

Научная статья

УДК 625.1.032

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113

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

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РЕФЕРЕНТНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ БОКОВЫХ СИЛ

А. М. БржезовскийНаучно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены предпосылки для выбора наиболее целесообразной применительно к процедуре установления условий обращения подвижного состава на сети железных дорог референтной методики экспериментального определения (измерения) боковой (горизонтальной поперечной) силы, действующей в зоне контакта колеса и головки рельса, — одного из важных силовых факторов взаимодействия подвижного состава и элементов верхнего строения железнодорожного пути. Представлена в обобщенном виде совокупность способов экспериментальной оценки боковых сил на основе измерения деформаций рельсов, нашедших применение в работах аттестованных испытательных центров железнодорожной техники России и государств Содружества.

Материалы и методы. В качестве критериев обоснованности выбора референтной методики измерений по совокупности известных экспериментальных методик предлагается принимать статистические оценки погрешности измерений, установленные действующими межгосударственными нормативными актами.

Определение референтной методики измерений предполагает проведение целенаправленных экспериментов с аналогичными условиями, в том числе по типам испытуемого подвижного состава, параметрам устройства и конструкции верхнего строения пути измерительного участка, метеорологическим параметрам и др. В соответствии с требованиями нормативных документов Росстандарта применяются процедуры, которые наряду с требованиями, предъявляемыми к условиям проведения экспериментов, включают в себя также выбор и обоснование опорного значения измеряемого показателя, сравнения статистических оценок погрешности измерения боковых сил.

Результаты. Представлены условия проведения калибровочных экспериментов. Описаны способы статистической обработки экспериментальной информации различных рассмотренных методик измерения боковых сил, позволяющих обосновать выбор референтной методики измерений.

Обсуждение и заключение. Представленный способ определения референтной методики измерения боковых сил воздействия колеса на головку рельса по деформациям рельса учитывает требования нормативных документов Росстандарта и может найти применение при экспериментальном оценивании показателей взаимодействия в механической системе «колесо — рельс».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подвижной состав, условия обращения подвижного состава, измерительные участки пути, референтная методика измерений, боковые силы, погрешность измерений

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.1.032

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113

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



PROPOSALS FOR DEVELOPMENT OF A REFERENCE METHOD FOR MEASURING LATERAL FORCES

Alexander M. Brzhezovskiy

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the prerequisites for choosing the most expedient reference method of experimental determination (measurement) of the lateral (horizontal transverse) force acting in the contact zone of the wheel and the rail head in relation to the procedure for establishing the conditions for the circulation of rolling stock on the railway network. This is one of the important force factors of the interaction of the rolling stock with the elements of the permanent way of the railway track. The author presents a set of methods for experimental evaluation of lateral forces based on the measurement of rail deformations, which were applied in the works of certified testing centres for railway equipment in Russia and the Commonwealth states.

Materials and methods. Based on a set of known experimental techniques, the author proposed to take statistical estimates of the measurement error established by the current interstate regulations as criteria for the validity of the choice of a reference measurement technique. Determination of the reference measurement technique involves conducting purposeful experiments with similar conditions, including the types of rolling stock under test, the parameters of the device and structure of the permanent way of the measured section, meteorological parameters, etc. The author has applied the procedures that include the choice and justification of the reference value of the measured indicator, comparison of statistical estimates of the measurement error of lateral forces along with the requirements imposed on the conditions for conducting experiments in accordance with the requirements of regulatory documents of Rosstandart.

Results. As a result, the author described the methods for statistical processing of experimental information of various considered techniques for measuring lateral forces, which enabled to justify the choice of the reference measurement technique.

Discussion and conclusion. The presented method for determining the reference method for measuring the lateral forces of the impact of the wheel on the rail head according to the deformations of the rail considers the requirements of the regulatory documents of Rosstandart and can be used in the experimental evaluation of interaction indicators in the mechanical wheel – rail system.

KEYWORDS: rolling stock, rolling stock circulation conditions, measuring track sections, reference measurement technique, lateral forces, measurement error

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: 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>.

Введение. Концепция проведения комплексных исследований процессов взаимодействия в системе «колесо — рельс», проводимых как с целью установления безопасных условий движения подвижного состава на железнодорожном пути в рамках приемочных испытаний, так и с целью подтверждения соответствия объектов железнодорожного транспорта требованиям технических регламентов ТР ТС 001/2011 [1] и ТР ТС 002/2011 [2], в существенной части основана на оценке боковых сил. Боковая сила представляет собой проекцию пространственной силы, действующей в зоне контакта колеса и головки рельса в горизонтальной поперечной плоскости. Исходя из определения термина «боковая сила» по ГОСТ Р 55050–2012 [3], экспериментальному исследованию подлежит условный силовой фактор, воздействие которого на железнодорожный путь приводит к реальным негативным последствиям — деформациям элементов верхнего строения пути, интенсивному накоплению этих деформаций, потере поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и др. Первые попытки нормирования боковых сил на отечественных железных дорогах, вероятно, относятся к концу 50-х — началу 60-х гг. прошлого века [4, 5], но актуальность этих нормативов подтверждается и современными требованиями эксплуатации путевой инфраструктуры.

Прямое измерение боковых сил техническими средствами, смонтированными на подвижном составе (например, тензометрические колесные пары или колесные блоки), сопряжено с высокой технической сложностью, что затрудняет практическое применение для оперативного осуществления указанных выше целей. Установлено, что наиболее целесообразным является косвенная оценка боковых сил по деформациям рельса: поперечного или продольного изгиба шейки рельса, а также растяжения-сжатия головки и кромок подошвы рельса. В связи с многообразием методик косвенной оценки боковых сил по экспериментально измеренным деформациям рельса актуальным является выбор таких методик, которые дают наилучшие приближения к фактически действующим силовым факторам и имеют минимально возможные погрешности измерений. Настоящее исследование проведено с целью формирования предложений к разработке референтной методики измерений (РМИ) на основе обобщения широко применяемых и перспективных методик измерения боковых сил.

Материалы и методы. Согласно положениям Федерального закона от 21.07.2014 г. № 254 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» [6] «РМИ — аттестованная методика (метод) измерений, используемая для оценки правильности результатов измерений, полученных

с использованием других методик (методов) измерений одних и тех же величин». РМИ должны соответствовать действующим нормативным документам государственной системы обеспечения единства измерений, объекту измерений с целью его надлежащей идентификации, измеряемым величинам (показателям), единице измерения и диапазону измерения, точности измерений.

Для описания точности метода измерений используют термин «правильность». Правильность характеризует степень близости среднего арифметического значения измеряемого показателя по большому числу результатов измерений к истинному или принятому опорному значению показателя и выражается в терминах систематической погрешности (смещения). Метрологические характеристики «точность» и «правильность» РМИ принимаются согласно определениям, введенным семейством стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 [7]. РМИ — это «тщательно изученная методика выполнения измерений, позволяющая получить значения, имеющие неопределенность измерения (u_a), соразмерную с предполагаемым их использованием, особенно при оценке других процедур измерения той же величины...» [8]. Рассмотрим возможные направления выбора РМИ с оценкой неопределенности измерения u_a применительно к задаче экспериментального определения боковых сил по деформациям рельса.

На начальном этапе выбора РМИ решается задача обоснования величин истинного значения показателя — боковой силы. Однако истинное значение боковой силы является неопределенным из-за условного характера и отсутствия физического эталона этого показателя. В связи с этим в соответствии с рекомендацией ГОСТ Р ИСО 5725-6–2002 допускается использовать вместо истинного значения измеряемой величины его опорное значение, т. е. такое значение, которое может быть использовано как количественный эталон для сопоставления со значениями величин того же рода [7]. Следовательно, для разработки РМИ требуется для каждого конкретного условия проведения измерений боковой силы F_y (тип подвижного состава, порядковый номер следования колесной пары в экипаже, план линии, скорость и направление движения и т. д.) принимать соответствующее этому конкретному условию опорное значение $\langle F_y \rangle$.

Величину $\langle F_y \rangle$ целесообразно принимать либо по результатам моделирования, либо на основе экспериментальной косвенной оценки боковой силы. В последнем случае целесообразно использовать надежные экспериментальные данные, например получаемые путем суммирования рамной силы Y_p и силы трения [4]:

$$\langle F_y \rangle \approx Y_p + \mu P, \quad (1)$$

где μ — коэффициент трения (для экспериментальной оценки боковых сил принимается равным 0,2); P — статическая нагрузка колеса подвижного состава на рельс, кН, определяемая с учетом требований ГОСТ 33760–2016 [9].

Существенным является то, что измерение рамных сил на подвижном составе вполне надежно в связи с наличием реального эквивалента силы, подтвержденного путем физической калибровки тензометрической схемы или датчика рамной силы. Применение экспериментальной оценки рамной силы в качестве исходного достоверного показателя для определения $\langle F_y \rangle$ является вполне оправданным. Проведенными исследованиями установлена тесная корреляционная связь экспериментальных значений боковых и рамных сил. Так, коэффициенты корреляции для локомотивов различных типов составляют от 0,56 до 0,90 [10], для груженых грузовых вагонов на тележках модели 18-100 от 0,70 до 0,90 [11]. Кроме того, регламентированные стандартами [12, 13] погрешности существующих методов регистрации рамных сил на основе измерения деформаций рам тележек или относительных горизонтальных поперечных перемещений упругих элементов рессорного подвешивания составляют $\pm 1...5\%$ по грузовым и пассажирским вагонам и не более $\pm 10\%$ для моторвагонного подвижного состава и локомотивов.

Стоит отметить, что произведение μP в связи со случайным характером коэффициента трения обладает существенной неопределенностью. Пределы изменения μ по различным источникам могут составлять от 0 до 50% относительно некоторого наперед заданного расчетного значения. В связи с этим при разработке РМИ следует учитывать необходимость адекватной оценки μ в соответствии с конкретными условиями измерения боковых сил.

По результатам обобщения и ранжирования совокупности факторов, влияющих на количественную оценку μ , проведенных проф. Ю. М. Лужновым [14], установлено, что наиболее значимыми факторами являются давление в контакте колеса и рельса, скорость движения и фактическая площадь контакта. При этом для железнодорожного экипажа с нагрузкой на ось 23 тс существует количественная оценка $\mu_p \approx 0,28$, подтвержденная экспериментально с применением трибометра на рельсах при неизменных внешних условиях. Поэтому при проведении сравнительных экспериментов представляется целесообразным использовать железнодорожный экипаж со статической нагрузкой на ось 23 тс, при движении которого по измерительному участку пути одновременно регистрировать угол набегания колеса на рельс α

с использованием функциональной зависимости коэффициента трения $\mu_\alpha(\alpha)$ [15].

Для определения $\langle F_y \rangle$ рекомендуется

$$\mu = 0,5(\mu_p + \mu_\alpha). \quad (2)$$

Определение α проводится, например, с применением экспериментальной методики, апробированной канд. техн. наук А. В. Заверталоком для исследований параметров трения в скользюнах трехэлементных тележек модели 18-100 [16]. Методика основана на определении суммы углов поворота тележки относительно кузова и колесной пары относительно рамы тележки с учетом «забега» боковых рам тележки, т. е. учитывается фактическое состояние тележек вагона.

Установление опорного значения боковой силы способом (1) реализуется с применением принципа комплексности измерения показателей динамических качеств подвижного состава и его воздействия на путь. Методика комплексных испытаний (измерений) предполагает определение совокупности опорных значений боковых сил $\langle F_y \rangle_{ij}$, соответствующих установленным программой испытаний факторам, например количеству измерительных участков пути i и диапазону скоростей движения j . Предварительно выбираются такие измерительные сечения на пути, при проследовании которых испытуемым подвижным составом регистрируются наибольшие (по модулю) амплитуды рамных сил [17]. Количество таких сечений на протяжении одного измерительного участка пути длиной 25 м должно быть не менее четырех.

Все известные к настоящему времени методы экспериментальной оценки боковых сил на основе регистрации деформаций рельса содержат систематическую погрешность, обусловленную объективной реальностью — наличием функциональной связи боковых и вертикальных сил в контакте колеса и рельса в каждый момент времени. В связи с этим возможность применения любого метода экспериментальной оценки боковых сил по деформациям рельса обусловлена практически реализуемым способом компенсации влияния вертикальной силы F_z и эксцентриситета ее точки приложения к головке рельса e на результат измерения боковой силы. Решение о выборе РМИ может быть принято на основе сравнения статистических оценок погрешности измерения с принятыми для исследования соответствующими оценками опорных значений боковых сил.

Предлагаются следующие этапы разработки РМИ:

- 1) выбор измерительных участков пути и оборудование их тензометрическими схемами, соответствующими альтернативным методикам экспериментальной оценки боковых сил;
- 2) калибровка тензометрических схем;

3) отбор и оборудование железнодорожного подвижного состава; условия проведения эксперимента;

4) обработка динамических процессов с определением F_{yij} , μ_{ij} и $\langle F_y \rangle_{ij}$; обоснование выбора РМИ.

Рассмотрим содержание работ по реализации перечисленных этапов.

Выбор измерительных участков пути и оборудование их тензометрическими схемами, соответствующими альтернативным методикам экспериментальной оценки боковых сил. Сравнительные эксперименты могут быть проведены на двух-трех смежных рельсовых звеньях длиной 25 м с рельсами типа Р65, имеющих фактический эксплуатационный износ головки и расположенных, например, в пределах круговой кривой радиусом 650 м на 16/17 км перегона Ханская — Майкоп Скоростного испытательного полигона АО «ВНИИЖТ». На шейке, кромках подошвы и головке рельса в шести расположенных

последовательно шпальных ящиках наружной рельсовой нити круговой кривой монтируются схемы тензорезисторов (измерительные сечения), реализующие альтернативные методы измерения боковых сил в соответствии с табл. 1. В перечень не включена методика кусочно-непрерывной регистрации боковых сил [18], что обусловлено невозможностью однозначного определения $\langle F_y \rangle$ по длине участка регистрации. Из табл. 1 видно, что некоторые методы (методики) измерения боковых сил имеют официальное утверждение органами метрологии Российской Федерации — № 1 и 6. Еще один метод (№ 3) запатентован. Монтаж тензометрических схем на рельсах измерительных сечений иллюстрируется рис. 1–7.

Суть метода № 1 (рис. 1 [19]) заключается в использовании имеющейся прямой пропорциональной зависимости боковых сил от разности изгибающих моментов, действующих на взаимно симметричные

Таблица 1

Альтернативные методики измерения боковых сил с использованием тензодатчиков, смонтированных на рельсе

Table 1

Alternative methods for measuring lateral forces using rail mounted strain gauges

№ метода	Метод измерения	Количество тензодатчиков в одной тензометрической схеме	Количество каналов измерения боковой силы	Источники информации	Примечания
1	Метод измерения напряжений поперечного изгиба в шейке рельса по разности изгибающих моментов (метод Шлупфа)	4	1, полный мост Уитстона	[4, 20]	Метод регламентирован ГОСТ Р 55050–2012
2	То же с применением шунтирующих резисторов	6	То же	[19]	
3	То же с применением метода двойного моста	8	То же	[21]	Патент «Устройство для определения давления колеса на рельс» — А.с. SU 1794740, Бюл. № 6, 15.02.1993
4	Метод измерения напряжений в кромках подошвы рельса и в наружной части головки рельса («трехточечный» метод О. П. Ершкова)	2	3, ½ моста с температурной компенсацией	[22]	
5	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса датчиками, расположенными вдоль оси кручения рельса	2	1, ½ моста с температурной компенсацией	[23]	
6	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса с последующей обработкой результатов с применением псевдоматриц — метод «РЖД-2016»	2	4	[24]	Методика «РЖД-2016», свидетельство об аттестации от 30.08.2019 № 103-200RA.RU/311787–2016/2019
7	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса с компенсацией напряжений вертикального изгиба	2	3, ½ моста с температурной компенсацией	[25]	

относительно нейтральной оси шейки рельса точки *A* и *C* поперечного сечения рельса. В качестве измерителя используется полный мост Уитстона с температурной самокомпенсацией. Изгибающие моменты относительно точек *A* и *C* шейки рельса от действия боковой силы F_y и приложенной к головке рельса в точке с эксцентриситетом e вертикальной силы F_z можно записать в виде

$$M_A = F_y l_1 - F_z e; M_C = F_y l_2 - F_z e, \quad (3)$$

где l_1, l_2 — расстояния от плоскости приложения боковой силы F_y до точек *A* и *C* поперечного сечения рельса, м.

Тогда

$$F_y = (M_C - M_A) / (l_2 - l_1). \quad (4)$$

Схема непосредственно определяет боковые силы в местной системе координат рельса и теоретически не может давать существенную ошибку, обусловленную наличием эксцентриситета e .

Методы № 2 и 3 также основаны на применении для измерений боковой силы моста Уитстона (рис. 1). При этом с целью исключения влияния на результаты измерения систематической погрешности, которая может возникнуть в связи с влиянием на результаты измерений эксцентриситета e , предложены варианты модернизации тензометрических схем. Так, в схеме, формируемой по методу № 2, используются шунтиру-

ющие тензорезисторы $R_{ш}$, подключаемые параллельно тензорезисторам 1 и 2 верхнего пояса шейки рельса (рис. 1), равные [19]

$$R_{ш} = R / (k - 1); k = (\xi_{A_i} - \xi_{A_a}) / (\xi_{C_i} - \xi_{C_a}), \quad (5)$$

где $\xi_{A_i}, \xi_{A_a}, \xi_{C_i}, \xi_{C_a}$ — деформации верхнего (сечение *A*) и нижнего (сечение *C*) пояса шейки рельса с внутренней i (тензорезисторы 1, 3 и 5) и наружной стороны a (тензорезисторы 2, 4 и 6); k — корректирующий коэффициент.

Суть метода № 3 заключается в реализации различающихся по величине напряжений питания мостов U_{e1} и U_{e2} , при этом $U_{e1} / U_{e2} \approx \xi_1 / \xi_2 \approx m$, где ξ_1 и ξ_2 — деформации в сечениях *A* и *C* шейки рельса (рис. 1).

Для реализации этой схемы требуется подключить дополнительный блок питания с плавной регулировкой напряжения к одной из схем, например U_{e2} (рис. 2). Питание первой схемы и снятие полезного сигнала производится с помощью штатного мостового тензометрического кабеля, а регулировка напряжения питания второй схемы должна компенсировать влияние вертикальной силы, приложенной эксцентрично к головке рельса. Соотношение напряжений U_{e1} и U_{e2} определяется в процессе калибровочного эксперимента.

Метод № 4 («трехточечный» метод О. П. Ершкова) основан на измерении деформаций головки и кромок подошвы рельса (рис. 3). Алгебраическая комбинация напряжений, возникающих в этих точках поперечного сечения рельса, пропорциональна боковой силе [22]:

$$F_y = 4W_z K_y (A_1 \sigma_{пнар} + A_2 \sigma_{пвн} + A_3 \sigma_{гнар}), \quad (6)$$

где W_z — горизонтальный момент сопротивления рельса относительно волокон подошвы, см³; K_y — коэффициент относительной горизонтальной жесткости рельса и подрельсового основания с учетом трения в горизонтальной плоскости, 1/см; $\sigma_{пнар}, \sigma_{пвн}, \sigma_{гнар}$ — экспериментальные значения напряжений соответственно в наружной и внутренней кромке подошвы рельса и в наружной грани головки рельса, МПа; A_1, A_2, A_3 — коэффициенты, определяемые геометрическими параметрами поперечного сечения рельса.

Измерения напряжений $\sigma_{пнар}, \sigma_{пвн}, \sigma_{гнар}$ производятся с применением полумостовых и полных мостовых тензометрических схем с температурной компенсацией или без нее, формируемых на наружной и внутренней кромках подошвы рельса в одном его поперечном сечении. Для оценки напряжения в наружной грани головки рельса тензорезистор наклеивают на наружной поверхности головки рельса с расположением центра датчика на уровне 13 мм от верхней поверхности рельса. При использовании температурной компенсации активные тензорезисторы

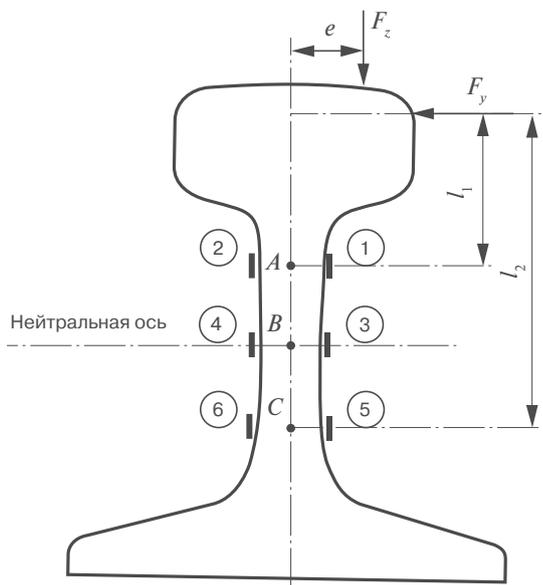


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на шейке рельса: 1–6 — номера тензорезисторов

Fig. 1. Diagram of locations of strain gauges on the rail web: 1–6 — numbers of strain gauges

ориентируют параллельно продольной оси рельса, а компенсационные могут наклеиваться как на рельс перпендикулярно продольной оси, так и на компенсационную колодку, изготовленную из рельсовой стали. При использовании тензометрических схем без температурной компенсации необходимо применять измерительную аппаратуру, позволяющую перед каждым заездом проводить аппаратную или программную балансировку нуля. Активные тензорезисторы наклеивают таким образом, чтобы рабочая ось датчика располагалась на расстоянии не более 5 мм от наружной и внутренней кромок подошвы рельса.

При оборудовании тензометрической схемы по методу № 5 тензорезисторы монтируются с правой и левой стороны шейки рельса горизонтально вдоль его оси кручения (ось кручения рельса Р65 расположена на расстоянии 39,4 мм от подошвы рельса) в одном его поперечном сечении (рис. 4). Деформации шейки рельса регистрируются с применением полумостовой тензометрической схемы с температурной самокомпенсацией с активными датчиками в плечах моста.

Монтаж тензорезисторов при оборудовании шейки рельса по методу № 6 производится по аналогии с методом № 1 (рис. 1). Измеряются три компонента суммарной нагрузки на рельс, действующей от колеса подвижного состава: вертикальная сила, боковая сила и опрокидывающий момент. Метод основан на том, что тензорезисторы, наклеенные в четырех зонах шейки рельса, соединяют в измерительные мосты. Каждый мост подключают к отдельному измерительному каналу тензометрической аппаратуры, позволяющей регистрировать отклик в измерительных каналах на приращение входных факторов. Монтаж тензорезисторов при оборудовании шейки рельса по методу № 7 производится по схеме, представленной на рис. 5.

В местах, обозначенных цифрами 1, 2 и 3 на рис. 5, наклеиваются по два тензорезистора, ориентированных по горизонтальной и вертикальной осям поперечного сечения рельса. Тензорезисторы попарно объединяются в три полумостовые схемы с температурной компенсацией. Экспериментальная оценка боковых сил вычисляется по результатам обработки откликов тензометрических схем при их калибровке на приложение различных сочетаний вертикальных и горизонтальных нагрузок на головку рельса в оборудованном тензорезисторами сечении рельса.

Калибровка тензометрических схем и применение специальных алгоритмов обработки. Калибровочные эксперименты при измерениях деформаций рельса методами № 1–3 и 5 проводятся посредством нагружения поперечных сечений рельса в местах, оборудованных тензометрическими схемами, одновременно по направлениям двух координат — вертикальному и

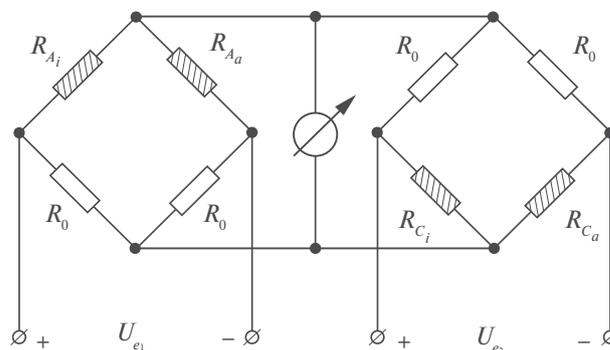


Рис. 2. Тензометрическая схема, реализующая метод № 3

Fig. 2. Strain gauge layout that implements the method No. 3

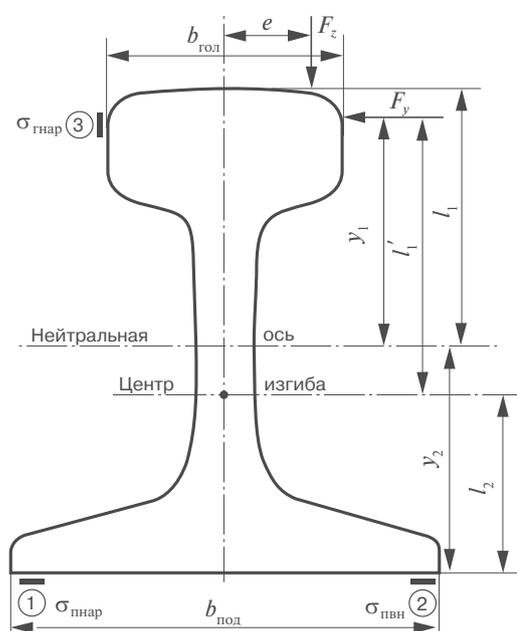


Рис. 3. Монтаж тензорезисторов на рельсе по методу № 4:
1, 2, 3 — номера тензорезисторов

Fig. 3. Installation of strain gauges on the rail according to the method No. 4:
1, 2, 3 — numbers of strain gauges

горизонтальному поперечному. Вертикальная нагрузка величиной до 60–80 кН прикладывается к головке рельса через стальной адаптер, геометрические размеры которого имитируют стадию набегания гребня колеса на головку рельса с полной выборкой зазоров. При этом $e \neq 0$. Горизонтальная нагрузка наибольшей величиной 0–60 кН прикладывается к головке рельса (в средней части на уровне не менее 20 мм от верха головки) после приложения вертикальной нагрузки ступенями по 20 кН. Преимуществом этих методов является возможность непосредственного, без дополнительного пересчета, использования масштабов регистрации боковой силы, определенных по результатам

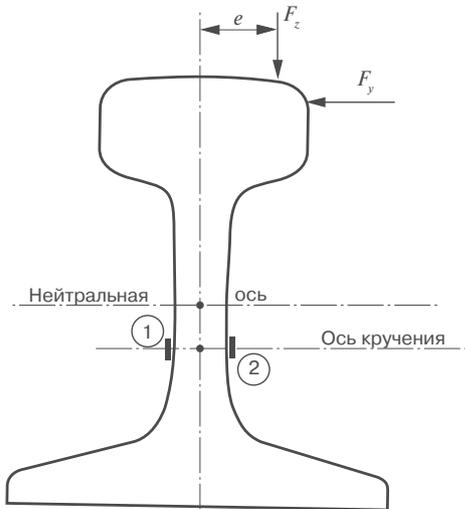


Рис. 4. Монтаж тензорезисторов на рельсе по методу № 5:
1, 2 — номера тензорезисторов

Fig. 4. Installation of strain gauges on the rail according to the method No. 5:
1, 2 — numbers of strain gauges

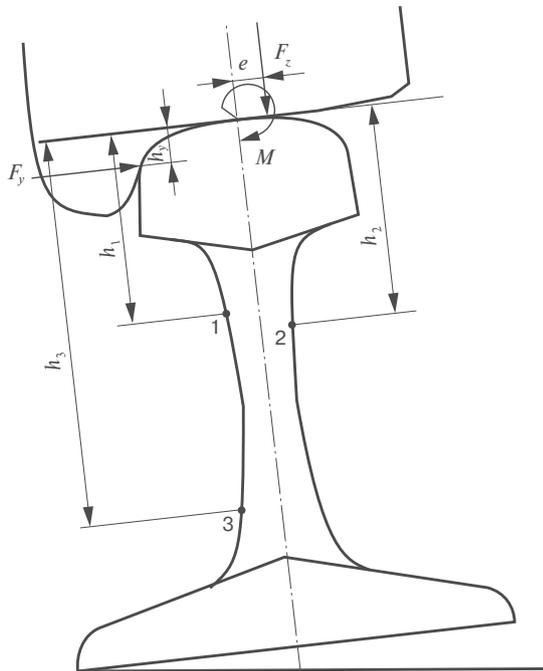


Рис. 5. Монтаж тензорезисторов в сечениях 1, 2 и 3 на шейке рельса
Fig. 5. Installation of strain gauges in 1, 2 and 3 sections on the rail web

калибровочного эксперимента, для оценки амплитуд боковой силы в натурном эксперименте.

Обработка результатов калибровочного эксперимента при реализации методов № 1–3 и 5 происходит следующим образом: в процессе каждого этапа калибровки после приложения полной вертикальной нагрузки к головке рельса непосредственно перед при-

ложением горизонтальной нагрузки производится балансировка канала регистрации боковой силы. Перед проведением балансировки фиксируются отклики канала регистрации боковой силы на воздействие максимальной вертикальной силы на каждом k -м этапе калибровки, исключаемые при балансировке канала регистрации боковой силы ρ_{qk} .

Масштаб обработки канала регистрации боковой силы $M_{ш}$ вычисляется как среднее арифметическое значение масштабов по k этапам калибровочного эксперимента:

$$M_{ш} = \left(\sum M_{qk} \right) / n_{qk} = \left(\sum (F_{y \max qk} / \delta_{qk}) \right) / n_{qk}, \text{ кН/мВ/В}, \quad (7)$$

где $F_{y \max qk}$ — наибольшая горизонтальная сила при калибровке, кН; δ_{qk} — отклик канала регистрации, соответствующий наибольшей горизонтальной силе по всей совокупности q циклов и k этапов калибровочного эксперимента; n_{qk} — общее количество нагружений по калибровочному эксперименту в целом.

При использовании метода № 3 соотношение напряжений U_{e1} и U_{e2} в процессе калибровочных нагружений определяется для каждого q -го цикла нагружения на каждом k -м этапе калибровки:

$$\left(U_{e1} / U_{e2} \right)_{qk} = m_{qk}. \quad (8)$$

По результатам калибровочного эксперимента величина m вычисляется как среднее арифметическое значение, устанавливаемое на весь период использования канала регистрации:

$$m = \sum m_{qk} / n_{qk}. \quad (9)$$

Масштаб записи боковой силы по каналу регистрации вычисляется на основании соотношения (7).

При применении метода № 4 электрическая калибровка каналов регистрации напряжений $\sigma_{пнар}$, $\sigma_{пвн}$ и $\sigma_{гнар}$ производится последовательно путем шунтирования каждого канала регистрации активным сопротивлением, эквивалентным величине напряжения, равной $\sigma_k \approx 240$ МПа (для полумостовой схемы с тензорезисторами, имеющими активное сопротивление в плече $R_n \approx 200$ Ом и коэффициент тензочувствительности $K_T \approx 2,2$, активное сопротивление шунта составляет $R_{ш} \approx 1000$ Ом). Масштабы записи напряжений по каждому каналу регистрации при этом составляют

$$M_{ТТ} = \sigma_k / \delta_k, \text{ МПа/мВ/В}, \quad (10)$$

где δ_k — отклик канала регистрации при электрической калибровке.

По аналогии с методом № 1 в процессе каждого этапа калибровочного эксперимента после приложения полной вертикальной нагрузки к головке рельса непосредственно перед приложением горизонтальной нагрузки производится балансировка каналов регистрации напряжений $\sigma_{\text{пнар}}$, $\sigma_{\text{пвн}}$ и $\sigma_{\text{гнар}}$. Перед проведением балансировки фиксируются отклики каналов регистрации напряжений на воздействие максимальной вертикальной силы на каждом k -м этапе калибровки, исключаемые при балансировке канала регистрации боковой силы ρ_{qk} .

Измеренная по результатам калибровочного эксперимента величина боковой силы определяется по выражению (6) с учетом масштабов записи напряжений (10) по каждому каналу регистрации.

Для получения связи между показаниями тензорезисторов и нагрузками при экспериментальной оценке боковых сил по методу № 6 «РЖД-2016» [24] проводятся калибровочные эксперименты, включающие в себя следующие варианты нагружения измерительного сечения рельса:

- 1) вертикальной силой в середине головки рельса F_z^{T1} ;
- 2) одновременно вертикальной силой в середине головки рельса F_z^{T2} и боковой силой F_y^{T2} ;
- 3) вертикальной силой, смещенной на величину e наружу от середины головки рельса F_{zH}^{T3} ;
- 4) вертикальной силой, смещенной на величину e внутрь от середины головки рельса F_{zB}^{T4} .

Результаты показаний тензорезисторов S заносятся в табл. 2. Используя линейную суперпозицию, получаем матрицу $[G]$ для искомых силовых факторов (табл. 3).

В матричном виде можно записать

$$\{S(t)\} = \begin{Bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \\ s_4(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_z(t) \\ F_y(t) \\ M_x(t) \end{Bmatrix} = [G]\{F(t)\}. \quad (11)$$

Таблица 2

Показания тензорезисторов при тарировочных экспериментах

Table 2

Indications of strain gauges during gauging experiments

Номер тензорезистора	$F_z^{T1} = 10 \text{ тс}$	$F_z^{T2} = 10 \text{ тс}$ $F_y^{T2} = 10 \text{ тс}$	$F_{zH}^{T3} = 10 \text{ тс}$	$F_{zB}^{T4} = 10 \text{ тс}$
1	S_1^{T1}	S_1^{T2}	S_1^{T3}	S_1^{T4}
2	S_2^{T1}	S_2^{T2}	S_2^{T3}	S_2^{T4}
3	S_3^{T1}	S_3^{T2}	S_3^{T3}	S_3^{T4}
4	S_4^{T1}	S_4^{T2}	S_4^{T3}	S_4^{T4}

Таблица 3

Коэффициенты матрицы $[G]$ при четырех калибровочных экспериментах

Table 3

Matrix coefficients $[G]$ for four calibration experiments

Номер эксперимента	$F_z = 1 \text{ тс}$	$F_y = 1 \text{ тс}$	$M = 1 \text{ тс} \cdot \text{мм}$
1	$g_{11} = s_1^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{21} = (s_1^{T2} - g_{11} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{31} = (s_1^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_1^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
2	$g_{12} = s_2^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{22} = (s_2^{T2} - g_{12} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{32} = (s_2^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_2^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
3	$g_{13} = s_3^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{23} = (s_3^{T2} - g_{13} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{33} = (s_3^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_3^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
4	$g_{14} = s_4^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{24} = (s_4^{T2} - g_{14} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{34} = (s_4^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_4^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$

Вычислив псевдообратную матрицу $[G]$, матрицу $[G]^+ = ([G]^T[G])^{-1}[G]^T$, получим возможность определения (восстановления) силовых факторов по показаниям тензодатчиков:

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_z(t) \\ F_y(t) \\ M_x(t) \end{Bmatrix} = [G]^+ \{S(t)\}. \quad (12)$$

При проведении калибровочных экспериментов целесообразно использовать приспособление (стенд), разработанное АО «ВНИКТИ» [24].

Метод № 7 предполагает проведение следующей процедуры калибровочного эксперимента [25]. При расположении тензометрических схем № 1 и 3 с внутренней стороны рельса, а № 2 — с наружной (рис. 5) выражения для определения напряжений σ_i в i -х ($i = 1, 2, 3$) сечениях шейки рельса имеют вид

$$\sigma_i = a_i F_z + (-1)^i b_i F_y + (-1)^i c_i M, \quad (13)$$

где коэффициенты влияния равны $a_i = K_{F_{z_i}} / \varphi_i$, $b_i = K_{Y_i} (h_i - h_y) / W_i$, $c_i = K_{M_i} / W_i$; $K_{F_{z_i}}$, K_{Y_i} , K_{M_i} — коэффициенты передачи; φ_i — площадь соответствующего сечения шейки рельса; W_i — момент сопротивления в данном сечении; h_i — расстояние от поверхности катания на головке рельса до центра измерительного тензорезистора в i -м сечении шейки рельса; h_y — расстояние от поверхности катания рельса до точки приложения боковой силы.

В процессе калибровки производятся нагружения головки рельса:

- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 0$ и $e = 0$; в этом случае $a_i = \sigma_i / F_z$;
- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 0$ и $e \neq 0$; в этом случае $c_i = (\sigma_i - a_i F_z) / (-1)^i M$;
- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 50 - 60$ кН и $e \neq 0$; в этом случае $b_i = (\sigma_i - a_i F_z) / (-1)^i F_y$.

По результатам калибровки формируется система трех уравнений с тремя неизвестными силовыми параметрами (13). Поскольку определение боковой силы производится в результате решения системы уравнений, результаты замеров не зависят от мест наклейки и коэффициентов передачи тензорезисторов.

Решение системы трех линейных уравнений для определения величины сил взаимодействия в зависимости от напряженного состояния рельса в рассматриваемом его сечении имеет вид

$$\begin{aligned} F_z &= A_{F_{z1}} S_1 + B_{F_{z2}} S_2 + C_{F_{z3}} S_3; \\ F_y &= A_{F_{y1}} S_1 + B_{F_{y2}} S_2 + C_{F_{y3}} S_3; \\ M &= A_{M1} S_1 + B_{M2} S_2 + C_{M3} S_3, \end{aligned} \quad (14)$$

где S_i — показания i -го датчика под действующей в рассматриваемом сечении рельса системой нагрузок.

Коэффициенты матрицы (14) определяются решением уравнений (13) либо по формулам Крамера, либо как элементы псевдообратной матрицы.

Систематическая погрешность измерения боковой силы, обусловленная влиянием эксцентриситета точки приложения вертикальной силы, исходя из того, что совокупные технологические случайные погрешности измерений идентичны для всех рассматриваемых методов экспериментального определения боковых сил, определяется выражением

$$\gamma = \left(\sum (p_{gk} / \delta_{gk}) / n_{gk} \right) \cdot 100\%. \quad (15)$$

Отклики p_{gk} и δ_{gk} при проведении калибровочного эксперимента по методам № 1–3 и 5 вычисляются либо в размерности канала регистрации (мВ/В), либо в натуральной размерности (кН) с использованием соответствующих масштабных коэффициентов $M_{ш}$ (7).

По результатам калибровочного эксперимента по методу № 4 отклики p_{gk} и δ_{gk} вычисляются в натуральной размерности (кН) с использованием выражения (6) и масштабного коэффициента $M_{ТТ}$ (10). Предварительное определение систематической погрешности измерений боковых сил, проводимых по методу № 6, выполненное по результатам математического эксперимента на моделях, составило $\leq 4\%$ [25]. В процессе аттестации метода № 7 установлено, что относительная погрешность измерения боковой силы составила 11%.

Отбор и оборудование железнодорожного подвижного состава. Условия проведения эксперимента. В качестве опытного подвижного состава выбирается из эксплуатации один полувагон на тележках модели 18-100, находящийся в исправном техническом состоянии и загруженный до статической нагрузки на ось 23 тс. Проводится поколесное взвешивание опытного полувагона. Формируется опытный поезд, состоящий из двух электровозов, находящихся в голове и хвосте состава, двух порожних вагонов прикрытия (полувагона или платформы на тележках модели 18-100), опытного полувагона и вагона-лаборатории (рис. 6).

Тележки опытного полувагона оборудуются тензометрическими схемами и датчиками для регистрации рамных сил, углов поворота тележек относительно кузова и колесных пар относительно рамы тележки с учетом «забега» боковых рам тележки. Применяется дополнительное оборудование для идентификации реализаций динамических процессов на вагоне в соответствии с тензометрическими схемами на измерительных сечениях. Для экспериментальной оценки динамических процессов целесообразно использовать

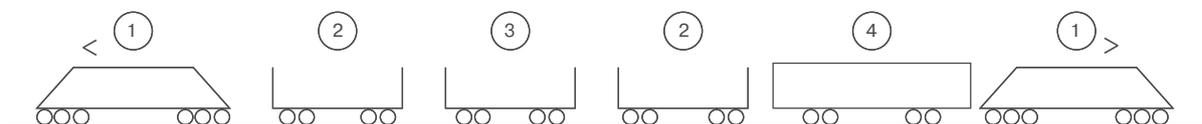


Рис. 6. Схема опытного поезда:
1 — электровоз; 2 — порожний вагон прикрытия; 3 — груженный вагон прикрытия; 4 — вагон-лаборатория

Fig. 6. Diagram of the experimental train:
1 — electric locomotive; 2 — empty cover car; 3 — laden cover car; 4 — laboratory car

лабораторное оборудование и специалистов одного испытательного центра.

Заезды опытного поезда по измерительному участку осуществляются в четном и нечетном направлении со скоростями, обеспечивающими положительные непогашенные ускорения. В пределах каждого i -го измерительного сечения на пути (1, 2, ..., i , ... l) проводятся опытные поездки в режиме челнока в диапазоне скоростей движения $v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m$ с координатной привязкой реализаций рамных сил к границам каждого измерительного участка пути. Опытные поездки проводятся в течение времени одного «окна», выделенного для испытаний в светлое время суток. Минимальное количество выборочных значений боковых сил, рамных сил и углов поворота для каждой скорости движения, обеспечивающее точность измерения среднего значения наибольших наблюдаемых амплитуд в пределах, установленных типовой методикой испытательного центра (Δ_y), определяется выражением [26]:

$$N \geq CS^2 / \Delta_y^2, \quad (16)$$

где S — среднеквадратическое отклонение текущих значений динамического процесса, принимаемое на основании результатов проведенных ранее испытаний близкого по конструкции подвижного состава; C — постоянный множитель, равный 6,25 для доверительной вероятности 0,994.

Обработка динамических процессов с определением F_{yij} , μ_{ij} и $\langle F_y \rangle_{ij}$. Обоснование выбора РМИ. По результатам обработки рамных сил $Y_{p_{ij}}$ и углов набегания, относящихся к каждому измерительному сечению на рельсе, в соответствии с выражением (1) с учетом результатов поколесного взвешивания опытного полувагона определяются опорные значения $\langle F_y \rangle_{ij}$.

Реализации боковых сил, зарегистрированные с применением методов № 1–7, обрабатываются статистически с количественной оценкой неопределенности измерения u_a и среднеквадратического отклонения S_x измеряемой величины [8, 27].

В простейшем случае, когда за результат измерения принимают среднее арифметическое значение измеряемой величины и предварительно исключают-

ся систематические погрешности измерений, производится сравнение оценок u_a и S_x с применением выражений [28]:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (17)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}},$$

где x_i — текущее значение реализации боковых сил, измеренное по оцениваемой методике; \bar{x} — среднее арифметическое значение разностей результатов измерений по оцениваемой методике и соответствующих опорных значений, равное $(F_{yij} - \langle F_y \rangle_{ij})/n$; n — количество измерений по оцениваемой методике после исключения всех выбросов (грубых промахов).

На основании сравнения по выражению (17) количественных значений \bar{x} со значениями $\langle F_y \rangle_{ij}$ по альтернативным методикам формируется суждение о выборе РМИ. По итогам выполненных исследований реализуются подготовительные процедуры по аттестации РМИ порядком, установленным действующим законодательством.

Заключение. Представленный способ определения РМИ боковых сил воздействия колеса на головку рельса по деформациям рельса учитывает требования нормативных документов Росстандарта и может найти применение при экспериментальном оценивании показателей взаимодействия в механической системе «колесо — рельс».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 001/2011: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М., 2011. 66 с.
2. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 002/2011: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М., 2011. 72 с.
3. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2013–07–01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

4. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения / А. Ф. Золотарский [и др.]; под ред. М. А. Чернышева. М.: Транспорт, 1964. С. 261–263.

5. Технические требования к проектируемым локомотивам по условиям прочности, динамики и воздействия на путь. М.: ВНИИЖТ, 1964. С. 10–11.

6. О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»: федер. закон от 21 июля 2014 г. № Ф3-254 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2014. № 30 (Ч. I). Ст. 4255.

7. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 6. Использование значений точности на практике: дата введения 2002-11-01. М.: Госстандарт России, 2002. 52 с.

8. ГОСТ Р 8.763-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки. Основные положения: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2013-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.

9. ГОСТ 33760-2016. Железнодорожный подвижной состав. Методы контроля показателей развески: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 мая 2016 г. № 350-ст: дата введения 2017-02-01. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

10. Алексеев Г. М. Исследование зависимости боковых и рамных сил локомотивов // Динамические качества и воздействие на путь локомотивов: сб. ст. М.: Транспорт, 1975. С. 78–84. (Труды ВНИИЖТ; вып. 542).

11. Ромен Ю. С., Тихов М. С. Объем информации для установления допустимых скоростей движения по результатам комплексных испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. ст. / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2007. С. 87–94.

12. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2016 г. № 856-ст: дата введения 2017-05-01. М.: Стандартинформ, 2017. 48 с.

13. ГОСТ 34451-2018. Моторвагонный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2019 г. № 192-ст: дата введения 2019-12-01. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

14. Лужнов Ю. М. Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности). М.: Интекст, 2003. 144 с.

15. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 558 с.

16. Завертало А. В. Взаимодействие с рельсовой колеей тележки грузового вагона при износах узлов опирания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М.: ВНИИЖТ, 2002. 23 с.

17. Ромен Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. С. 180–186.

18. Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges // *Révue Générale des Chemins de Fer*. 1987. April. P. 25–32.

19. Решетиллов С. И. Воздействие на стрелочные переводы подвижного состава при различных профилях колесных пар: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. М.: ВНИИЖТ, 1987. 19 с.

20. Schlumpf H. Messungen mit Dehungsmeßstreifen bei den SBB // *Technische Rundschau*. 1955. No. 26. S. 35–41.

21. Влияние вертикальной нагрузки при измерении горизонтальных сил в пути / Э. И. Даниленко [и др.] // Вестник Весоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1979. № 1. С. 41–44.

22. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов // Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути: сб. тр. ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1955. С. 289–327.

23. Ершков О. П. Расчет поперечных горизонтальных сил в кривых. М.: Транспорт, 1966. С. 9. (Труды ВНИИЖТ; вып. 301).

24. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10–15.

25. Ромен Ю. С., Суслов О. А., Баляева А. А. Определение сил взаимодействия в системе колесо — рельс на основе измерения напряжений в шейке рельса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 6. С. 354–361. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>.

26. Вериго М. Ф. Применение математической статистики в обработке опытных данных: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: ВНИИЖТ, 1964. С. 111–112.

27. ГОСТ Р ИСО 15193-2007. Изделия медицинские для диагностики *in vitro*. Измерение величин в пробах биологического происхождения. Описание референтных методик выполнения измерений: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2009-07-01. М.: Стандартинформ, 2008. 20 с.

28. Требования к референтным методикам аналитических измерений в технологических процессах / Р. Ф. Бакеева [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 14. С. 104–110.

REFERENCES

1. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR TS 001/2011 [On the safety of railway rolling stock: technical regulations of the Customs Union: TR CU 001/2011]. Approved by decision of the Commission of the Customs Union on July 15, 2011 No. 710. Moscow; 2011. 66 p. (In Russ.).

2. O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR TS 002/2011 [On the safety of high-speed rail transport: technical regulations of the Customs Union: TR CU 002/2011]. Approved by decision of the Commission of the Customs Union on July 15, 2011 No. 710. Moscow; 2011. 72 p. (In Russ.).

3. GOST R 55050-2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na put' i metody ispytaniy [Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the track and test methods]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2013-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. 24 p. (In Russ.).

4. Zolotarskiy A. F., Verzhinskiy S. V., Ershkov O. P., et al. Zheleznodorozhnyy put' i podvizhnoy sostav dlya vysokikh skorostey dvizheniya [Railway track and rolling stock for high speeds]. Moscow: Transport Publ.; 1964. P. 261–263. (In Russ.).

5. Tekhnicheskie trebovaniya k proektiruemyim lokomotivam po usloviyam prochnosti, dinamiki i vozdeystviya na put' [Technical requirements for the designed locomotives in terms of strength, dynamics and impact on the track]. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1964. P. 10–11. (In Russ.).

6. O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon "Ob obespechenii edinstva izmereniy" [On Amendments to the Federal Law "On Ensuring the Uniformity of Measurements"]. Federal Law of July 21, 2014 No. FZ-254. *Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii = Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2014;30(1):Art.4255. (In Russ.).

7. GOST R ISO 5725-6-2002. Tochnost' (pravil'nost' i pretzionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Ch. 6. Ispol'zovanie znacheniy tochnosti na praktike [Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Part 6. Use of accuracy values in practice]. Introduction date 2002-11-01. Moscow: Gosstandart Rossii Publ.; 2002. 52 p. (In Russ.).

8. GOST R 8.763-2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki. Osnovnye polozheniya [State system for ensuring the uniformity of

measurements. Multiple direct measurements. Processing methods. Basic provisions]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2013-01-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. 20 p. (In Russ.).

9. GOST 33760–2016. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Metody kontrolya pokazatelye razveski [Railway rolling stock. Weighing data control methods]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on May 18, 2016 No. 350-st: introduction date 2017-02-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. 12 p. (In Russ.).

10. Alekseev G. M. Issledovanie zavisimosti bokovykh i ramnykh sil lokomotivov [Investigation of the dependence of lateral and frame forces of locomotives]. Dinamicheskie kachestva i vozdeystvie na put' lokomotivov: sb. st. [Dynamic qualities of locomotives and impact on the rail track: coll. of articles]. Moscow: Transport Publ.; 1975. P. 78–84. (Proceedings of VNIIZhT; issue 542). (In Russ.).

11. Romen Yu. S., Tikhov M. S. Ob'em informatsii dlya ustanovleniya dopustimyykh skorostey dvizheniya po rezul'tatam kompleksnykh ispytaniy [The volume of information for establishing permissible speeds based on the results of complex tests]. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: sb. nauch. st. [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: coll. of scientific articles]. St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2007. P. 87–94. (In Russ.).

12. GOST 33788–2016. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on 19 July, 2016. No. 856-st: introduction date 2017-05-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. 48 p. (In Russ.).

13. GOST 34451–2018. Motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Metodika dinamiko-prochnostnykh ispytaniy [Motorized rolling stock. Methods of dynamic-strength tests]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on 15 May, 2019. No. 192-st: introduction date 2019-12-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 28 p. (In Russ.).

14. Luzhnov Yu. M. Stseplenie koles s rel'sami (priroda i zakonmernosti) [Adhesion of wheels with rails (nature and patterns)]. Moscow: Intext Publ.; 2003. 144 p. (In Russ.).

15. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnoy sostava [Interaction of the railway and rolling stock]. Moscow: Transport Publ.; 1986. 558 p. (In Russ.).

16. Zavertalyuk A. V. Vzaimodeystvie s rel'sovoy koleey telezhki gruzovogo vagona pri iznosakh uzlov opiraniya [Interaction of a freight car bogie with the rail track during wear of support units]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.22.07. Moscow: VNIIZhT Publ.; 2002. 23 p. (In Russ.).

17. Romen Yu. S. Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy kolee. Metody rascheta i ispytaniy [Dynamics of a railway vehicle in a rail track. Methods of calculation and testing]. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. P. 180–186. (In Russ.).

18. Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges. *Révue Générale des Chemins de Fer*. 1987;(April):25-32.

19. Reshetilov S. I. Vozdeystvie na strelchnye perevody podvizhnoy sostava pri razlichnykh profilyakh kolesnykh par [Influence on railroad turnouts of rolling stock with different profiles of wheelsets]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.22.06. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1987. 19 p. (In Russ.).

20. Schlumpf N. Messungen mit Dehungsmessstreifen bei den SBB. *Technische Rundschau*. 1955;(26):35-41.

21. Danilenko E. I., Ryazanova V. A., Fishman I. I., Sopin V. F. Vliyanie vertikal'noy nagruzki pri izmerenii gorizonta'nykh sil v puti [Influence of vertical load when measuring horizontal forces on the way]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1979;(1):41-44. (In Russ.).

22. Ershkov O. P. Ustanovlenie koeffitsientov, uchityvayushchikh bokovoy izgib i kruchenie rel'sov. [Establishment of coefficients accounting for lateral bending and torsion of rails]. Vzaimodeystvie puti i podvizhnoy sostava i voprosy raschetov puti. [Interaction of track and rolling

stock and issues of track calculations]. *Procs. of TsNII MPS*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1955. P. 289–327. (In Russ.).

23. Ershkov O. P. Raschet poperechnykh gorizonta'nykh sil v krivykh [Calculation of transverse horizontal forces in curves]. Moscow: Transport Publ.; 1966. P. 9. (Proceedings of VNIIZhT; issue 301). (In Russ.).

24. Gapanovich V. A. Voprosy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii [Issues of interaction between rolling stock and infrastructure in heavy-haul traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2016;(10):10-15. (In Russ.).

25. Romen Yu. S., Suslov O. A., Balyaeva A. A. Opreделение sil vzaimodeystviya v sisteme koleso — rel's na osnove izmereniya napryazheniy v sheyke rel'sa [Determining the force of interaction in a wheel—rail system based on measuring stresses in rails neck]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2017;76(6):354-361. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>. (In Russ.).

26. Verigo M. F. Primenenie matematicheskoy statistiki v obrabotke opytnykh dannykh: ucheb.-metod. posobie [Application of mathematical statistics in the processing of experimental data: textbook]. Novosibirsk: NIIZhT Publ.; 1964. P. 111–112. (In Russ.).

27. GOST R ISO 15193–2007. Izdeliya meditsinskie dlya diagnostiki in vitro. Izmerenie velichin v probakh biologicheskogo proiskhozhdeniya. Opisaniye referentnykh metodik vypolneniya izmereniy [Medical products for in vitro diagnostics. Measurement of quantities in samples of biological origin. Description of reference methods for performing measurements]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2009-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. 20 p. (In Russ.).

28. Bakeeva R. F., Ryazanova V. A., Fishman I. I., Sopin V. F. Trebovaniya k referentnym metodikam analiticheskikh izmereniy v tekhnologicheskikh protsessakh [Requirements for reference methods of analytical measurements in technological processes]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2015;18(14):104-110. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Менделович БРЖЕЗОВСКИЙ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Нетяговый подвижной состав и автотормозные системы поездов», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 700436, <https://orcid.org/0000-0003-3294-9723>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander M. BRZHEZOVSKIY,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Centre for Non-Traction Rolling Stock and Automatic Train Brake Systems, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 700436, <https://orcid.org/0000-0003-3294-9723>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи. The author has read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.03.2022, первая рецензия получена 08.04.2022, вторая рецензия получена 29.04.2022, принята к публикации 27.05.2022.

The article was submitted 05.03.2022, first review received 08.04.2022, second review received 29.04.2022, accepted for publication 27.05.2022.