

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.015:625.03(045)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-297-313>

EDN: <https://elibrary.ru/hrutlq>



Результаты исследований силового воздействия колес полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс на рельсы в кривых участках пути

А. Ю. Луговский¹, О. К. Богданов²✉

¹Фирма ТВЕМА,
Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт
подвижного состава (ВНИКТИ),
Коломна, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Внедрение подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками делает вопрос оценки силового воздействия колес на железнодорожный путь более острым и актуальным. В специальной литературе описывается достаточно много методов измерений боковых сил и бокового износа с различной степенью точности. Однако вопрос о том, как правильно расположить измерительные устройства по длине круговой части кривой, на каком расстоянии друг от друга, с какой частотой производить измерения силовых параметров в течение срока эксплуатации данных рельсовых нитей, остается открытым. В статье рассмотрены вопросы воздействия колес полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс на нагруженность и изнашивание рельсовых нитей в кривых разного радиуса.

Материалы и методы. Для анализа и детализации суммарных нагрузок от каждого колеса вагонов на рельсовые нити на втором главном пути Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры (на спуске) были выбраны две кривые ($R298$ и $R565$ м) с почти одинаковыми уклонами и сопоставимыми параметрами эксплуатации. Были выполнены испытания по измерению нагрузки на рельсы на двух опытных участках пути, а также проведены измерительные проезды диагностического комплекса инфраструктуры «Спринтер-Интеграл» (АО «Фирма ТВЕМА») по опытным кривым.

Результаты. Обработке и анализу подлежали данные, полученные для полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс (245, 3 кН). Установлено, что из всех колес, прошедших по участку в кривой $R298$ м, 58 % действуют на внутренний рельс с направлением наружу рельсовой колеи и 42 % — внутрь. На внутренний рельс действует средняя боковая сила 37,9 кН, направленная наружу, и 30,9 кН, направленная внутрь. Аналогичные данные были получены и для кривой $R565$ м. Сопоставление эпюр бокового износа и боковых сил, полученных для обеих кривых, показало синхронность их изменений.

Обсуждение и заключение. Для более полного анализа результатов воздействия колес на рельсы необходимо оценивать воздействие боковых сил, что особенно важно для кривых участков пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наружный и внутренний рельсы, радиус кривой, боковые и вертикальные силы, набегающее колесо, износ, эпюра

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Луговский А. Ю., Богданов О. К. Результаты исследований силового воздействия колес полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс на рельсы в кривых участках пути // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 4. С. 297–313. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-297-313>.

✉ bogdanov-ok@vnikti.com (О. К. Богданов)

© Луговский А. Ю., Богданов О. К., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.015:625.03(045)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-297-313>

EDN: <https://elibrary.ru/hrutlq>



Results of exploring the force impact of 25 tf open-box cars on the rails of curved tracks

Alexey Yu. Lugovsky¹, Oleg K. Bogdanov²✉

¹Firma TVEMA,

Moscow, Russian Federation

²Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock,

Kolomna, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Onboarding rolling stock that exerts increased axial loads makes assessing wheels force impact on railway tracks more acute and relevant. Specialist literature describes many techniques for measuring lateral forces and lateral wear with varying degrees of accuracy. However, the questions of the correct position of measuring devices along the circular segments of a curve, spacing and frequency of measuring force parameters during the service life of the track rails are still open. The article discusses the impact of 25 tf open-box cars on the load and wear of the trackways in curves that have different radii.

Materials and methods. In order to analyse and detail the total load exerted by each car wheel on track rails on the second main track of the Slyudyanskaya Division, East Siberian Infrastructure Directorate (descending segment), the authors selected two ($R298$ and $R565$ m) curved segments with almost identical slopes and comparable operating parameters. Tests were carried out to measure the load exerted on the rails along two trial segments of the track and also measurement trips of Sprinter-Integral, an infrastructure diagnostic complex (by Firma TVEMA JSC), were made along the trial curve.

Results. The researchers processed and analysed the data obtained for open-box cars with an axial load of 25 tf (245.3 kN). It has been established that of all the wheels that passed along the $R298$ m curve, 58% impacted the inner rail in an outward direction from the rail track with 42% having an inward impact. The inner rail is exposed to an average lateral force of 37.9 kN directed outward and 30.9 kN directed inward. Similar data is obtained for the $R565$ m curve. A comparison of the diagrams of lateral wear and lateral forces obtained for both curves showed that changes in them occurred synchronically.

Discussion and conclusion. In order to comprehensively analyse wheels impact, it is necessary to assess the impact from lateral forces which is especially important for curved track.

KEYWORDS: outer and inner rail, curve radius, lateral and vertical forces, moving wheel, wear, diagram

FOR CITATION: Lugovsky A. Yu., Bogdanov O. K. Results of exploring the force impact of 25 tf open-box cars on the rails of curved tracks. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(4):297-313. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-297-313>.

✉ bogdanov-ok@vnikti.com (O. K. Bogdanov)

© Lugovsky A. Yu., Bogdanov O. K., 2023

Введение. Проблемам взаимодействия пути и подвижного состава посвящены многие работы отечественных и зарубежных ученых, конструкторов и специалистов. Поскольку продольная составляющая силы взаимодействия не оказывает существенно влияния на устойчивость колеса на рельсе, при проведении динамических испытаний определяют одновременно (в одном сечении пути) величины горизонтальных поперечных и вертикальных составляющих сил взаимодействия [1–3]. Горизонтальные поперечные составляющие имеют случайную величину, так как определяются множеством факторов. Однако, поскольку эти силы обуславливают напряженное состояние как элементов конструкции пути, так и ходовых частей подвижного состава, их определение с известной степенью точности можно осуществлять, проводя соответствующие измерения напряжений как в пути, так и в элементах ходовых частей подвижного состава [4].

Проведение таких исследований во многом основано на оценке боковых сил. Непосредственное измерение боковых сил техническими средствами, смонтированными на подвижном составе (например, тензометрические колесные пары или колесные блоки), сопряжено с высокой технической сложностью, что затрудняет их практическое применение для оперативных целей. Косвенная оценка боковых сил более целесообразна по деформации рельса, включая поперечный или продольный изгиб шейки рельса и растяжение-сжатие головки и кромок подошвы рельса [5]. Методы оценки сил, действующих на путь при прохождении подвижного состава, подробно рассмотрены в работах [6–12].

Целью данной работы является качественная и количественная оценка силового воздействия колес полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс на рельсовые нити в кривых разного радиуса.

Методика проведения исследования. Специалистами АО «ВНИКТИ» были проведены исследования по установлению силового воздействия эксплуатируемого подвижного состава на рельсы в условиях горно-перевального участка Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры [13]. Для анализа и детализации суммарных нагрузок на рельсовые нити от каждого колеса вагонов на 2-м главном пути на спуске выбраны две кривые: малого и среднего радиуса с почти одинаковыми уклонами и схожими эксплуатационными параметрами.

Общий вид пути, на котором расположены опытные кривые с прилегающими к ним участками длиной не менее километра, представлен на рис. 1.

В момент прохождения колесами первых вагонов грузового состава испытательных сечений измерительного участка на первой опытной кривой ($R298$ м) колеса последних вагонов находятся на кривом участке пути ($R745$ м). Когда колеса последних вагонов состава проходят испытательные сечения, колеса первых вагонов находятся на кривой $R565$ м. В работе [14] отмечается, что на распределение боковых сил в длинном поезде влияет конфигурация подходного участка к опытной кривой и выходного участка за кривой, причем в сторону увеличения боковых сил.

Характеристика кривых, на которых проведены замеры силового воздействия на дату закладки измерительного участка (19–21 мая 2021 г.), представлена в табл. 1. Отступления пути в пределах измерительного участка на обеих опытных кривых отсутствовали.

На дату начала исследований информация о том, где по длине кривой закладывать измерительные участки, в каком количестве и на каком расстоянии друг от друга располагать испытательные сечения с датчиками, практически отсутствовала [5, 8, 12, 14]. Из нормативной документации имелся только ГОСТ Р 55050–2012¹.

Исходя из опыта проведения подобных работ Испытательным центром АО «ВНИКТИ», измерительные участки были заложены в середине круговой части опытных кривых [13].

Измерение вертикальных и боковых сил в пути выполнялось путем прямого тензометрирования по методу Г. Шлюмпфа с использованием датчиков, наклеенных на шейку. Для измерения вертикальных сил тензорезисторы наклеивались вертикально на уровне нейтральной оси рельса, а для измерения боковых сил — на шейку рельса у головки и подошвы симметрично с двух сторон шейки [7, 12].

Боковые и вертикальные силы от колеса на рельс регистрировались по мостовой схеме в соответствии с ГОСТ Р 55050–2012², который действовал в тот момент. Тензодатчики были наклеены в первых трех сечениях на наружном и внутреннем рельсах по угольнику, в следующих трех — только на наружном рельсе. Расстояние между датчиками (испытательными сечениями) составляло 1850 мм. Общая длина измерительного участка — 9,4 м.

¹ ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: дата введения 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.

² Там же.



Рис. 1. Месторасположение опытных кривых с подходными и выходными участками пути:
1 — опытная кривая R565 м; 2 — опытная кривая R298 м; К — протяженность кривой

Fig. 1. Location of the trial curves together with the approach and exit segments of the track:
1 — R565 m trial curve; 2 — R298 m trial curve; K — curve length

Таблица 1

Характеристика кривых перегона Ангасолка — Слюдянка-2, 2-й главный путь

Table 1

Curve parameters of the Angasolka–Slyudyanka-2 section, 2nd main track

Показатель	Кривая 1		Кривая 2	
Местоположение кривой, км, ПК	5300 км ПК6 – 5301 км ПК2		5301 км ПК6 – 9	
Радиус R кривой (направление кривой), м	298 (правая*)		565 (правая*)	
Протяженность кривой/круговой части, м	506/326		333/213	
Возвышение наружного рельса, мм	105 (106,3**)		35 (35,2**)	
Продольный профиль пути, ‰: уклоны/средневзвешенный уклон круговой части кривой	Спуск 15,3–17,3/16,4		Спуск 15,5–17,7/17,4	
Ширина колеи с учетом износа, мм	1534,5 ± 1,4 (1534,4**)		1536,1 ± 1,5 (1531,2**)	
Скорости движения поездов в кривой, пасс./гр., км/ч:				
– установленные приказом	70/60		70/60	
– фактические (замеренные)	46/60		35/56	
Рельс:				
– местоположение	Наружный	Внутренний	Наружный	Внутренний
– тип	P65	P65	P65	P65
– производитель	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
– категория	ДТ350	ДТ370ИК	ДТ350	ДТ350
Пропущенный тоннаж на дату исследований, млн т брутто	42,5	158,6	159,0	159,0
Путь	Бесстыковой	Бесстыковой	Бесстыковой	Бесстыковой
Шпалы, тип	Железобетонные 1-го срока службы			
Эюра шпал, шт./км пути	2000	2000	2000	2000
Тип промежуточного рельсового скрепления	ЖБР-65ПШМ	ЖБР-65ПШМ	ЖБР-65ПШМ	ЖБР-65ПШМ

* По ходу движения и по увеличению километража.

** Во 2-м испытательном сечении измерительного участка.

* Facing the engine as mileage increases.

** In the 2nd trial section of the target segment.

Схема расстановки оборудования измерительного участка [13] и общий вид установки датчиков во 2-м испытательном сечении представлены на рис. 2.

Тарировка тензометрических схем для измерения вертикальных сил $F_{\text{верт}}$ осуществлялась с помощью вертикальной нагрузки на рельс от колес локомотивов. Боковые силы $F_{\text{бок}}$ измерялись при нагружении от специального силового тарировочного устройства (рис. 3) посредством приложения в средней части боковой грани головки рельса нагрузки от 0 до 50 кН в горизонтальной плоскости железнодорожного пути, направленной перпендикулярно к оси пути.

Поскольку тарировка тензосхемы для измерения боковых сил с помощью поперечной распорной нагрузки до 50 кН без вертикального пригруза может привести к возникновению остаточных деформаций рельсошпальной решетки (РШР) в измерительных сечениях, на тарировочном устройстве с двух сторон установлены «балочки», фиксирующие величину бокового отжатия (рис. 3).

На рис. 4 представлены записи изменения бокового отжатия при циклическом нагружении в разных испытательных сечениях. Из графиков видно, что величина боковых отжатий после циклических нагружений не превышает 0,1 мм. Этот факт подтверждает практическое отсутствие остаточных деформаций РШР.

Суточный пакет поездов на участке состоит из 79–85 грузовых, 6 пассажирских и 2 моторвагонных. Из общего числа подвижного состава, проходящего по участку, для анализа были выбраны грузовые поезда, составленные полностью из полувагонов. Движение грузовых составов обеспечивали локомотивы-тягачи ЗЭС5К, расположенные в голове поезда, и локомотивы-толкачи — в хвосте. Составы с полувагонами, силовое воздействие от колес которых было замерено, двигались на спуске в режиме рекуперативного торможения и проходили испытательные сечения с разной скоростью и разным непогашенным ускорением (табл. 2).

Результаты исследований силового воздействия колес подвижного состава на рельсы. Анализ результатов проведенных исследований для корректности сравнения был выполнен по данным, полученным датчиками во 2-м испытательном сечении, и только для полувагонов с расчетной осевой нагрузкой 25 тс (245,3 кН).

Число проходящих полувагонов подвижного состава по испытательным участкам пути обеспечивало достоверную вероятность 0,994 [10].

На рис. 5 представлены фрагменты типичных осциллограмм боковых сил от колес полувагонов, действующих на наружный и внутренний рельсы в кривой R298 м (рис. 5, а) и кривой R565 м (рис. 5, б), на примере шести полувагонов — замеры 1 (63) и 2 (65) соответственно (табл. 2).

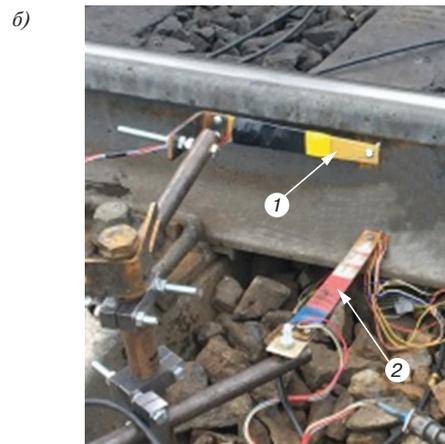
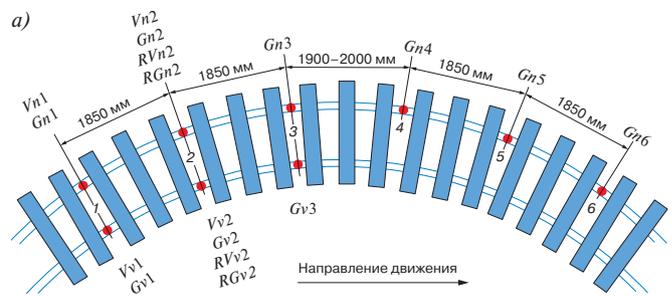


Рис. 2. Общий вид измерительного участка и его элементов: а — схема расстановки измерительного оборудования по участку: V_n и G_n — вертикальные и боковые силы на наружном рельсе; V_v и G_v — вертикальные и боковые силы на внутреннем рельсе; RV_n и RV_v — вертикальный прогиб наружного и внутреннего рельсов; RG_n и RG_v — боковое отжатие головки наружного и внутреннего рельсов; 1...6 — номера сечений; ● — место установки датчиков; б — общий вид установки датчиков во 2-м испытательном сечении на наружном рельсе: 1 — измерительная балочка бокового отжатия рельса; 2 — датчик вертикального прогиба рельса

Fig. 2. General view of the target segment and its elements: а — diagram showing the placement of measuring equipment along the segment: V_n and G_n — vertical and lateral forces exerted on the outer rail; V_v and G_v — vertical and lateral forces exerted on the inner rail; RV_n and RV_v — vertical deflections of the outer and inner rails; RG_n and RG_v — lateral displacements of the head of the outer and inner rail; 1...6 — section numbers; ● — sensor location; б — general layout of sensors installed in the 2nd trial section on the outer rail: 1 — measurement beam of lateral displacement; 2 — rail vertical deflection sensor



Рис. 3. Общий вид тарировочного устройства тензодатчиков для измерения боковых сил: 1, 3 — измерительные балочки; 2 — силовое тарировочное устройство

Fig. 3. General view of strain gauge calibration instrument for measuring lateral forces: 1, 3 — measurement beams; 2 — power calibration instrument

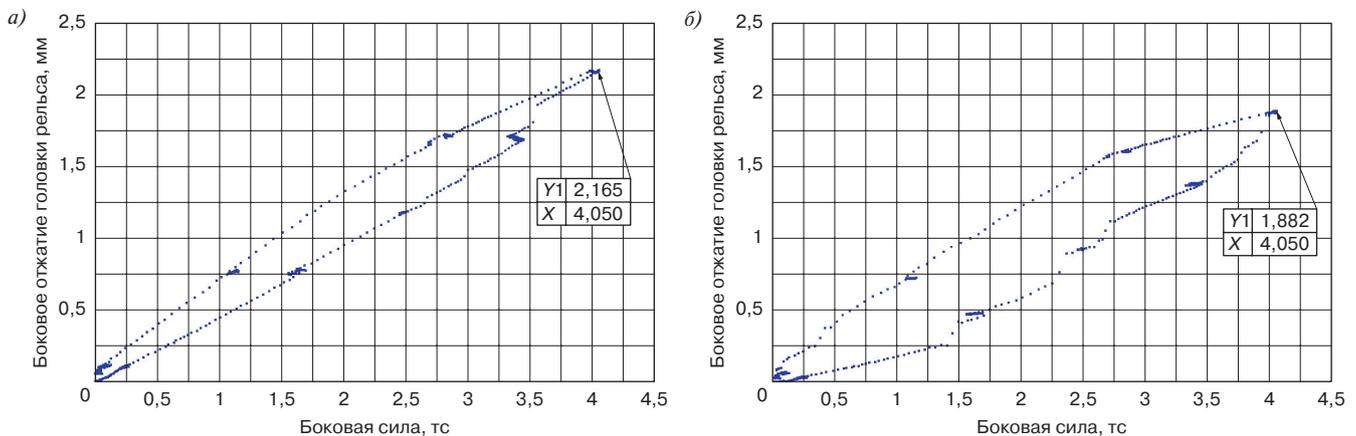


Рис. 4. Примеры записи бокового отжатия по мере циклического нагружения во 2-м испытательном сечении:
 а — в кривой R298 м; б — в кривой R565 м

Fig. 4. Examples of recording lateral displacement driven by incremental cyclic load in the 2nd trial section:
 a — for the R298 m curve; б — for the R565 m curve

Таблица 2

Скорость движения и величина непогашенного ускорения поездов при прохождении испытательного сечения № 2

Table 2

Train movement speed and unbalanced acceleration when passing trial section 2

Номер замера	Количество полувагонов в грузовом составе	Скорость движения V, км/ч		Непогашенное ускорение A _{шт} , м/с ²	
		первого вагона	последнего вагона	первого вагона	последнего вагона
Кривая R298 м					
1	63	56,7	59,9	0,19	0,29
2	67	54,2	45,6	0,12	-0,10
Кривая R565 м					
1	63	48,3	52,7	0,09	0,15
2	65	34,6	46,0	-0,07	0,06
3	74	54,7	56,1	0,17	0,20

На наружном рельсе обеих кривых четко выделяются боковые силы от набегающих колес каждой тележки (1-я и 3-я оси) и незначительные по величине силы от ненабегающих колес (2-я и 4-я оси). Например, в кривой R298 м значения составляют 62 и 3,3 кН (рис. 5, а, поз. 1, 2), в кривой R565 м — 45,8 и 2,2 кН (рис. 5, б, поз. 1, 2).

На внутреннем рельсе обращают на себя внимание боковые силы от колес 2-й и 4-й осей тележек, которые направлены внутрь колеи и по величине близки к боковым силам от набегающих колес. Например, 42,9 и -38,4 кН в кривой R298 м (рис. 5, а, поз. 3, 4); 36,9 и -27,4 кН в кривой R565 м (рис. 5, б, поз. 3, 4).

На рис. 6 показаны совмещенные гистограммы боковых сил $F_{бок}$ от колес полувагонов, действующих на наружный (рис. 6, а) и на внутренний (рис. 6, б) рельсы в кривых R298 и R565 м.

Условимся считать боковую силу, направленную наружу рельсовой колеи, положительной, направленную внутрь колеи — отрицательной.

Гистограммы боковых сил на обоих рельсах отчетливо показывают две зоны (две моды), образованные от воздействия колес 1-й, 3-й осей и колес 2-й, 4-й осей. На наружном рельсе боковая сила от незначительной части колес 2-й и 4-й осей имеет отрицательное значение, на внутреннем — практически все боковые силы от колес 2-й и 4-й осей отрицательные.

По измерительным участкам в кривых R298 и R565 м прошли 520 и 808 колесных пар полувагонов соответственно. Замеренные боковые и вертикальные силы от них по направленности своего воздействия распределяются следующим образом (табл. 3).

Анализ данных (табл. 3) показал, что почти равное количество колес с боковым усилием, направленным как наружу рельсовой колеи, так и внутрь, воздействует на внутренний рельс:

- в кривой R298 м — 58,3% колес с $\bar{F}_{бок} = 39,3$ кН, и 41,7% колес с $\bar{F}_{бок} = -30,8$ кН;
- в кривой R565 м — 44,4% колес с $\bar{F}_{бок} = 20,0$ кН и 55,6% колес с $\bar{F}_{бок} = -15,8$ кН.

Боковые силы, действующие на внутренний рельс в кривой R298 м, почти в два раза больше, чем в кривой R565 м, независимо от их направленности.

Боковые силы, действующие на рельсы, при расчетах, например, на контактно-усталостную прочность необходимо дифференцировать по направлению действующих сил.

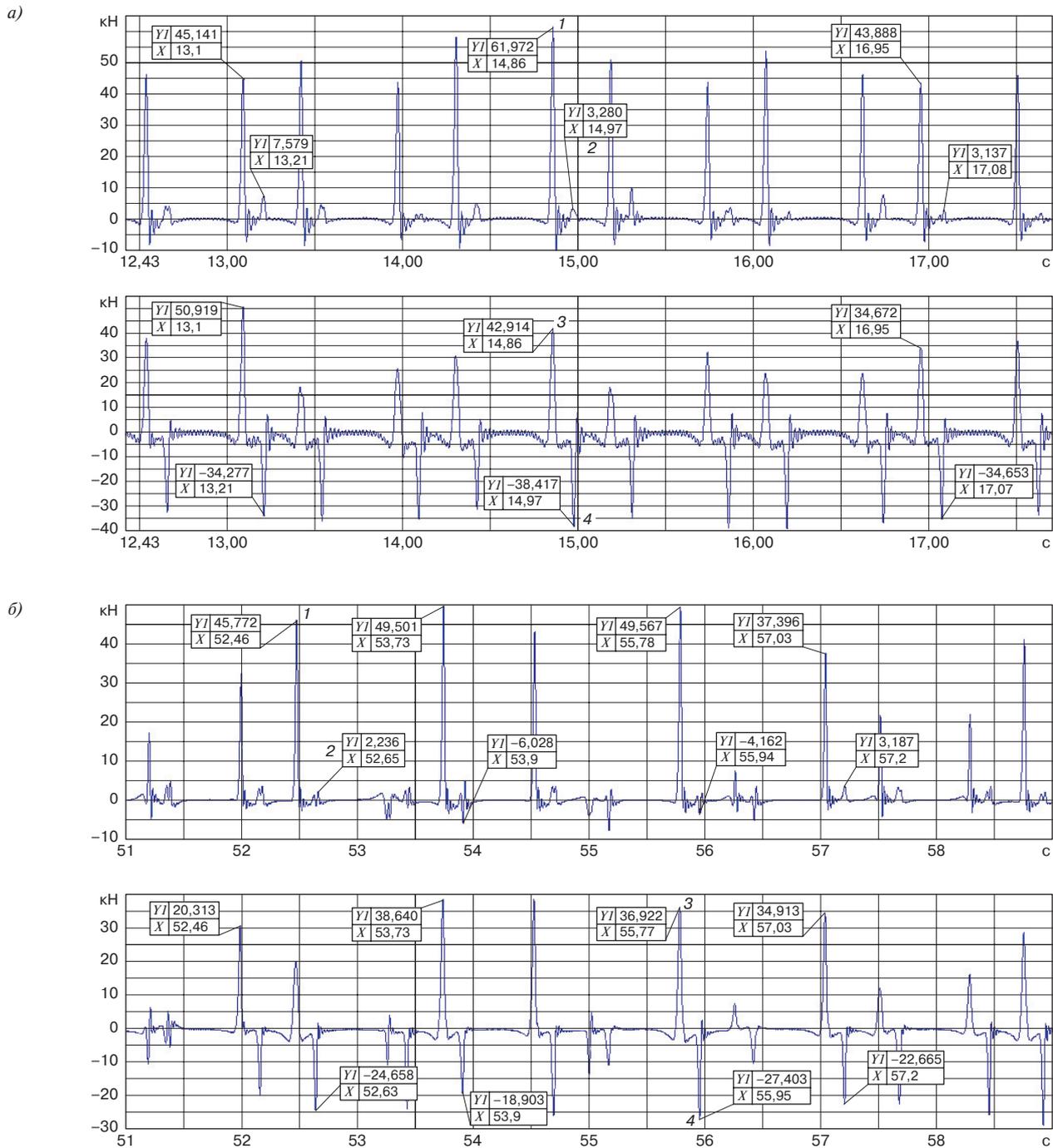


Рис. 5. Фрагмент осциллограмм боковых сил от колес на примере шести полувагонов в кривой R298 м (а) и R565 м (б). Верхняя осциллограмма — силы на наружном рельсе, нижняя — на внутреннем рельсе

Fig. 5. Fragment of oscillograph patterns representative of lateral forces exerted by wheels exemplified by six open-box cars for the R298 m curve (a) and for the R565 m curve (b). The upper oscillograph pattern — forces exerted on the outer rail, the lower one — forces exerted on the inner rail

Средние значения вертикальных сил $\bar{F}_{\text{верт}}$ и соответствующих им боковых $\bar{F}_{\text{бок}}$, воздействующих на наружный и внутренний рельсы по осям тележек полувагонов, представлены в табл. 4.

Анализ результатов, представленных в табл. 4, показывает, что в кривой меньшего радиуса (298 м):

- все набегающие колеса (1-я и 3-я оси) воздействуют на наружный и внутренний рельсы с боковым

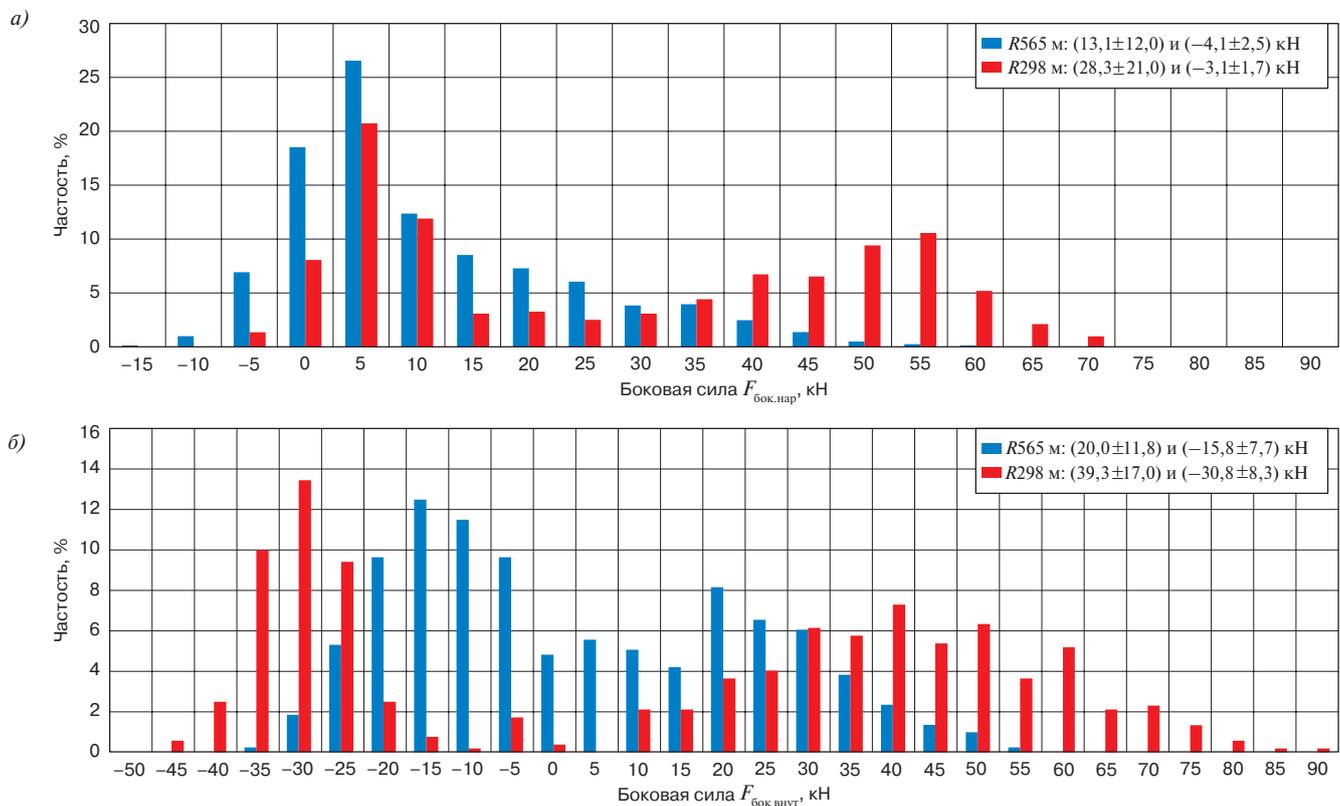


Рис. 6. Гистограммы боковых сил $F_{бок}$, действующих на наружный (а) и внутренний (б) рельсы от колес полувагонов в кривых $R565$ и $R298$ м
 Fig. 6. Histograms showing lateral forces $F_{бок}$ exerted on the outer (a) and inner (б) rails by the wheels of open-box cars in the $R565$ and $R298$ m curves

Таблица 3

Распределение боковых сил по направленности своего воздействия

Table 3

Distribution of lateral forces by direction

Направление бокового усилия	Кривая $R298$ м, наружный рельс			Кривая $R298$ м, внутренний рельс			Кривая $R565$ м, наружный рельс			Кривая $R565$ м, внутренний рельс		
	Колес проследовало, ед.	Доля от общего количества, %	Боковая сила, кН	Колес проследовало, ед.	Доля от общего количества, %	Боковая сила, кН	Колес проследовало, ед.	Доля от общего количества, %	Боковая сила, кН	Колес проследовало, ед.	Доля от общего количества, %	Боковая сила, кН
Наружу колеи, положительное	475	91,3	28,3	303	58,3	39,3	593	73,4	13,1	359	44,4	20,0
Внутри колеи, отрицательное	45	8,7	-3,1	217	41,7	-30,8	215	26,6	-4,1	449	55,6	-15,8
Сумма	520	100		520	100		808	100		808	100	

усилием, направленным только наружу рельсовой колеи; колеса 2-й и 4-й осей воздействуют со знакопеременным боковым усилием;

- в среднем 83 и 17 % ненабегающих колес (2-я и 4-я оси соответственно) действуют на наружный и внутренний рельсы с боковой силой, направленной наружу рельсовой колеи; внутрь рельсовой колеи — 19 и 81 % соответственно.

В кривой большого радиуса (565 м):

- колеса всех осей воздействуют на оба рельса со знакопеременным боковым усилием;

- в среднем до 87 % набегающих колес действуют на наружный рельс с боковой силой, направленной наружу (1-я ось), и 13 % — внутрь рельсовой колеи (3-я ось); на внутренний рельс — 83 и 17 % соответственно;

• в среднем 60 и 40 % ненабегающих колес (2-я и 4-я оси) действуют на наружный рельс с боковой силой, направленной наружу и внутрь рельсовой колеи, соответственно. На внутренний рельс — 6 и 94 % соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что расчет вертикальных сил путем их усреднения от всех колес полувагона, проходящих по рельсовой нити, вполне обоснован, так как все силы имеют одну направленность. Вертикальные силы $\bar{F}_{\text{верт}}$, действующие от всех четырех колес (1–4 осей) всех полувагонов на наружный рельс в кривой R298 м, составили $(113,1 \pm 14,2)$ кН; на внутренний рельс — $(126,9 \pm 20,1)$ кН. В кривой R565 м они составляют $(121,2 \pm 15,1)$ кН и $(100,9 \pm 13,8)$ кН соответственно.

При этом боковые силы можно рассчитать только одной направленности и отдельно по осям (см. табл. 4).

Согласно гистограмме для кривой R298 м (рис. 6) среднее значение всех боковых сил, действующих на наружный рельс и направленных наружу рельсовой колеи, составляет $\bar{F}_{\text{бок}} = (28,3 \pm 21,0)$ кН. Боковые силы от набегающих колес составляют в среднем 45,2 кН, от ненабегающих колес — 7,3 кН (табл. 4). Среднее значение всех боковых сил, действующих на внутренний рельс и направленных наружу рельсовой колеи, составляет $\bar{F}_{\text{бок}} = (39,3 \pm 17,0)$ кН. Боковые силы от набегающих колес составляют в среднем 41,5 кН, от ненабегающих колес — 27,2 кН (табл. 4).

Колеса всех 1-х и 3-х осей вагонов состава в кривой R298 м контактируют гребнем с боковой поверхностью головки наружного рельса, отжимают рельс и вызывают возникновение боковых сил (в среднем 45,2 кН), направленных наружу рельсовой колеи [2, 7]; 73,3 % из следом идущих за ними колес 2-х осей, скользя ободом на поверхности катания головки рельса, создают боковые силы (в среднем 7,5 кН), также направленные наружу. Боковые силы (в среднем 3,4 кН) от обода остальных 26,7 % колес 2-х осей действуют в обратном направлении — внутрь колеи. Подобным образом действуют на наружный рельс 10,7 % колес 4-х осей с боковыми силами в среднем 2,8 кН.

Аналогично действуют боковые силы на рельсы и в кривой R565 м. Боковые силы 87 % колес 1-х, 3-х осей действуют на наружный рельс с усилием 19,4 кН, направленным наружу, и 13,6 % с усилием 4,9 кН — внутрь. В среднем 60,4 % колес 2-х, 4-х осей действуют на наружный рельс с усилием 3,8 кН, направленным наружу, и 39,6 % с усилием 3,8 кН — внутрь.

Эффект «сжатия» поверхности головки наружного рельса колесами вероятнее всего приводит к образованию на верхней части боковой рабочей поверхности головки рельса дефекта в виде «чешуек» (рис. 7, а).

На внутреннем рельсе картина воздействия боковых сил иная.

Таблица 4

Вертикальные и соответствующие им боковые силы различной направленности, действующие в кривых на рельсы:

Table 4

Vertical and corresponding lateral forces of various directions impacting rails in curves:

а) наружный рельс

a) outer rail

Кривая R298 м
R298 m curve

№ оси вагона	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %
		Положительная			Отрицательная	
1	111,1	48,1	100	—	—	0
2	117,8	7,5	73,3	120,2	-3,4	26,7
3	109,1	42,3	100	—	—	0
4	114,8	7,0	89,3	114,5	-2,8	10,7

Кривая R565 м
R565 m curve

№ оси вагона	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %
		Положительная			Отрицательная	
1	115,2	17,5	86,3	107,1	-5,2	16,3
2	124,6	3,9	62,9	119,1	-4,1	37,1
3	120,3	21,3	89,1	110,0	-4,5	10,9
4	124,8	3,7	57,9	116,2	-3,5	42,1

б) внутренний рельс

b) inner rail

Кривая R298 м
R298 m curve

№ оси вагона	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %
		Положительная			Отрицательная	
1	129,4	43,3	100	—	—	0
2	126,8	28,6	21,4	122,0	-24,9	78,6
3	126,3	39,7	100	—	—	0
4	125,2	24,9	13	121,5	-33,3	87

Кривая R565 м
R565 m curve

№ оси вагона	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %	$\bar{F}_{\text{верт}}$	$\bar{F}_{\text{бок}}$	Количество колес, %
		Положительная			Отрицательная	
1	104,6	22,6	80,7	105,0	-11,0	19,3
2	94,4	4,8	7,9	98,1	-16,2	92,1
3	100,0	19,8	84,7	98,2	-11,1	15,3
4	104,5	5,2	4,5	96,1	-17,1	95,5

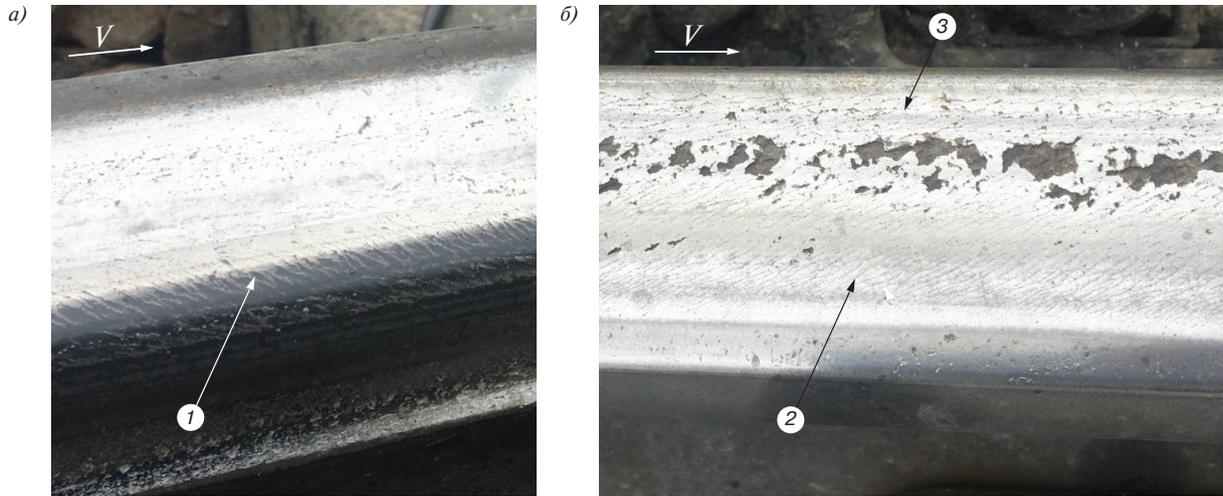


Рис. 7. Общий вид головки наружного (а) и внутреннего (б) рельсов в кривой R298 м:
 а — боковая рабочая поверхность головки наружного рельса в виде «чешуек» после пропуска 42,5 млн т груза брутто;
 б — дорожки качения на внутреннем рельсе с контактно-усталостными дефектами после пропуска 158,6 млн т груза брутто:
 1 — «чешуйки»; 2 — дорожка качения 1-го и 3-го колеса; 3 — дорожка качения 2-го и 4-го колеса

Fig. 7. General view of the head of the outer (a) and inner (b) rails in the R298 m curve:
 а — “scaly” lateral working surface of the outer railhead after experiencing exposure to 42.5 mln tons of freight (gross);
 б — race grooves on the inner rail with contact-fatigue defects after experiencing exposure to 158.6 mln tons of freight (gross):
 1 — “scales”; 2 — running track of the 1st and 3rd wheels; 3 — race grooves of the 2nd and 4th wheels

В кривой R298 м 58,6 % колес от общего числа прокатываемых по внутреннему рельсу, скользя по поверхности катания, воздействуют на него с боковым усилием $\bar{F}_{бок} = 39,4$ кН, направленным наружу рельсовой колеи, а остальные 41,4 % колес — внутрь, с усилием $\bar{F}_{бок} = 29,3$ кН.

В кривой R565 м 82,7 % колес 1-х и 3-х осей вагонов состава, скользя по поверхности катания головки внутреннего рельса, действуют на него с боковым усилием $\bar{F}_{бок} = 21,2$ кН, направленным наружу рельсовой колеи; 17,3 % колес действуют с боковым усилием $\bar{F}_{бок} = 11,1$ кН, направленным внутрь рельсовой колеи.

Ненабегающие колеса, также скользя по поверхности катания головки внутреннего рельса, действуют на него с боковым усилием $\bar{F}_{бок} = 5,0$ кН (6,2 %), направленным наружу рельсовой колеи; 98,3 % колес действуют с боковым усилием $\bar{F}_{бок} = 16,7$ кН, направленным внутрь рельсовой колеи.

Дорожка качения колес 1-й и 3-й осей в обеих кривых расположена ближе к внутренней (рабочей) грани рельса, а дорожка качения большинства колес 2-й и 4-й осей — к внешней (нерабочей) грани внутреннего рельса (рис. 7, б). Иными словами, на головку внутреннего рельса, например, в кривой R298 м, по ближней к рабочей боковой грани дорожке воздействует боковая нагрузка от обода колеса 1-й оси, достигающая величины до 85,7 кН, направленная наружу рельсовой колеи. В это же сечение (по дальней

дорожке качения) подходит обод колеса 2-й оси, и на рельс воздействует боковая нагрузка величиной до 45 кН, но направленная в противоположную сторону. Аналогичный процесс, почти с такими же значениями максимальных боковых сил (67 и 47 кН), повторяется при прохождении колес 3-й и 4-й осей. На дорожках качения начинает формироваться упрочненный слой с более высокой твердостью (эпюра распределения твердости поперек дорожки качения имеет М-образный вид), и, по всей видимости, изменяется структура поверхностного слоя. Упрочненные поверхностные слои на дорожках качения направлены навстречу друг к другу, а зона между дорожками качения подвергается «сжатию». В результате такого воздействия боковых нагрузок в зоне между дорожками качения 1-й, 3-й и 2-й, 4-й осей происходит отслаивание («выдавливание») металла, что способствует возникновению в середине рельса контактно-усталостных дефектов. Высказанное выше предположение о зарождении контактно-усталостных дефектов в середине головки рельса отличается от общепринятого [15] и нуждается в инструментальном подтверждении.

Отношение боковой нагрузки к вертикальной. Отношение сил $\bar{F}_{бок} / \bar{F}_{верт}$, действующих на внутренний и наружный рельсы по осям тележек, представлено в табл. 5.

Приведенные в таблице результаты расчетов показывают следующее:

Таблица 5

Отношение $\bar{F}_{бок} / \bar{F}_{верт}$ по осям тележки и относительно рельсовой колеи

Table 5

$\bar{F}_{бок} / \bar{F}_{верт}$ ratio along bogie axles and relative to rail gauge

Кривая R298 м, $F_{бок}$ наружу колеи				Кривая R298 м, $F_{бок}$ внутрь колеи				Кривая R565 м, $F_{бок}$ наружу колеи				Кривая R565 м, $F_{бок}$ внутрь колеи			
1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось	1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось	1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось	1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось
На наружном рельсе															
0,43	0,06	0,37	0,06	—	-0,03	—	-0,02	0,15	0,03	0,18	0,03	-0,05	-0,03	-0,04	-0,03
На внутреннем рельсе															
0,34	0,23	0,31	0,22	—	-0,26	—	-0,29	0,22	0,05	0,20	0,05	-0,11	-0,17	-0,11	-0,18

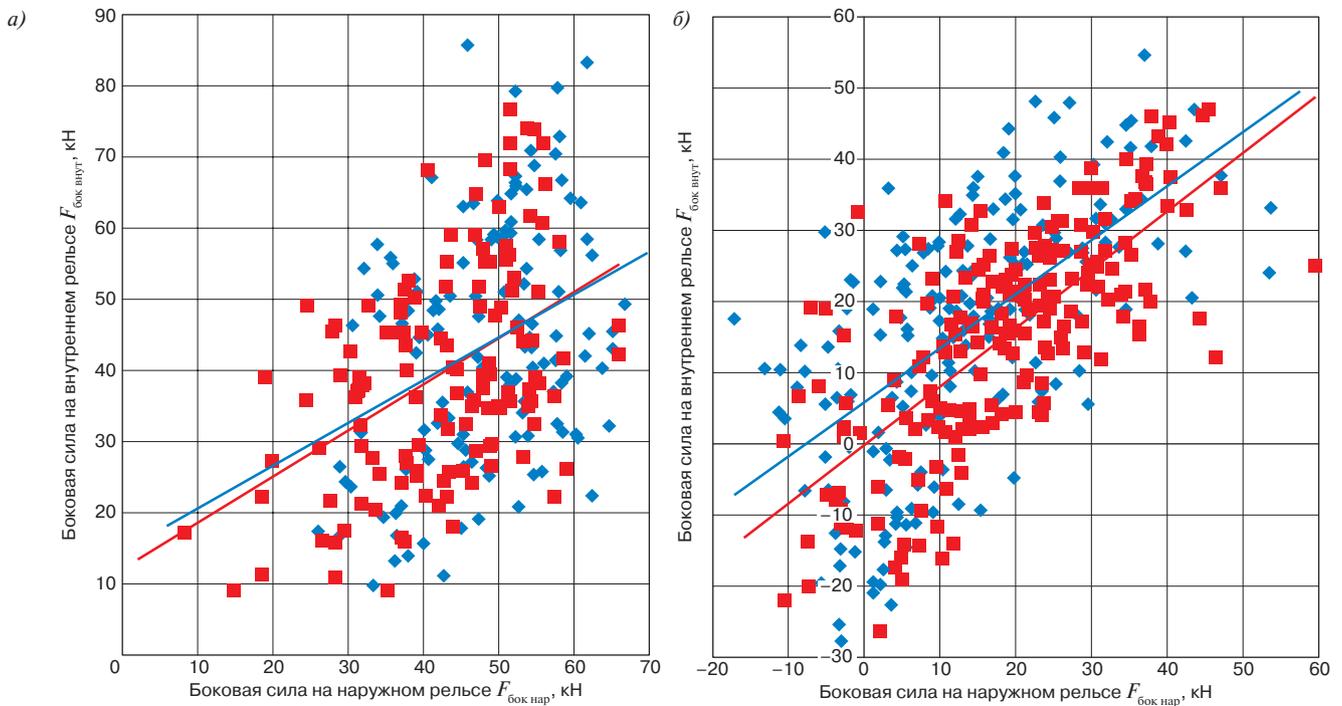


Рис. 8. Взаимосвязь боковых сил $F_{бок\ внут} = f(F_{бок\ нар})$, воздействующих синхронно на наружный и внутренний рельсы от колес 1-й, 3-й осей в кривых R298 м (а) и R565 м (б):
 ◆ — 1-я ось; ■ — 3-я ось

Fig. 8. Relationship between lateral forces $F_{бок\ внут} = f(F_{бок\ нар})$ exerted synchronically to the outer and inner rails by the wheels of the 1st and 3rd axles in the R298 m (a) and R565 m (b) curves:
 ◆ — 1st axle; ■ — 3rd axle

- при положительной $\bar{F}_{бок}$ отношение сил $\bar{F}_{бок} / \bar{F}_{верт}$ от колес 1-й, 3-й и 2-й, 4-й осей на наружном рельсе составляет 0,4 и 0,06 для кривой R298 м и 0,17; 0,03 для кривой R565 м, на внутреннем рельсе — 0,32; 0,22 и 0,21; 0,05 соответственно;

- при отрицательной $\bar{F}_{бок}$ отношение сил $\bar{F}_{бок} / \bar{F}_{верт}$ от колес 1-й, 3-й и 2-й, 4-й осей на наружном рельсе составляет 0,03; 0,02 и 0,05; 0,03, на внутреннем рельсе — 0,26; 0,29 и 0,11; 0,18 соответственно.

При движении колесной пары по рельсам боковые силы, создаваемые колесами, расположенными на одной оси, не только взаимосвязаны, но и взаимозависимы [2, 7].

На рис. 8 представлена взаимозависимость боковых сил, воздействующих от колес 1-й и 3-й осей синхронно на наружную и внутреннюю рельсовые нити в виде $F_{бок\ внут} = f(F_{бок\ нар})$ в кривых R298 м (рис. 8, а) и R565 м (рис. 8, б).

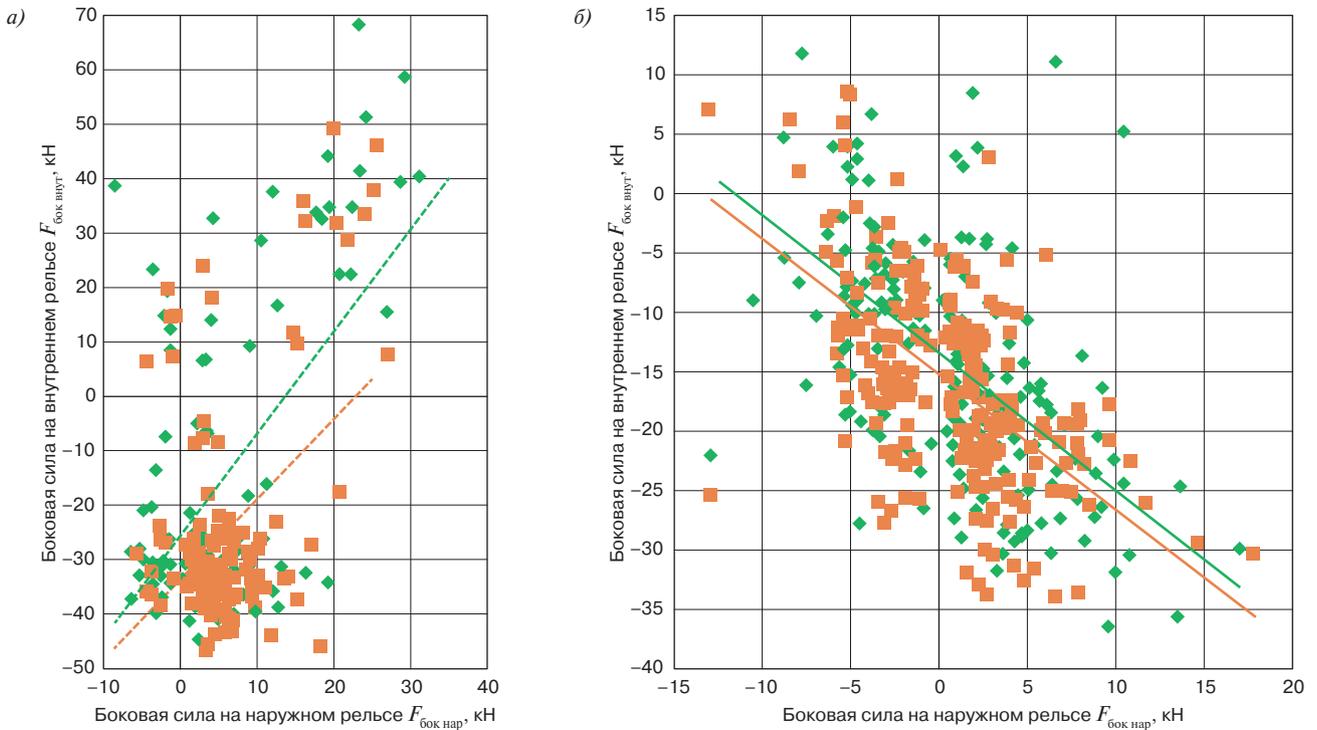


Рис. 9. Взаимосвязь боковых сил $F_{\text{бок внут}} = f(F_{\text{бок нар}})$, воздействующих синхронно на внутренний рельс от колес 2-й, 4-й осей в кривых R298 м (а) и R565 м (б):
 ◆ — 2-я ось; ■ — 4-я ось

Fig. 9. Relationship between lateral forces $F_{\text{бок внут}} = f(F_{\text{бок нар}})$ exerted synchronically on the internal rail from the wheels of the 2nd and 4th axles in the R298 m (a) and R565 m (b) curves:
 ◆ — 2nd axle; ■ — 4th axle

Таблица 6

Отношение $\bar{F}_{\text{бок внут}} / \bar{F}_{\text{бок нар}}$ по осям

Table 6

$\bar{F}_{\text{бок внут}} / \bar{F}_{\text{бок нар}}$ ratio by axles

Кривая R298 м				Кривая R565 м			
1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось	1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось
0,91	-4,30	0,94	-5,91	1,16	-15,23	0,82	-26,50

В обеих кривых с увеличением боковой силы на наружном рельсе $F_{\text{бок нар}}$ от набегающих колес 1-й и 3-й осей прямо пропорционально увеличивается и боковая сила от колес этих же колесных пар на внутренний рельс $F_{\text{бок внут}}$. Это подтверждает, что «значение боковой силы на наружном рельсе тем больше, чем больше сила трения по головке внутреннего рельса» [2].

В кривой R298 м набегающие колеса от 1-й и 3-й осей не создавали отрицательных боковых сил. Интенсивность увеличения $F_{\text{бок внут}}$ по мере увеличения $F_{\text{бок нар}}$ в кривой R298 м, согласно наклону линии тренда, для обеих осей одинакова.

В кривой R565 м незначительная часть набегающих колес от обеих осей воздействовала на наружный и

внутренний рельсы с боковым усилием, направленным внутрь рельсовой колеи. Боковые силы, действующие на внутренний рельс от колес 1-й оси, превышают боковые силы от колес 3-й оси: при $F_{\text{бок нар}} = 20$ кН → на 30%, при $F_{\text{бок нар}} = 40$ кН → на 11%.

Интенсивность увеличения $F_{\text{бок внут}}$ по мере увеличения $F_{\text{бок нар}}$ в кривых R298 и R565 м, согласно углу наклона линии тренда $F_{\text{бок внут}} = f(F_{\text{бок нар}})$, для набегающих колес обеих осей практически одинакова.

На рис. 9 представлена взаимозависимость боковых сил $F_{\text{бок}}$, воздействующих от колес 2-й, 4-й осей одновременно на наружную и внутреннюю рельсовые нити в виде зависимости $F_{\text{бок внут}} = f(F_{\text{бок нар}})$ в кривых R298 м (рис. 9, а) и R565 м (рис. 9, б).

В кривой R565 м (рис. 9, б) с увеличением боковой силы $F_{\text{бок нар}}$ от колес 2-й и 4-й осей прямо пропорционально увеличивается и боковая сила $F_{\text{бок внут}}$. По мере увеличения боковых сил $F_{\text{бок нар}}$ от колес 2-й и 4-й осей по абсолютному значению в зоне отрицательных значений боковые силы $F_{\text{бок внут}}$ уменьшаются. В зоне положительных значений боковых сил на наружном рельсе силы $F_{\text{бок внут}}$ и $F_{\text{бок нар}}$ увеличиваются прямо пропорционально.

Боковые силы, действующие на внутренний рельс от колес 4-й оси, превышают боковые силы

от колес 2-й оси: при $F_{\text{бок нар}} = -5 \text{ кН}$ → на 26 %, при $F_{\text{бок нар}} = 10 \text{ кН}$ → на 6,8 %.

В табл. 6 приведены средние значения отношений боковой силы на внутреннем рельсе к боковой силе на наружном рельсе $\bar{F}_{\text{бок внут}} / \bar{F}_{\text{бок нар}}$ от колес каждой оси в разных кривых.

Анализ данных табл. 6 показывает, что боковая сила, действующая:

- от набегающих колес (1-я и 3-я оси) на внутренний рельс, практически равна боковой нагрузке на наружный рельс (меньше на 8,9 и 6,2 % соответственно);

- от ненабегающих колес (2-я и 4-я оси) на внутренний рельс, превышает боковую силу на наружный рельс в 4,3 и 5,9 раза соответственно.

Силовые факторы и состояние рельсового пути — взаимовлияющая система. Силы, действующие на путь, изменяют его, а путь, изменяясь, в свою очередь изменяет силы, действующие на него.

Результаты исследований бокового износа наружного рельса. Вопросам образования бокового износа рельсов в кривых посвящен ряд работ. В [1] в общем виде (без указания конкретных значений) указано, что в кривых малого радиуса интенсивность бокового износа различна по длине наружного рельса и увеличивается в зонах неровностей рельсов и пути в плане [11]. В исследованиях, проведенных [5, 12] на 100-метровых участках в кривых радиусом 496 и 405 м, где замеры производились через 5 м, этот эффект не отмечен. Эффект увеличения бокового износа к концу круговой части кривой по ходу движения составов четко отмечен в работах [5, 16].

Авторами были проанализированы данные измерительных проездов диагностического комплекса инфраструктуры (ДКИ) «Спринтер-Интеграл» (АО «Фирма ТВЕМА») по опытным кривым, выполненным в период между датами, максимально близкими к датам проведения измерений и к датам изъятия наружных рельсов. На рис. 10 приведены эпюры бокового износа на наружном рельсе, построенные вдоль круговой части кривых $R298$ и $R565$ м соответственно, с обозначением местоположения измерительных участков в даты проезда ДКИ «Спринтер-Интеграл»: на рис. 10, *a* — наиболее близкая к дате измерения боковых сил, на рис. 10, *b* — наиболее близкая к дате снятия рельсов по дефекту кода 44.

После пропуска 49,9 млн т груза брутто на круговой части кривой $R298$ м (рис. 10, *a*) сформировался боковой износ с выраженным постепенным увеличением к концу кривой по ходу движения поездов. Износ в середине кривой изменялся в диапазоне от 5,9 до 8,1 мм. Боковой износ в начале и конце круговой кривой в среднем по линии тренда составил 6,3 и 7,6 мм (увеличение на 20,6 %). По мере нарастания пропущенного тоннажа до 115,9 млн т груза брутто

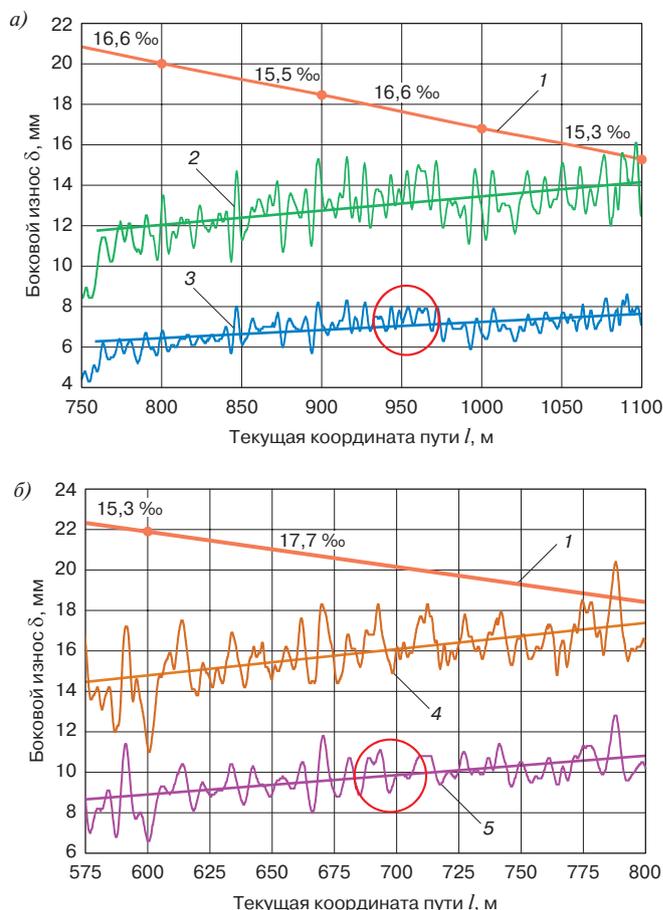


Рис. 10. Эпюры бокового износа наружного рельса δ в круговой части кривой $R298$ м (*a*) и кривой $R565$ м (*b*) с обозначением местоположения измерительных участков в крайние даты проезда ДКИ «Спринтер-Интеграл»:

1 — продольный уклон пути; 2 — при пропуске 115,9 млн т брутто; 3 — при пропуске 49,9 млн т брутто; 4 — при пропуске 342,5 млн т брутто; 5 — при пропуске 166,0 млн т брутто

Fig. 10. Diagrams showing lateral wear of the outer rail δ in the circular part of the $R298$ m (*a*) and $R565$ m (*b*) curves and location of the target segments on the outermost dates of the trips made by infrastructure diagnostic complex “Sprinter-Integral”:

1 — longitudinal slope of the track; 2 — after exposure to 115.9 mln tons of freight (gross); 3 — after exposure 49.9 mln tons of freight (gross); 4 — after exposure to 342.5 mln tons of freight (gross); 5 — after exposure to 166.0 mln tons of freight (gross)

(при 126,7 млн т груза брутто была произведена смена рельсов) боковой износ в начале круговой кривой составил в среднем по линии тренда 11,7 мм, а в конце кривой — 14,2 мм (увеличение на 21,4 %). При этом износ в середине кривой изменялся в диапазоне от 11,5 до 15,2 мм.

Аналогично, для круговой части кривой $R565$ м (рис. 10, *b*) после пропуска 166,0 млн т груза брутто сформировался боковой износ, который также увеличивался к концу кривой по ходу движения поездов. При этом износ в середине кривой изменялся в диапазоне от 8,0 до 11,8 мм. В среднем боковой износ в

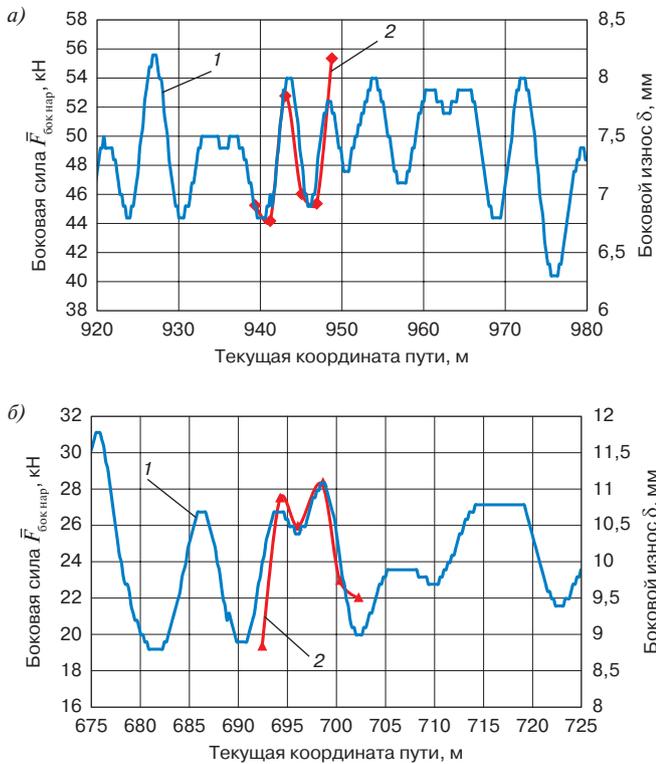


Рис. 11. Фрагмент эпюры бокового износа наружного рельса δ , совмещенный с эпюрой распределения боковых сил $\bar{F}_{\text{бок нар}}$ вдоль измерительного участка в кривых $R298$ м (а) и $R565$ м (б): 1 — эпюра бокового износа; 2 — эпюра боковых сил от набегающих колес

Fig. 11. Fragment of a diagram showing lateral wear of outer rail δ overlapped with a diagram showing distribution of lateral forces $\bar{F}_{\text{бок нар}}$ along the target segment in the $R298$ м (а) and $R565$ м (б) curves: 1 — lateral wear diagram; 2 — diagram showing lateral forces exerted by moving wheels

начале и конце круговой кривой по линии тренда составил 8,6 и 10,9 мм (увеличение на 26,1%). По мере нарастания пропущенного тоннажа до 342,5 млн т груза брутто (при 343,8 млн т груза брутто была произведена смена рельсов) боковой износ в начале круговой кривой составил в среднем по линии тренда 14,4 мм, а в конце кривой — 17,3 мм (увеличение на 20,1%). При этом величина бокового износа изменялась в середине кривой от 14,6 до 18,2 мм.

Возможной причиной повышения интенсивности бокового износа в конце кривой, по мнению И. А. Пухова (ведущего конструктора Дорожного конструкторско-технологического бюро Дальневосточной железной дороги), является фактор нагрева колес.

Эпюры бокового износа, рихтовки и ширины рельсовой колеи вдоль круговой части кривой имеют вид колебательного процесса. Этот процесс в указанных эпюрах протекает почти синхронно друг с другом. Синхронно развивается процесс изменения бокового

износа, рихтовки и шаблона и по мере увеличения пропущенного тоннажа. Боковой износ с увеличением накатки увеличивается и имеет тенденцию к более интенсивному росту к концу круговой части кривой по ходу движения поездов (до 24%), чем в ее начале. Рихтовка и ширина рельсовой колеи тоже увеличиваются вдоль круговой кривой. Однако это увеличение происходит почти равномерно по всей длине. Например, в кривой $R565$ м по мере увеличения пропущенного тоннажа с 232 до 342,5 млн т груза брутто рихтовка увеличивается незначительно — в среднем на 0,5 мм. Увеличение ширины рельсовой колеи за тот же период достигало 5 мм.

Спектральный анализ эпюр бокового износа в кривых $R298$ и $R565$ м после накатки груза брутто показал, что доминирующими частотами колебаний бокового износа по длине кривой (длина волны) являлись 13,7; 11,3 и 9,7 м. Таким образом, чтобы охватить диапазон колебания бокового износа, длина измерительного участка должна быть не менее 13,7 м.

Для определения тенденции изменения боковых сил по длине кривой по данным тензодатчиков всех испытательных сечений были построены эпюры боковых сил (средние значения от колес 1-й и 3-й осей) в пределах измерительного участка на обеих кривых. На рис. 11 представлены фрагменты эпюр бокового износа наружного рельса в кривых $R298$ и $R565$ м, построенные по данным проездов ДКИ «Спринтер-Интеграл» по опытным кривым, выполненным в даты максимально близкие к дате проведения измерений боковых сил. Эпюры бокового износа наружного рельса δ совмещены с эпюрами боковых сил $\bar{F}_{\text{бок нар}}$ от набегающих колес вдоль измерительного участка в кривой $R298$ м (а) и в кривой $R565$ м (б).

На эпюрах представлены средние значения боковых сил $\bar{F}_{\text{бок нар}}$, полученные в каждом испытательном сечении, от колес только полувагонов с нагрузкой 245,3 кН/ось. Боковой износ наружного рельса определен при прохождении колес всего подвижного состава, проходящего по измерительному участку.

Боковые силы в кривой $R298$ м (рис. 11, а) были получены на рельсах, имеющих накатку 42,5 млн т груза брутто, а эпюра бокового износа построена на рельсах после накатки 49,9 млн т груза брутто. В кривой $R565$ м (рис. 11, б) — силы на рельсах после 159,0 млн т груза брутто, а износ — после 166 млн т груза брутто. Даже при несовпадении пропущенного тоннажа при замерах боковых сил и бокового износа очевидно, что эпюра боковых сил по длине измерительного участка изменяется синхронно эпюре изменения бокового износа. Можно ожидать, что среднее распределение боковой нагрузки от набегающих колес всех вагонов, проходящей по участку подвижного

состава, включая локомотивы, будет более точно совпадать с эпюрой бокового износа.

Обсуждение и заключение. В новом ГОСТе указывается, что «в каждой круговой кривой в пределах участка пути длиной 25 м располагают не менее восьми испытательных сечений» и «располагать испытательные сечения в зонах наибольших отклонений состояния пути по рихтовке либо в зонах, где по результатам единичного проезда опытного ПС с наибольшей допускаемой для данного участка скоростью зарегистрированы наибольшие показания рамной силы»³. Если в прежнем ГОСТе⁴ место расположения измерительного участка в кривой вообще не упоминалось, то в новом есть неопределенность в том, где именно должен быть обустроен измерительный участок пути по длине кривой. Следует ожидать, что по величине силовое воздействие в разных местах кривой и при разной накатке (а также в разное время года) будет различаться.

Таким образом, сравнивать боковые и вертикальные силы, полученные даже при одинаковом радиусе и продольном профиле, можно только при полном совпадении местоположения тензодатчиков по длине кривой и при равной величине бокового износа. Во всех иных случаях сравнение будет заведомо некорректным.

Анализ результатов измерений боковых и вертикальных сил, проведенных для полувагонов с осевой нагрузкой в 245,3 кН, и изучение формирования бокового износа наружного рельса в кривых радиусом 298 м (длиной 506 м на спуске со средневзвешенным уклоном в круговой ее части 16,4‰ после пропуска 42,5 млн т груза брутто) и 565 м (длиной 333 м на спуске со средневзвешенным уклоном в круговой ее части 17,4‰ после пропуска 159,0 млн т груза брутто) в условиях Слюдянской дистанции пути, позволяет сделать следующие выводы.

1. Для анализа силового воздействия колес подвижного состава на рельсы необходимо учитывать и оценивать боковые силы, дифференцируя их по модулю и по направленности (внутрь и наружу рельсовой колеи).

2. Гистограммы боковых сил на обоих рельсах в обеих кривых двухмодальные, образованные от воздействия колес 1-й, 3-й осей и колес 2-й, 4-й осей.

3. Эффект «сжатия» поверхности головки наружного рельса боковыми силами от колес 1-й, 3-й осей и 2-й, 4-й осей, имеющих противоположную направленность, приводит к образованию дефекта на верхней части боковой рабочей поверхности головки рельса в виде «чешуек».

4. Боковая нагрузка воздействует на внутренний рельс по двум дорожкам качения. Ближняя к рабочей грани рельса дорожка формируется силами, направленными наружу рельсовой колеи; дальняя — силами, направленными внутрь. Это приводит к тому, что поверхность головки рельса в зоне между дорожками качения подвергается «сжатию», что, в свою очередь, способствует возникновению в середине поверхности качения рельса контактно-усталостных дефектов.

5. С увеличением боковой силы на наружном рельсе прямо пропорционально возрастает боковая сила от колес той же самой колесной пары на внутренний рельс.

6. Характер изменения боковых сил по длине кривой в пределах измерительного участка синхронен эпюре изменения бокового износа.

7. Для корректного сравнения силовых факторов с данными, полученными другими авторами, необходимо, чтобы помимо равенства радиусов кривых и продольного профиля совпадали местоположение датчиков по длине кривой и величина бокового износа.

8. Местоположение испытательных сечений с датчиками необходимо согласовывать с эпюрой бокового износа кривой.

9. Необходимо дополнить ГОСТ 34759—2021 уточнением, где, сколько и на каком расстоянии друг от друга необходимо располагать измерительные участки и испытательные сечения с тензодатчиками, а также при какой величине бокового износа и сколько раз надо производить измерения силовых параметров.

Благодарности: авторы выражают благодарность ведущему конструктору Дорожного конструкторско-технологического бюро Дальневосточной железной дороги И. А. Пухову за предоставленную версию о причинах повышения интенсивности бокового износа в конце кривой; ведущему инженеру Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава (ВНИКТИ) М. Г. Акашеву за предоставленные исходные материалы по замерам боковых и вертикальных сил; рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors would like to express their gratitude to I. A. Pukhov, a Leading Designer of the Railway Design and Engineering Center of the Far Eastern Railway, for sharing his view on the causes behind the greater intensity of lateral wear at the end of a curve; M. G. Akashev, a Leading Engineer of the Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (VNIKTI), for sharing source materials on measuring lateral and vertical forces; to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

³ ГОСТ 34759—2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: дата введения 2022-02-01 с правом досрочного применения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. С. 8.

⁴ ГОСТ Р 55050—2012.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с. [Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Interaction of track and rolling stock*. Moscow: Transport; 1986. 560 p. (In Russ.)].
2. Ромен Ю. С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. М.: РАС, 2019. 160 с. [Romen Yu. S. *Interaction of the path and the crew in the rail track*. Moscow: RAS; 2019. 160 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/dprfoa>.
3. Ромен Ю. С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо—рельс при движении поезда в кривых // Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. Т. 74, № 1. С. 17–26 [Romen Yu. S. Factors Responsible for Wheel—Rail Interaction in Curves. *Russian Railway Science Journal*. 2015;74(1):17–26. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/tolhqr>.
4. Ромен Ю. С., Суслев О. А., Баляева А. А. Определение сил взаимодействия в системе колесо—рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса // Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 6. С. 354–361 [Romen Yu. S., Suslov O. A., Balyaeva A. A. Determining the force of interaction in a wheel—rail system based on measuring stresses in rails neck. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(6):354–361. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>.
5. Бржезовский А. М. Предложения по разработке референтной методики измерения боковых сил // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 101–113 [Brzhezovskiy A. M. Proposals for development of a reference method for measuring lateral forces. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):101–113. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113>.
6. Коган А. Я. Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 3. С. 138–145 [Kogan A. Ya. Evaluation of the intensity of lateral and vertical wear of rails under passing trains. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(3):138–145. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-138-145>.
7. Карпушенко Н. И., Величко Е. С., Антерейкин Е. С. Анализ процессов нарастания износа рельсов и их ресурса в кривых участках пути // Наука и транспорт. 2012. № 3. С. 48–51 [Karpushchenko N. I., Velichko E. S., Antereykin E. S. Analysing processes contributing to greater wear of rails and reduction of their service life in curved segments of the track. *Nauka i transport*. 2012;(3):48–51. (In Russ.)].
8. Исследование бокового износа рельсов в кривых на перевальном участке / Н. И. Карпушенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 9. С. 35–40 [Karpushchenko N. I., Antereykin E. S., Zamelova D. Yu., Trukhanov P. S. Research work of rail wear in curved track in the pike. *Railway Track and Facilities*. 2018;(9):35–40. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xydwzv>.
9. Карпушенко Н. И., Река Е. М. Интенсивность бокового износа рельсов в кривых в зависимости от эксплуатационных условий // Вестник Сибирского государственного университета путей

сообщения. 2022. № 2 (61). С. 57–66 [Karpushchenko N. I., Reka E. M. Intensity of rail lateral wear in curves depending on operating conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(2):57–66. (In Russ.)]. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_61_57.

10. Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В. Экспериментальное определение боковых нагрузок от взаимодействия колеса с рельсом // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 6(85). С. 50–53 [Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. Experimental determination of side loading from wheel—rail interaction. *Transport of the Russian Federation*. 2019;(6):50–53. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/nlzoqr>.

11. Певзнер В. О., Белоцветова О. Ю., Потапов А. В. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 4. С. 242–247 [Pevzner V. O., Belotsvetova O. Yu., Potapov A. V. Results of observations to evaluate the impact of operational factors on the side rail wear. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(4):242–247. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-242-247>.

12. Экспериментальное определение боковых сил в системе «колесо—рельс» при движении поездов по горно-перевальному участку / А. П. Ресельс [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 65, № 1. С. 75–84 [Resel's A. P., Filatov E. V., Koven'kin D. A., Baranov T. M. Experimental determination of lateral forces in the «wheel—rail» system during the movement of trains along the mountain-pass section. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2020;65(1):75–84. (In Russ.)]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.1\(65\).75-84](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.1(65).75-84).

13. Краснов О. Г., Акашев М. Г., Колтунов В. Ю. Силловые факторы, действующие на путь от разных типов подвижного состава в условиях горно-перевального участка // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. матер. науч.-практ. конф. АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 г. Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 110–115 [Krasnov O. G., Akashev M. G., Koltunov V. Yu. Force factors acting on the track from different types of rolling stock in the conditions of the mountain-overpass area. In: *Science 1520 Railway Research Institute: Look beyond the horizon: Collection of research and practice conference materials JSC VNIIZhT, 26–27 August 2021, Shcherbinka*. Shcherbinka: JSC VNIIZhT; 2021. p. 110–115. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/cthegv>.

14. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения: конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры: [сб. ст.] / пер. с англ. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2012. 568 с. [Zakharov S. M. (transl.) *Generalisation of Global Experience in Heavy-Haul Traffic: Design and Maintenance of Railway Infrastructure: [collection of articles]*. Moscow: Intext Publ.; 2012. 568 p. (In Russ.)].

15. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е. А. Шур [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. Т. 74, № 3. С. 3–9 [Shur E. A., Borts A. I., Sukhov A. V., Abdurashitov A. Yu., Bazanova L. V., Zagranichuk K. L. Evolution of the Contact-Fatigue Defects Caused Rail Failure Rate. *Russian Railway Science Journal*. 2015;74(3):3–9. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/tuvqnp>.

16. Луговский А. Ю., Богданов О. К. Правильно ли мы определяем интенсивность бокового износа в кривых? // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 33–37 [Lugovsky A. Yu., Bogdanov O. K. Do we correctly determine the rate of side wear in curves? *Railway Track and Facilities*. 2022;(6):33–37. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/gdoxyu>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Юрьевич ЛУГОВСКИЙ,

канд. физ.-мат. наук, начальник департамента, департамент оптических средств диагностики, Фирма ТВЕМА (107140, г. Москва, 1-й Красносельский пер., д. 3). Author ID: 139486, <https://orcid.org/0000-0002-1942-3906>

Олег Константинович БОГДАНОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, отдел пути и специального подвижного состава, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), <https://orcid.org/0009-0005-7901-2905>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey Yu. LUGOVSKY,

Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Department, Optical Diagnostic Tools Department, Firma TVEMA (107140, Moscow, 3, 1st Krasnoselskiy lane), Author ID: 139486, <https://orcid.org/0000-0002-1942-3906>

Oleg K. BOGDANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Track and Special Rolling Stock Department, Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy Revolyutsii St.), <https://orcid.org/0009-0005-7901-2905>

ВКЛАД АВТОРОВ

Алексей Юрьевич ЛУГОВСКИЙ. Обзор основных направлений исследований, сбор и структурирование материала, проведение расчетов, оценка результатов, текст статьи (40%).

Олег Константинович БОГДАНОВ. Обзор основных направлений исследований, сбор и структурирование материала, проведение расчетов, оценка результатов, написание и редактирование текста статьи (60%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexey Yu. LUGOVSKY. Overviewing the main lines of research, gathering and structuring materials, performing calculations, assessing results, writing the draft (40%).

Oleg K. BOGDANOV. Overviewing the main lines of research, gathering and structuring materials, performing calculations, assessing results, follow-on revision of the text (60%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023, рецензия от первого рецензента получена 07.09.2023, рецензия от второго рецензента получена 26.09.2023, принята к публикации 13.11.2023.

The article was submitted 23.08.2023, first review received 07.09.2023, second review received 26.09.2023, accepted for publication 13.11.2023.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
Л. А. Мугинштейн, Л. Н. Понарин, О. В. Ляшко,
С. В. Лобанов, В. Ю. Кирякин, А. Ю. Анфиногенов

Программный комплекс предназначен для моделирования микроуровня, позволяет создавать цифровые двойники железнодорожных направлений для решения задач определения основных факторов, влияющих на стабильный пропуск грузовых поездопотоков на протяженных железнодорожных линиях, и выработки мер по снижению отрицательно влияющих на перевозочный процесс факторов. Имитационное моделирование микроуровня железнодорожного участка включает объектные модели имитируемых виртуальных объектов железной дороги (перегоны, блок-

участки, станции, поезда, локомотивы и т. д.) в объеме, необходимом для проектирования цифровых двойников при решении прикладных задач, в том числе моделировании диспетчерского управления при оперативном перестроении графика движения поездов.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ
№ 2022617512 от 21.04.2022. Заявка № 2022616306 от
08.04.2022. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48492409>

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru