и незначительно уступает вагону на тележках типа 18-6863 по варианту 2 (рис. 12).

Движение по стрелочным переводам. Результаты сравнительных исследований движения вагонов с различными типами тележек по стрелочным переводам марок 1/9 и 1/11 в противоположном направлении в виде средневзвешенных оценок максимальных рамных сил, боковых сил по отжатию рельса и вертикальных сил между колесом и рельсом представлены ниже на рис. 13-15.

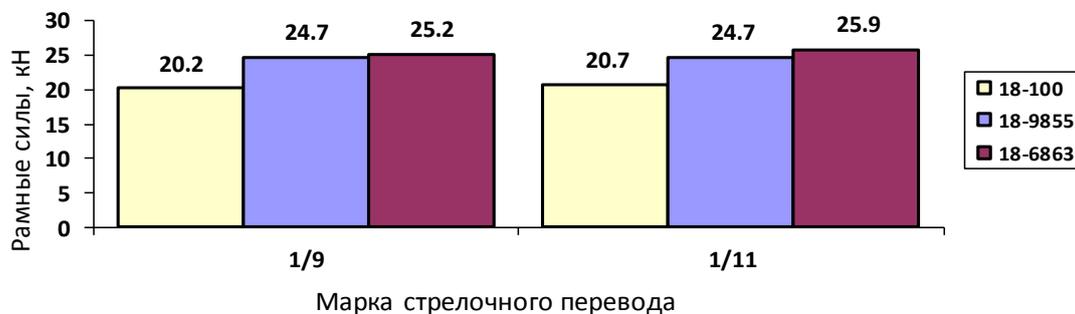


Рис. 13. Сравнение рамных сил при движении в стрелочных переводах

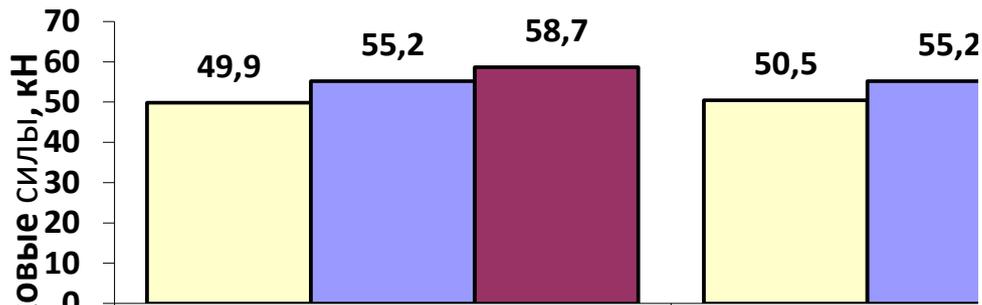


Рис. 14. Сравнение боковых сил при движении в стрелочных переводах

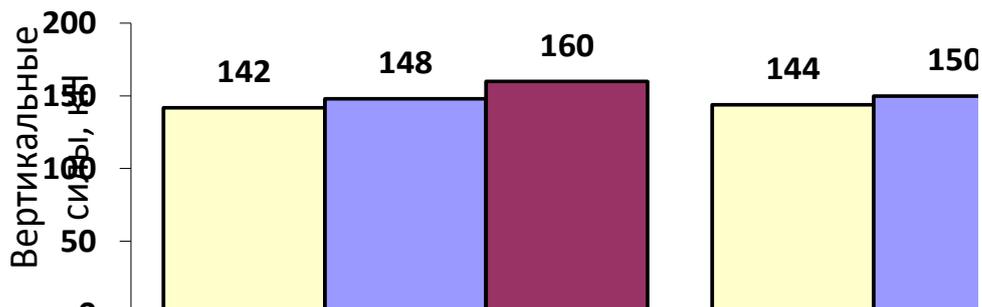


Рис. 15. Сравнение вертикальных сил при движении в стрелочных переводах

Представленные результаты сравнительных исследований движения вагонов с различными типами тележек по стрелочным переводам позволяют сделать следующий вывод. Вагон на тележках 18-100 оказывает существенно меньшее силовое воздействие на путь при прохождении стрелочных переводов (оцениваемое равными силами, боковыми силами отжатия рельсов, вертикальными силами от колес на рельсы), чем вагоны на тележках типов 18-9855 и 18-6863.

Особенности движения вагона на тележках 18-100 с высокими скоростями.

Моделирование показало склонность к потере устойчивости груженого вагона на тележках 18-100 со среднеизношенным профилем колес при скоростях движения выше 80 км/ч. На рис. 16 приведен характерный график зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) поперечных смещений колеса относительно рельса от скорости движения в прямой. Из графика видно, что мощность процесса боковых колебаний начинает интенсивно нарастать при скоростях свыше 80 км/ч.

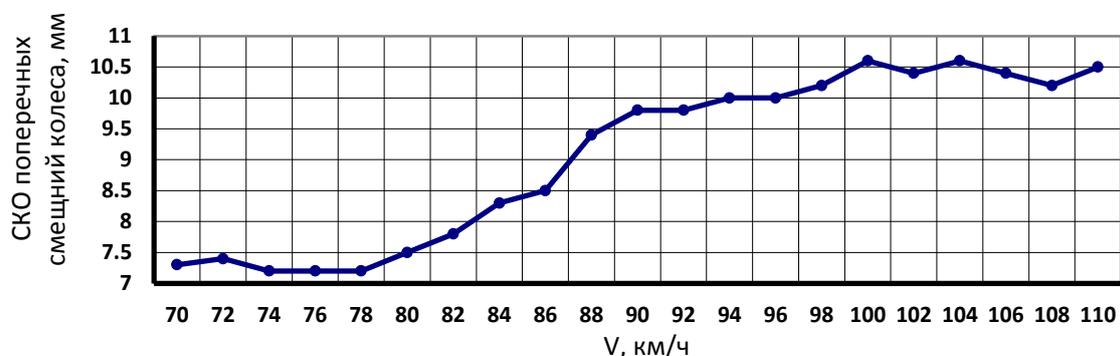


Рис. 16. СКО поперечных колебаний первой колесной пары в зависимости от скорости движения

Характерные осциллограммы рамных сил для скорости 80 км/ч (до потери устойчивости), 86 км/ч (устойчивость те-

ряется на некоторых участках пути) и 100 км/ч (полная потеря устойчивости) в одном масштабе показаны на рис. 17.

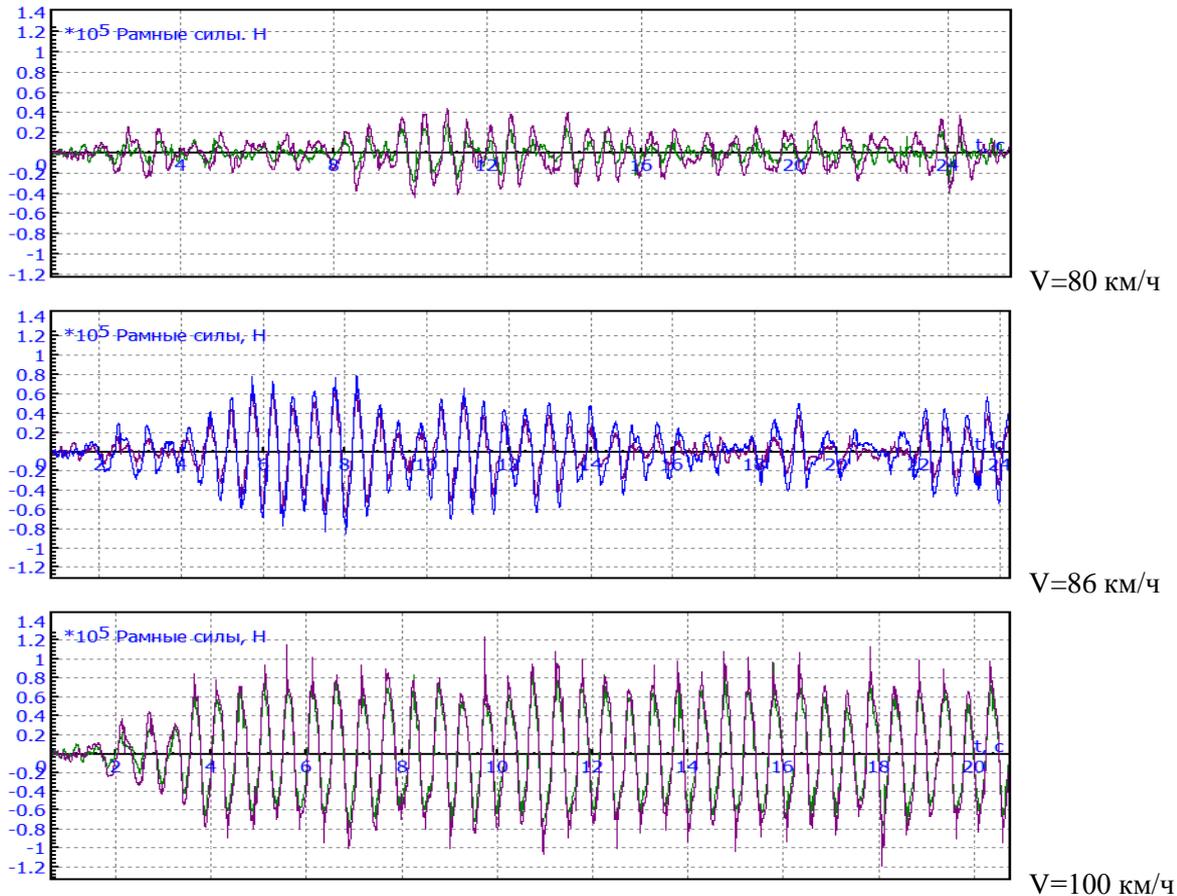


Рис. 17. Развитие неустойчивости вагона на тележках 18-100 при повышении скорости

Для оценки влияния износа профиля колес и величины неровностей пути были выполнены исследования вагонов с сильно изношенными профилями колес (рис. 5б) при движении по пути с неровностями, соответствующими пути удовлетворительного и хорошего содержания. Результаты этих исследований для скорости движения 100 км/ч показали, что при движении вагона на тележках типа 18-100 по пути с

удовлетворительным содержанием с сильно изношенными профилями колес возможно нарушение норм по боковому воздействию на путь (в данном случае - по рамным силам, равным 102 кН, при допустимых значениях для типовой конструкции пути $0,4P_{ст} = 92,2$ кН [12]). На пути хорошего содержания этого не наблюдается.

Заключение

Вагон на тележках типа 18-100 с осевой нагрузкой 23,5 тс в среднем оказывает меньшее силовое воздействие на путь и имеет меньшее удельное сопротивление движению, вызванное фрикционным взаимодействием в контактах «колесо - рельс», чем инновационные вагоны на тележках типов 18-9855 и 18-6863 с осевыми нагрузками 25 и 27 тс соответственно. Это пре-

имущество реализуется при движении по прямым и кривым участкам пути, а также стрелочным переводам.

Преимущества инновационных вагонов проявляются на скоростях движения свыше 80 км/ч при движении в прямых участках пути и пологих кривых.

Приведенные оценки основаны на предположении об отсутствии режимов

движения груженных вагонов на тележках типа 18-100 со скоростями свыше 100 км/ч

(вариант 1) и свыше 80 км/ч (вариант 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт «Универсальный механизм». – Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com>.
2. Pogorelov, D.Yu. Simulation of rail vehicle dynamics with Universal Mechanism software / D.Yu. Pogorelov; A. Sladkowski (ed.) // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems. – Gliwice, 2005. – P. 13-58.
3. Коссов, В.С. Оценка воздействия на путь грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5 и 25 тс / В.С. Коссов, А.А. Лунин, О.Г. Краснов, А.В. Спиоров // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 63-68.
4. Дмитриев, С.В. О втором этапе подконтрольной эксплуатации инфраструктуры участка Качканар – Смычка под полувагонами с осевой нагрузкой 27 тс / С.В. Дмитриев, В.С. Лесничий, Р.А. Савушкин [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2018. – Т. 53. – № 1. – С. 27-29.
5. Лосев, Д.Н. Результаты эксплуатации тихвинских вагонов за пять лет / Д.Н. Лосев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 18-19.
6. Результаты поездных испытаний тележки 18-9855. – Режим доступа: <http://www.tt-center.ru/about-company/vnictt-publishing/rezultatyi-poezdnyix-ispytanij-telezhki-18-9855.html>.
7. Гусев, А.В. Особенности конструкции и расчета рессорного подвешивания перспективных тележек грузовых вагонов / А.В. Гусев. – Режим до-

ступа:

http://opzt.ru/sites/default/files/files/zhiznennyi_cikl_pruzhin_podvizhnogo_sostva_zhelezнодорожного_transporta._sovremennye_metody_povysheniya_ekspluatacionnogo_sroka.pdf.

8. Орлова, А.М. Совершенствование рессорного подвешивания грузовых вагонов для повышения осевых нагрузок / А.М. Орлова, Е.А.Рудакова, А.В. Гусев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: ЦТТ, 2017.
9. Щербаков, Е.А. Конструкция и результаты испытаний тележки модели 18-6863 с осевой нагрузкой 27тс / Е.А. Щербаков, В.С. Бабанин, И.В. Турутин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: ЦТТ, 2017.
10. Kovalev, R. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis / R. Kovalev, N. Lysikov, G. Mikheev [et al.] // Multibody Syst. Dyn. – 2009. – V. 22. – P. 399-423.
11. Vollebregt & Kalker's rolling and sliding contact model. – Режим доступа: <https://www.kalkersoftware.org/>.
12. ГОСТ Р 55050–2012. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013.

1. Site “Universal Mechanism”. – Access mode: <http://www.universalmechanism.com>.
2. Pogorelov, D.Yu. Simulation of rail vehicle dynamics with Universal Mechanism software / D.Yu. Pogorelov; A. Sladkowski (ed.) // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems. – Gliwice, 2005. – P. 13-58.
3. Kossov, V.S. Assessment of freight cars impact with axial loads of 23.5 and 25 TF upon track / V.S. Kossov, A.A. Lunin, O.G. Krasnov, A.V. Spirov // Railway Transport. – 2018. – No.3. – pp. 63-68.
4. Dmitriev, S.V. On the second of controlled operation of the section infrastructure of Kachkanar-Smychka under gondola cars with axial load of 27 TF / S.V. Dmitriev, V.S. Lesnichy, R.A. Savushkin [et al.] // Cars and Car Parks. – 2018. – Vol. 53. – No.1. – pp. 27-29.
5. Losev, D.N. Operation results of Tikhvin cars during five years / D.N. Losev // Cars and Car Park. – 2017. – No.3. – pp. 18-19.
6. Results of Track Tests of Bogie 18-9855. – Access mode: <http://www.tt-center.ru/about-company/vnictt-publishing/rezultatyi-poezdnyix-ispytanij-telezhki-18-9855.html>.
7. Gusev, A.V. Peculiarities in Design and Computation of Promising Bogies Spring Suspension for Freight Cars / A.V. Gusev. – Access mode:

http://opzt.ru/sites/default/files/files/zhiznennyi_cikl_pruzhin_podvizhnogo_sostva_zhelezнодорожного_transporta._sovremennye_metody_povysheniya_ekspluatacionnogo_sroka.pdf.

8. Orlova, A.M. Spring suspension improvement for freight cars to increase axial loads / A.M. Orlova, E.A. Rudakova, A.V. Gusev // Rolling Stock of the XXI-st Century: Ideas, Requirements, Projects: Proceedings of the XII-th Inter. Scientific-Tech. Conf. – S-Pb.: CTT, 2017.
9. Shcherbakov, E.A. Design and test results of bogie of 18-6863 model with axial load of 27 TF / E.A. Shcherbakov, V.S. Babanin, I.V. Turutin // Rolling-Stock of the XXI-st Century: Ideas, Requirements, Projects: Proceedings of the XII-th Inter. Scientific-Tech. Conf. – S-Pb.: CTT, 2017.
10. Kovalev, R. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis / R. Kovalev, N. Lysikov, G. Mikheev [et al.] // Multibody Syst. Dyn. – 2009. – V. 22. – P. 399-423.
11. Vollebregt & Kalker's rolling and sliding contact model. – Режим доступа: <https://www.kalkersoftware.org/>.

12. RSS R 55050-2012. *Standards for Permissible Impact upon Track and Test Methods*. – М.: Standard-

Inform, 2013.

Статья поступила в редакцию 5.09.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Сакало В.И.

Статья принята к публикации 25.12.18.

Сведения об авторах:

Гончаров Сергей Евгеньевич, к.э.н., зам. ген. директора по техническому развитию, гл. инженер АО «Первая грузовая компания», e-mail: GoncharovSE@pgkweb.ru.

Погорелов Дмитрий Юрьевич, д.физ.-мат.н., профессор, науч. руководитель лаборатории «Вычислительная механика» Брянского государствен-

Goncharov Sergey Evgenievich, Can. Sc. Econ., Deputy Director for Engineering Development, Chief Engineer of PC “First Freight Company”, e-mail: GoncharovSE@pgkweb.ru.

Pogorelov Dmitry Yurievich, Dr. Sc. Phys.-Math., Prof., Scientific Adviser of the Lab. “Computer Me-

ного технического университета, e-mail: pogorelov@umlab.ru.

Симонов Виталий Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: simonov@umlab.ru.

chanics”, Bryansk State Technical University, e-mail: pogorelov@umlab.ru.

Simonov Vitaly Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Bryansk State Technical University, e-mail: [si-monov@umlab.ru](mailto:simonov@umlab.ru).