

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 625.031.1

Оптимизация эксплуатационных расходов за счет улучшения условий взаимодействия подвижного состава и пути по параметру эквивалентной конусности

Л. С. Блажко, В. П. Бельтюков, А. А. Киселев, А. В. Романов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Блажко Л. С., Бельтюков В. П., Киселев А. А., Романов А. В. Оптимизация эксплуатационных расходов за счет улучшения условий взаимодействия подвижного состава и пути по параметру эквивалентной конусности // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 64–74. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-64-74

Аннотация

Цель: Расчет экономического эффекта от внедрения параметра эквивалентной конусности колесных пар за счет снижения эксплуатационных расходов на движение высокоскоростных поездов и на содержание путевого хозяйства. **Методы:** В исследовании использованы методы компьютерного моделирования взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, методы математической статистики, методика выполнения тяговых расчетов в автоматизированной системе. **Результаты:** Предложены меры по снижению сил сопротивления движению высокоскоростного подвижного состава. Рассчитан экономический эффект от внедрения параметров эквивалентной конусности колесных пар на высокоскоростных магистралях Российской Федерации. **Практическая значимость:** Предложены рекомендации по учету параметров эквивалентной конусности колесной пары для снижения сил сопротивления движению и рекомендации по проведению мобильной обработки рельсов на участках высокоскоростного движения поездов.

Ключевые слова: Силы сопротивления движению, эквивалентная конусность колесной пары, тяговые расчеты, высокоскоростной подвижной состав, эксплуатационные расходы.

Введение

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации предполагает применение новых технологий, на основе которых создается единая сеть высокоскоростного железнодорожного транспорта. Были сделаны шаги для строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали между Москвой

и Казанью, Москвой и Санкт-Петербургом со скоростью движения до 400 км/ч. Стоит отметить, что к настоящему времени отсутствуют утвержденные решения по конструкции высокоскоростного электроподвижного состава, имеются сложности в выборе конструкции верхнего строения железнодорожного пути, в установлении нормативов содержания рельсовой колеи. Дополнительные сложности вызывает отсутствие опыта эксплуатации высокоскоростных магистралей со скоростями движения свыше 250 км/ч на железнодорожном пути с рельсовой колеей 1520 мм.

Действующий Технический регламент на строительство высокоскоростных линий предъявляет жесткие требования конструкции железнодорожного пути. Они должны быть малодеформируемыми и упруго перерабатывать нагрузку от подвижного состава. Этим требованиям соответствует безбалластное верхнее строение пути. Такая конструкция обеспечивает стабильное положение рельсовой колеи, что несомненно влияет на плавность хода высокоскоростного подвижного состава.

В конструкции подвижного состава должны быть предусмотрены дополнительные гасители колебаний для предотвращения интенсивных колебаний [1].

Не вызывает сомнения, что для плавного хода высокоскоростного подвижного состава необходимо учитывать параметр эквивалентной конусности колесной пары [2]. Однако, к сожалению, нормами содержания рельсовой колеи в Российской Федерации этот параметр до сих пор не учитывается.

Настоящее исследование посвящено оценке эффекта от оптимизации параметра эквивалентной конусности на действующей высокоскоростной железнодорожной линии Санкт-Петербург — Москва за счет изменения радиуса поверхности катания головки рельса.

Из-за конического профиля колес железнодорожного подвижного состава и наличия допусков на их установку, а также допусков содержания рельсовой колеи колесная пара совершает извилистое движение [3]. Геометрические характеристики контактирующих поверхностей, в том числе профили колес подвижного состава и поверхности катания головки рельсов, допуски на нормы содержания ширины колеи, величина зазора между гребнем колеса и рабочей гранью головки рельса влияют на плавность хода колесной пары.

Мировая практика эксплуатации железных дорог показывает, что контроль эквивалентной конусности позволяет не только уменьшить величину бокового воздействия от подвижного состава на путь, уменьшить износ в системе колесо — рельс [4], но и снизить силы основного удельного сопротивления движению поезда [5].

Правильная установка колесной пары в рельсовой колее позволяет обеспечить оптимальный контакт между колесом и рельсом в зоне, близкой к оси симметрии рельса, что значительно уменьшает уровень контактных напряжений и в итоге влияет на общий ресурс надежной работы как рельсов, так и всей конструкции железнодорожного пути в целом [6, 7].

Как было отмечено выше, извилистое движение колесной пары приводит к тому, что ось симметрии колесной пары отклоняется от оси пути и колеса колесной пары катятся по различным радиусам (дискам вращения). Различие радиусов дисков вращения совместно с жесткой насадкой колес колесной пары приводит к появлению проскальзывания одного из колес. Таким образом, по пятну контакта появляются дополнительные силы крива. На поверхность катания головки рельса по пятну контакта передаются существенные касательные напряжения из-за наличия сил трения, что, в свою очередь, увеличивает риски зарождения дефектов контактно-усталостного характера и повышает сопротивление движению поезда [8].

Материалы и методы

Рассмотрим влияние извилистого движения колесной пары на формирование сил сопротивления движению поезда. В расчетах обычно учитывают два вида сил трения: силу трения качения и силу трения скольжения.

Механизм формирования силы трения качения в соответствии с общепринятой методикой заключается в том, что во время движения колеса по поверхности катания головки рельса на его поверхности появляется упругая деформация металла (на рис. 1 обозначена A). Вследствие этого возникают дополнительные энергетические затраты на преодоление этой деформации. Величина силы трения скольжения зависит от квадрата скорости движения и суммарного зазора между гребнем колеса и рабочей гранью рельса.

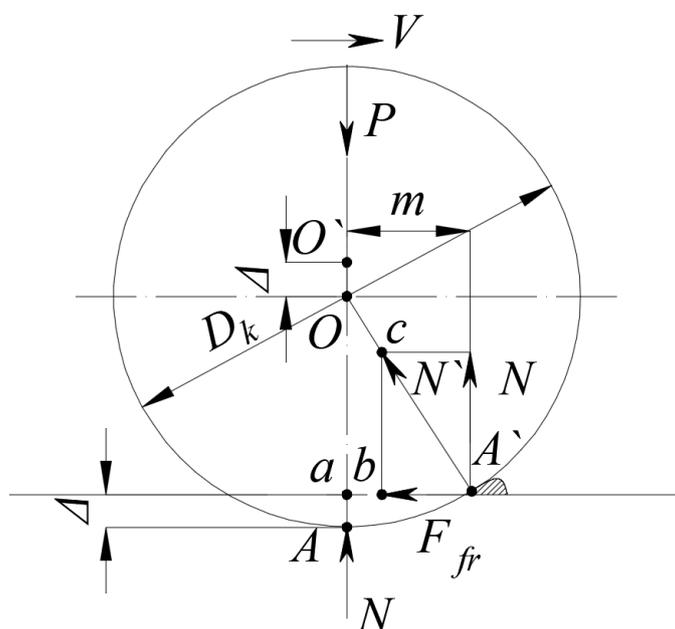


Рис. 1. Схема формирования сил трения качения

В исследовании [2] выявлена зависимость сил трения от эквивалентной конусности колесной пары и, следовательно, сил сопротивления движению.

Однако стоит иметь в виду то, что расчеты по эмпирической формуле для определения сил трения скольжения по общепринятой методике дают неточные результаты. В исследовании [9] была выявлена значительная разница энергозатрат между результатами расчета по предлагаемой авторами методике и результатами расчета по эмпирическим формулам.

В представленном исследовании выполнено математическое моделирование движения высокоскоростного подвижного состава с вертикальными и горизонтальными неровностями рельсовой колеи с целью оценки их влияния на силы основного сопротивления движению.

Для расчета сил сопротивления использовался алгоритм FASTSIM. Расчеты были выполнены для скоростей движения 220, 250 и 280 км/ч для конструкции железнодорожного пути с рельсами типа Р65 стандартного профиля по ГОСТ Р 51685—2013 с радиусом поверхности катания головки 500 мм и с рельсами Р65 300 ремонтного профиля с радиусом поверхности катания головки 300 мм. Величина неровностей рельсовой колеи задавалась зазором между внутренней гранью головки рельсов и гребнем колеса Δu от 0 до 8 мм.

Результаты

Результаты расчета мощности сил сопротивления движению P_f при изменении величины зазора между внутренней гранью головки рельсов и гребнем колеса Δu представлены на рис. 2. На рис. 3 заявлена зависимость работы сил сопротивления движению от времени действия сил.

В результате исследования получены зависимости для вычисления основного удельного сопротивления движению высокоскоростного железнодорожного подвижного состава Velaro RUS (Сапсан) для конструкции железнодорожного пути с радиусом поверхности катания головки 300 мм. Графики зависимостей представлены на рис. 4.

В исследовании выполнен расчет экономической эффективности введения мероприятий, связанных с оптимизацией параметров эквивалентной конусности на I главном пути действующей железнодорожной линии Санкт-Петербург — Москва за счет изменения профиля головки рельса.

Эффект достигается за счет снижения расхода электроэнергии на тягу поездов вследствие уменьшения сил основного удельного сопротивления движению.

По выявленным зависимостям основного удельного сопротивления движению ЭВС Velaro Rus (Сапсан) выполнены тяговые расчеты с помощью автоматизированного программного комплекса ИСКРА ПТР в соответствии с Правилами тяговых расчетов.

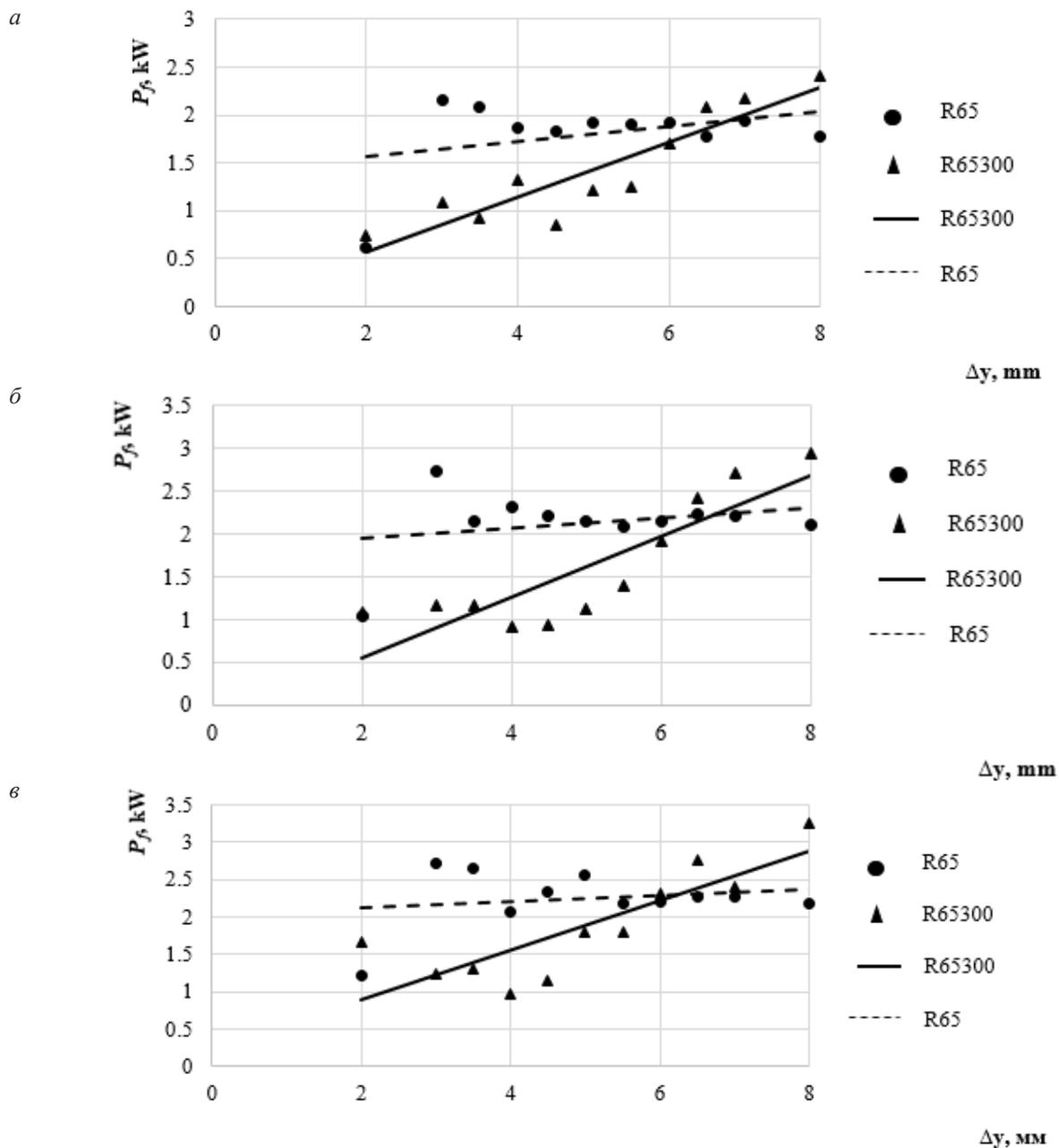


Рис. 2. Зависимость мощности сил сопротивления движению от зазора между гребнем колеса и рабочей гранью рельса при скорости движения подвижного состава: а — 220 км/ч; б — 250 км/ч; в — 280 км/ч

Параметры трассы были приняты для I главного пути линии Москва — Санкт-Петербург. Тяговые расчеты выполнены для установленных на направлении скоростей движения поездов до 250 км/ч.

Расчеты выполнены в двух вариантах. Первый вариант тяговых расчетов выполнен для конструкции железнодорожного пути с рельсами R65 с радиусом поверхности катания головки 500 мм.

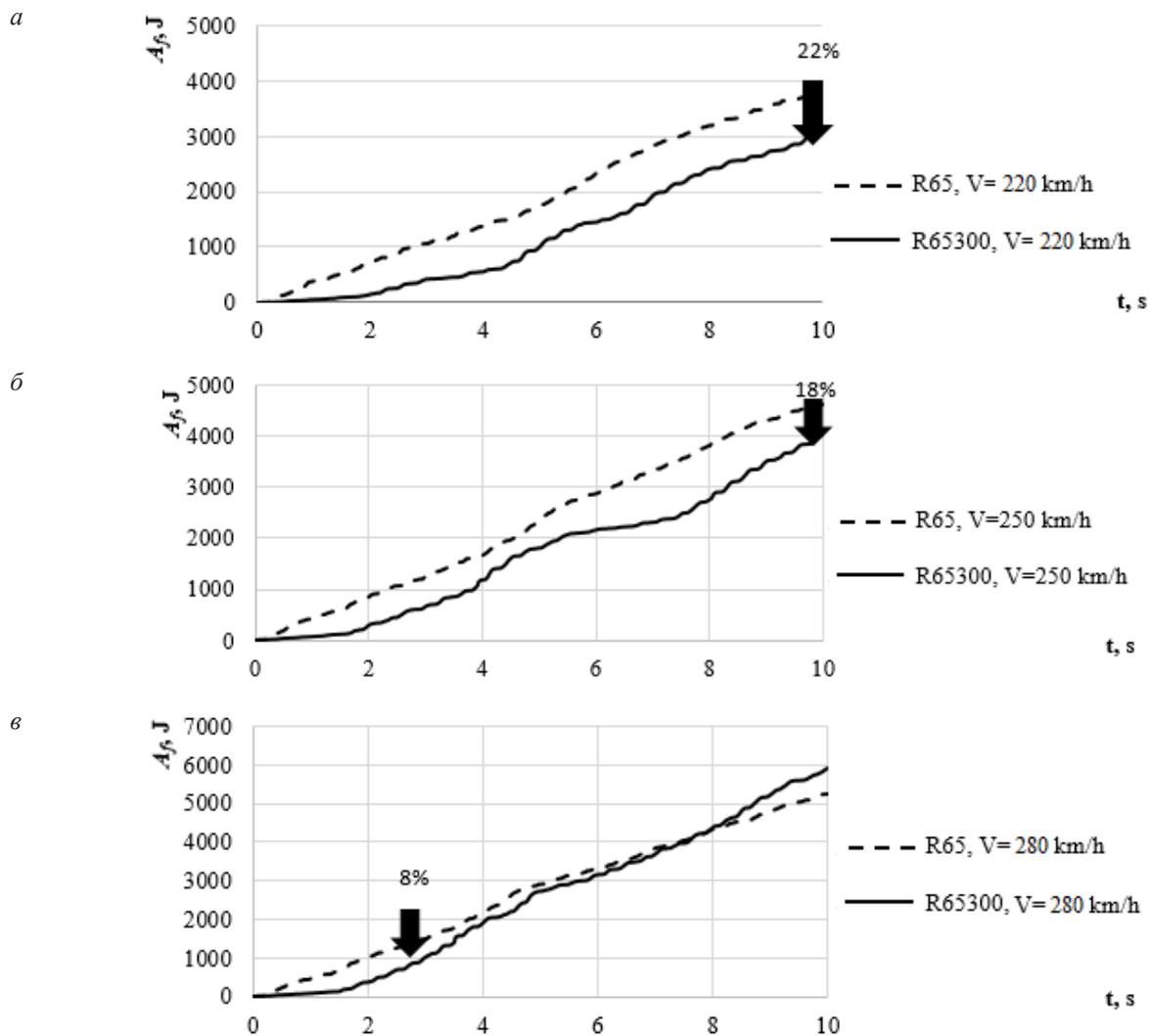


Рис. 3. Работа сил сопротивления движению подвижного состава при скорости:
a — 220 км/ч; *б* — 250 км/ч; *в* — 280 км/ч

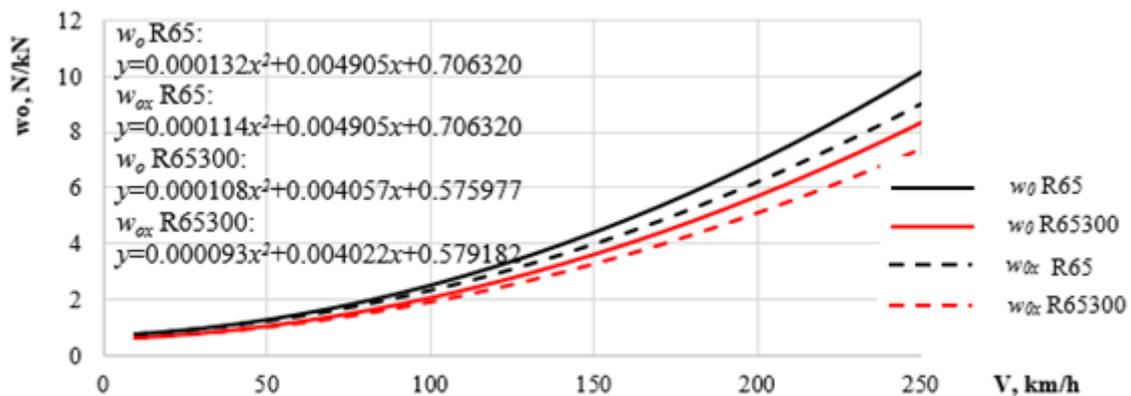


Рис. 4. Зависимости основного удельного сопротивления движению ЭВС Velaro RUS (Сапсан) на железнодорожном пути с рельсами типа Р65 с радиусом поверхности катания головки 500 мм (черные графики) и 300 мм (красные графики)

Результаты тяговых расчетов

Показатель	Значение показателя при скорости движения по вариантам			
	220 км/ч		250 км/ч	
	1 вариант	2 вариант	1 вариант	2 вариант
Суммарное время в режиме тяги, мин	82,3	71,2	102,5	88,9
Суммарное время в режиме холостого хода, мин	99,5	110,3	59,3	72,3
Суммарное время в режиме торможения, мин	8,6	8,9	10,9	11,3
Расход электроэнергии, кВт-ч	14 600,1	12 609,5	18 177,8	15 749,7
Расходы на пробег поезда, руб.	44 968	38 837	55 987	48 509

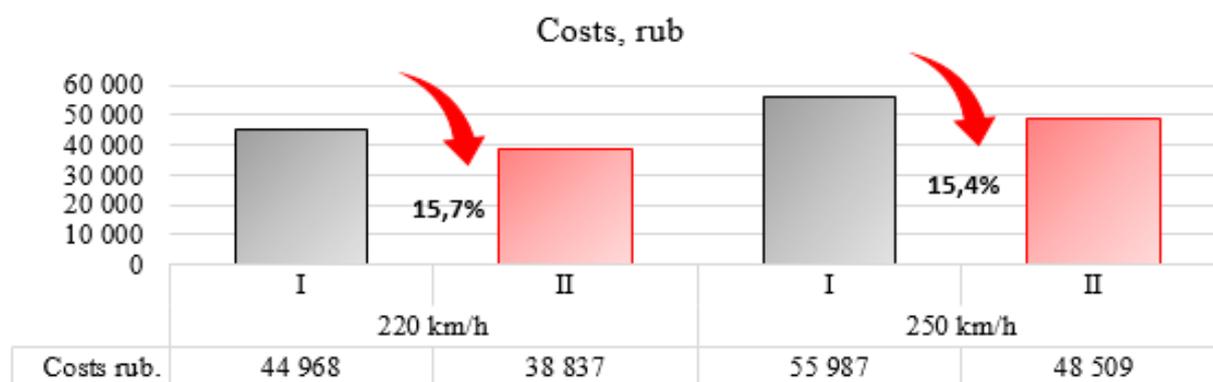


Рис. 5. Экономия расходов по пробегу одного поезда «Сапсан»

Второй вариант тяговых расчетов выполнен для железнодорожного пути с ремонтным профилем Р65 с радиусом поверхности катания головки 300 мм в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 4.

Результаты тяговых расчетов по двум вариантам сведены в таблицу. На рис. 5 представлен экономический эффект от внедрения параметров эквивалентной конусности колесных пар на железных дорогах Российской Федерации.

Анализ результатов

Результаты настоящего исследования показывают следующее:

1. Радиус поверхности катания головки рельса значительным образом влияет на характер зависимости мощности сил сопротивления движению от величины зазора между гребнем колеса и рабочей гранью рельса. С увеличением зазора Δu наблюдается существенный рост мощности сил сопротивления движению P_f для рельсов с ремонтным профилем Р65 с радиусом по поверхности катания головки 300 мм. В то время как для варианта расчета с рельсами типа Р65 влияние зазора на мощность сил сопротивления движению незначительное.

2. С увеличением скорости движения поездов наблюдается рост значений рассчитанной мощности сил сопротивления движению P_f .

3. При небольших значениях Δu (до 6 мм) наблюдается существенное снижение рассчитанной величины мощности сил сопротивления движению P_f для конструкции пути с ремонтным профилем Р65 300, по сравнению со стандартным профилем Р65 с радиусом поверхности катания головки 500 мм. При больших значениях величины Δu очевидно, что радиус поверхности катания головки не имеет существенного влияния на величину P_f .

4. Работа сил сопротивлению движению (рис. 3) существенно снижается при использовании рельсов Р65 с ремонтным профилем для скоростей движения до 250 км/ч. При скорости движения 280 км/ч эффект снижения менее выражен.

5. Установлено, что при использовании рельсов типа Р65 с радиусом поверхности катания головки 300 мм на высокоскоростных магистралях возможно добиться снижения сил сопротивления движению на 20 %.

Таким образом, приведение параметров эквивалентной конусности к эффективным значениям за счет использования рельсов с радиусом поверхности катания головки 300 мм имеет следующие положительные эффекты:

- сокращено суммарное время движения в режиме тяги на 15 % за счет увеличения времени в режиме холостого хода и торможения;
- сокращен расход на электроэнергию, необходимую для пробега одного поезда в направлении от Санкт-Петербурга до Москвы, более чем на 15 %
- выявлена возможная экономия эксплуатационных расходов за счет сокращения стоимости электроэнергии.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено существенное влияние радиуса поверхности головки рельса на плавность движения поездов при высоких скоростях движения. Выявлено, что приведение очертания поверхности катания головки рельса типа Р65 к более выпуклой форме радиусом 300 мм позволяет существенно улучшить условия взаимодействия подвижного состава и пути. При этом зафиксировано снижение сил сопротивления движению на 20 %.

В результате исследования предложены зависимости величины основного удельного сопротивления движению высокоскоростного электроподвижного состава Velaro RUS (Сапсан) для выполнения тяговых расчетов.

Выполненные в результате исследования варианты тяговых расчетов позволили спрогнозировать сокращение расходов на тягу поездов до 15 % в результате применения рельсов с радиусом поверхности катания головки 300 мм.

Таким образом, учет мирового опыта высокоскоростного движения поездов в части оптимизации параметра эквивалентной конусности колесной пары позволяет не только повысить плавность хода высокоскоростного подвижного состава и улучшить показатели надежности эксплуатации высокоскоростных железнодорожных линий, но и имеет положительный экономический эффект.

Библиографический список

1. Tianhe J. Theoretical and experimental investigation of a stiffness-controllable suspension for railway vehicles to avoid resonance / J. Tianhe, L. Zhiming, S. Shuaishuai, R. Zunsong // *International Journal of Mechanical Sciences*. — Vol. 187. — 1 December 2020. — P. 105901
2. Киселев А. А. Влияние эквивалентной конусности колесных пар на напряженно-деформированное состояние рельсов: дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Киселев. — СПб., 2020.
3. Muñoz S. Multibody model of railway vehicles with weakly coupled vertical and lateral dynamics / S. Muñoz, J. F. Aceituno, P. Urda, J. L. Escalona // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — Vol. 115. — 15 January 2019. — Pp. 570–592.
4. Trilla A. Determining the equivalent conicity for railway wheelset maintenance with deep ensembles / A. Trilla, X. Cabré // *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM: 10, Philadelphia, PA*. — Philadelphia, PA, 2018.
5. Mikhailov E. Research of possibilities of reducing the driving resistance of a railway vehicle by means of the wheel construction improvement / E. Mikhailov, S. Semenov, J. Dižo, K. Kravchenko // *Transportation Research Procedia*. — 2019. — Vol. 40. — Pp. 831–838.
6. Vorobev A. A. A study of the contact of the wheel with the rail for various conditions of freight car / A. A. Vorobev, O. A. Konogray, A. A. Krutko, I. I. Malakhov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1441(1). — Article № 012127.
7. Shiler V. V. Peculiarities of Clutch Forming Rails and Wheel Block Construction / V. V. Shiler, I. I. Galiev, A. V. Shiler // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*. — Tomsk, 4–6 december 2017. — Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. — P. 042117. — DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042117.
8. Ushkalov V. F. Solution of some direct and inverse problems of railway vehicle dynamics / V. F. Ushkalov // *Vehicle System Dynamics*. — 1992. — Vol. 20. — No Suppl. 1. — Pp. 638–652. — DOI 10.1080/00423119208969428.
9. Boronenko Y. P. Energy efficiency of freight wagons and influence of their oscillations on rolling resistance / Y. P. Boronenko, A. N. Komarova, Y. S. Romen // *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks — Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics*. — IAVSD 2015. — Pp. 1491–1498.

Дата поступления: 05.04.2022

Решение о публикации: 01.05.2022

Контактная информация:

БЛАЖКО Людмила Сергеевна — д-р техн. наук, проф.; blazhko@pgups.ru

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, проф.; beltukov@pgups.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, ассистент; zhdp10@gmail.com

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; andrey.romanov@mail.ru

Optimization of Operating Cost at the Expense of Improving the Conditions of a Rolling Stock Interaction With a Railway Track by Equivalent Taper Parameter

L. S. Blazhko, V. P. Beltukov, A. A. Kiselev, A. V. Romanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Blazhko L. S., Beltukov V. P., Kiselev A. A., Romanov A. V. Optimization of Operating Cost at the Expense of Improving the Conditions of a Rolling Stock Interaction With a Railway Track by Equivalent Taper Parameter. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, pp. 64–74. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-64-74

Summary

Purpose: Calculation of an economic effect by introducing the parameter of equivalent taper of wheel pairs on account of reduction of operating costs on high-speed train motion and track facility maintenance.

Methods: The study used the methods of computer simulation of interaction between a rolling stock and a railway track, methods of mathematical statistics, methodology to make traction calculations in automated system. **Results:** Measures have been proposed to reduce the forces of a drag for a high-speed rolling stock motion. We've calculated an economic effect from introduction of wheel pair equivalent taper parameter on Russian Federation high-speed railroads. **Practical importance:** Recommendations have been proposed on consideration of wheel pair equivalent taper parameter for to reduce the forces of drag to the motion and on pursuing rail mobile treatment on the sections of high-speed train traffic sections.

Keywords: Drag forces, wheel pair equivalent pair, traction calculations, high-speed rolling stock, operating costs.

References

1. Tianhe Jin, Zhiming Liu, Shuaishuai Sun, Zunsong Ren, Lei Deng, Donghong Ning, Haiping Du, Weihua Li. Theoretical and experimental investigation of a stiffness-controllable suspension for railway vehicles to avoid resonance. *International Journal of Mechanical Sciences*, December 1, 2020, vol. 187, 105901

2. Kiselev A. A. *Vliyanie ekvivalentnoy konusnosti kolesnykh par na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie rel'sov. Kand. Diss* [Influence of the equivalent taper of wheel sets on the stress-strain state of the rails. Cand. Diss]. St. Petersburg 2020. (In Russian)

3. Sergio Muñoz, Javier F. Aceituno, Pedro Urda, José L. Escalona. Multibody model of railway vehicles with weakly coupled vertical and lateral dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. January 15, 2019, vol. 115, pp. 570–592.

4. Trilla A., Cabré X. Determining the equivalent conicity for railway wheelset maintenance with deep ensembles. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM: 10, Philadelphia, PA, September 24–27, 2018*.

5. Evgeny Mikhailov, Stanislav Semenov, Ján Dižo, Kateryna Kravchenko. Research of possibilities of reducing the driving resistance of a railway vehicle by means of the wheel construction improvement. *Transportation Research Procedia*. 2019, vol. 40, pp. 831–838.

6. Vorobev A. A., Konogray O. A., Krutko A. A., Malakhov I. I. A study of the contact of the wheel with the rail for various conditions of freight car. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, I. 1441 (1), art. 012127.

7. Shiler V. V., Galiev I. I., Shiler A. V. Peculiarities of Clutch Forming Rails and Wheel Block Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, December 04–06, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018, pp. 042–117. DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042117*.

8. Ushkalov V. F. Solution of some direct and inverse problems of railway vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*. 1992, vol. 20, I. 1, pp. 638–652. DOI 10.1080/00423119208969428.

9. Boronenko Y. P., Komarova A. N., Romen Y. S. Energy efficiency of freight wagons and influence of their oscillations on rolling resistance. *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks — Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics, IAVSD 2015, pp. 1491–1498*.

Received: April 05, 2022

Accepted: May 01, 2022

Author's information:

Lyudmila S. BLAZHKO — D. Sci. in Engineering, Professor; blazhko@pgups.ru

Vladimir P. BELTUKOV — D. Sci. in Engineering, Professor; beltukov@pgups.ru

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Assistant; zhdp10@gmail.com

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Assistant Professor; andrey.romanov@mail.ru