

Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков

К.В. Арефьева, Л.В. Мартыненко✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉liuba.martinenko@yandex.ru

Резюме

В настоящее время безопасность движения и соблюдение графика движения поездов являются основными целями деятельности ОАО «РЖД». Для их достижения необходимо выполнить ряд задач по своевременному выявлению и устранению технически неисправных вагонов, вышедших из строя в результате больших динамических нагрузок в процессе эксплуатации. Данное исследование проводится для определения этих нагрузок с помощью тензометрических датчиков, установленных на колесных парах вагона, а также для предотвращения наступления аварийных ситуаций на дороге. При проведении испытаний вагонов на предмет надежности и безопасности при различных скоростях движения и степени загрузки основными измеряемыми величинами являются уровни воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну. Измерения деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Подготовка образцов сталей для изготовления компенсационных датчиков для дистанционного измерения напряженно-деформированного состояния узлов железнодорожной колесной пары осуществляется в целях реализации программы, направленной на повышение ОАО «РЖД» безопасности движения, а также для выполнения мер по модернизации и внедрению технических средств диагностики подвижного состава и пути в целом. Применение тензометрических колесных пар, позволяющих в непрерывном движении проводить измерения вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рельсом, является именно одной из таких мер.

Ключевые слова

безопасность движения, аварийные ситуации, тензометрические датчики, системы вертикальных и боковых нагрузок, тензорезисторы, деформации колесной пары

Для цитирования

Арефьева К.В. Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков / К.В. Арефьева, Л.В. Мартыненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2 (78). С. 145–155. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).145-155.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 10.03.2023 г.; принята к публикации: 14.03.2023 г.

Assessment of the Impact of a freight wagon undercarriage on the rail-sleeper grid during operation using strain gauges

K.V. Aref'eva, L.V. Martynenko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉liuba.martinenko@yandex.ru

Abstract

Currently, traffic safety and compliance with the train schedule are the main objectives of JSC «Russian Railways». To achieve the main goal, it is necessary to perform a number of tasks for the timely identification and elimination of technically defective wagons that have failed under high dynamic loads during operation. This study is carried out in order to determine such loads using strain gauges installed on the wheelsets of the wagon, as well as to prevent the occurrence of accidents on the road. When testing wagons for reliability and safety at various speeds of movement and loads, one of the main measured values are the levels of impact on the track of the system of vertical and lateral loads transmitted by the wheel set to the railway track. Measurements of deformations of the wheelset of the wagon are carried out using strain gages that are glued to the wheels. The preparation of steel samples for the manufacture of compensation sensors for remote measurement of the stress-strain state of railway wheelset units is carried out in order to implement a program aimed at improving traffic safety of JSC «Russian Railways» and carry out measures to modernize and introduce technical diagnostic tools for rolling stock and track as a whole. The use of strain gauge wheelsets, which allow to measure vertical and lateral forces in the area close to the wheel-rail contact zone in the continuous movement mode is one of such measures.

Keywords

traffic safety, emergency situations, strain gauges, vertical and lateral load systems, strain gages, deformations of the wheel set

For citation

Aref'eva K.V., Martynenko L.V. Otsenka vliyaniya khodovoi chasti gruzovogo vagona na rel'soshpal'nyuyu reshetku v protsesse ekspluatatsii s pomoshch'yu tenzometricheskikh datchikov [Assessment of the impact of a freight wagon undercarriage on the

rail-sleeper grid during operation using strain gauges]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 145–155. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).145-155.

Article Info

Received: November 11, 2022; Revised: March 10, 2023; Accepted: March 14, 2023.

Введение

Преимуществом железнодорожного транспорта является универсальность, нормированный скоростной режим движения, способность доставлять груз за минимально короткий срок, а также ответственность за целостность доставки груза адресату. При перечисленных преимуществах перевозочного процесса играет большую роль высокая загруженность железнодорожных путей, через которые каждые сутки проходят миллионы тонн брутто груза. Сохранять удовлетворительное состояние пути и самих вагонов не всегда получается, так как загруженность данных объектов не позволяет своевременно производить технический осмотр ввиду отсутствия времени при стоянке вагонов, которое сократили до минимума, а пути при постоянном перевозочном процессе без технических окон просто не удастся проверить в полном объеме.

Техническое обслуживание является одним из важных требований к объекту перевозочного процесса, т.е. обеспечение исправным подвижным составом. Основные задачи подразделений в сфере обслуживания – подготовка вагонов под погрузку грузов и обеспечение безаварийной работы вагонов в пути следования. За последнее время произошли существенные изменения в организации работы железнодорожного транспорта, а именно, изменились производственная деятельность инфраструктуры и форма собственности на предприятиях.

Безопасность является основой для процесса пассажирских перевозок и грузового движения, поэтому высокая степень надежности определяет техническое состояние системы «колесо – рельс», так как в процессе эксплуатации данная система меняет свои качественные и количественные показатели, что требует дополнительного исследования и оценки функционирования этой системы в различных ситуациях [1].

На сегодняшний день количество сходов увеличивается. На их возникновение влияют неисправности и (или) отказы буксовых узлов, колесных пар, несовершенство тормозных систем, а также малоразвитая система земляного полотна, вследствие чего происходят отказы по пути [2]. Сам процесс схода зависит от множества факто-

ров, которые в их вероятностном сочетании изучены еще недостаточно. Большая нагрузка на рельсовые нити и вагон в целом приводит не только к увеличению дефектов, но и к их общей работе при движении. Данная работа обусловлена неправильной эксплуатацией, включающей в себя нарушения технологических процессов, в том числе выпуск вагонов из ремонта с критически допустимыми размерами в эксплуатации, но не допустимыми по сочетанию между собой. Отказы происходят при увеличенном взаимодействии указанных отклонений в пути следования. Нагрузка, приходящаяся на отдельные детали, может существенно отличаться в эксплуатации и вызывать дополнительные напряженно-деформированные состояния, которые усиливают внутренне напряжение металла. Данное напряжение можно оценить с помощью специализированных стендов, колесных пар и тензодатчиков, которые показывают силу воздействия при различных условиях эксплуатации. Считывание информации с этих устройств позволяет сориентироваться при начальной эксплуатации и через определенный промежуток времени, когда появляются отклонения, сопряженные с увеличением численных силовых значений, возникающие изначально на опасных участках, а после фиксируемые на протяжении следования состава [3].

Эффективность деятельности служб вагонного хозяйства определена согласно Методике о комплексной оценке работы предприятий вагонного хозяйства дирекций инфраструктуры. В данной методике изложен алгоритм расчетов, а также приведены показатели оценки эффективности служб вагонного хозяйства, эксплуатационных вагонных депо, пунктов технического обслуживания. По результатам оценки из 15 служб вагонного хозяйства первое место заняла служба вагонного хозяйства Московской дирекции инфраструктуры. Второе место в рейтинге у службы вагонного хозяйства Юго-Восточной дирекции. Третье место досталось службе вагонного хозяйства Красноярской дирекции. Проведена комплексная оценка деятельности эксплуатационных вагонных депо (ВЧДЭ) и пунктов технического обслуживания грузовых вагонов (ПТО) на основании качественных и количественных показате-

лей, а также данных из информационных систем. Из 45 ПТО сортировочных станций первое место заняла ПТО Батайск-Юг Северо-Кавказкой дирекции инфраструктуры с общей суммой 100 баллов, второе место – ПТО Орехово-Зуево Московской дирекции. Из 176 ПТО грузовых станций на сети первое место разделили 56 ПТО с общей суммой по 100 баллов. Результаты рейтинга служб сведем в табл. 1 [4].

Таблица 1. Рейтинг служб вагонного хозяйства
Table 1. Rating of wagon services

Место Place	Служба вагонного хозяйства Wagon service	Баллы Score
1	Московская Moscow	11,64
2	Юго-Восточная South East	10,99
3	Красноярская Krasnoyarsk	10,72
4	Куйбышевская Kuibyshev	10,70
5	Дальневосточная Far East	10,49
6	Горьковская Gor'kovskaya	10,03
7	Приволжская Privolzhskaya	9,94
8	Забайкальская Zabaykalskaya	9,94
9	Северо-Кавказская North Caucasian	9,87
10	Северная Northern	9,85
11	Свердловская Sverdlovskaya	9,71
12	Восточно-Сибирская East Siberian	9,67
13	Западно-Сибирская West Siberian	8,43
14	Октябрьская Oktjabr'skaya	6,20
15	Южно-Уральская South Urals	5,85

Отказы технических средств

Производственная деятельность вагонного хозяйства оказывает значительное влияние на результаты работы ОАО «РЖД» в целом. С целью повышения эффективности перевозок необходимо снизить отказы технических средств первой и второй категорий. Отказы первой категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движе-

ния и эксплуатации железнодорожного транспорта. Отказы второй категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 мин. до 1 ч либо к ухудшению эксплуатационных показателей. На рис. 1 представлена динамика отказов технических средств первой и второй категорий по вагонному хозяйству за последние семь лет. Количество отказов постоянно снижалось с 2015 г. и до настоящего времени сократилось почти в 7 раз.



Рис. 1. Динамика отказов технических средств по вагонному хозяйству в 2015–2022 гг.

Fig. 1. Dynamics of failures of technical equipment in the rolling stock in 2015–2022



Рис. 2. Образцы сталей для изготовления компенсационных датчиков

Fig. 2. Samples of steels for manufacturing compensation sensors



Рис. 3. Изготовление компенсационных датчиков с применением тензорезисторов

Fig. 3. Production of compensation sensors using strain gauges

Конструкция ходовой части грузового вагона включает в себя множество элементов, однако наиболее ответственными является колесная пара. В целях реализации программы, направленной на повышение безопасности движения, ОАО «РЖД» осуществляет меры по модернизации и внедрению технических средств диагностики подвижного состава и пути в целом [5]. Один из вариантов по внедрению и модернизации является применение тензометрических колесных пар, позволяющих в непрерывном движении проводить измерения вертикальных и боковых сил в зоне, близкой к зоне контакта колеса с рельсом.

Компенсационные датчики

Надежный способ получить ответ о том, как материалы справляются с реальным напряжением, – это использовать тензорезисторы, которые позволяют измерить даже самые незначительные изменения (за счет своей «аналоговости» они имеют практически бесконечную чувствительность).

Тензорезистором можно назвать датчик, который преобразует собственную деформацию в изменение собственных электрических характеристик, а поскольку его собственная деформация практически равна поверхностной деформации испытываемого материала, то можно сказать так: тензорезистор – это датчик, преобразующий поверхностную деформацию испытываемого материала в изменение собственных электрических характеристик.

При проведении испытаний вагонов на предмет надежности и безопасности при различных скоростях движения и степени загрузки

основными измеряемыми величинами являются уровни воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну [6]. Измерение деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Подготовка образцов сталей для изготовления компенсационных датчиков изображена на рис. 2.

Конструкция резистивного тензодатчика представляет собой упругий элемент, на котором зафиксирован тензорезистор (рис. 3).

Под действием силы (веса груза) происходит деформация упругого элемента вместе с тензорезистором. В результате изменения сопротивления тензорезистора можно судить о силе воздействия на датчик, а, следовательно, и о весе груза. Принцип измерения веса при помощи тензодатчиков основан на уравнивании массы взвешиваемого груза с упругой механической силой тензодатчиков и последующего преобразования этой силы в электрический сигнал для дальнейшей обработки.

Измерение деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Нанесение разметки под тензорезисторные датчики на элементах колесной пары показано на рис. 4. На рис. 5 представлены наклеенные тензодатчики в соответствии с разметкой. Далее представлена схема приложения нагрузок на колесную пару, а также расположение тензометрических датчиков на оси колесной пары и опорной части колеса на рельс (рис. 6).



Рис. 4. Нанесение разметки под тензорезисторные датчики на элементах колесной пары:
a – правая нижняя часть оси; *б* – середина оси

Fig. 4. Application of markings for strain-gauge sensors on the elements of the wheelset:
a – the right lower part of the axis; *b* – the middle of the axis



Рис. 5. Наклеивание тензорезисторных датчиков:
 а – направляющее правое колесо (четыре датчика); б – направляющее левое колесо (три датчика)

Fig. 5. Gluing strain gauge sensors on:
 а – steering right wheel (four sensors); б – steering left wheel (three sensors)

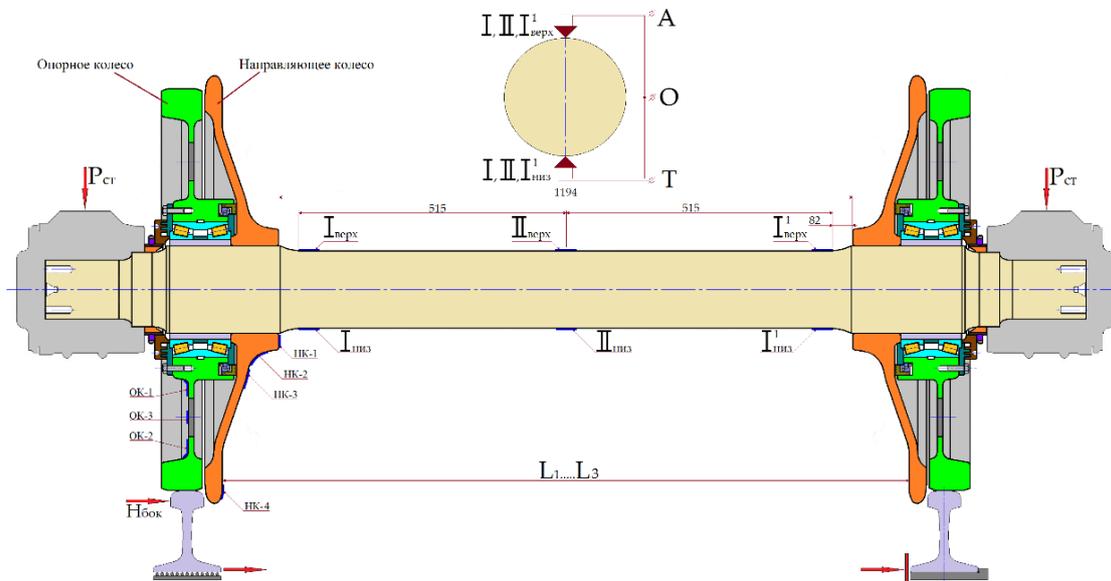


Рис. 6. Схема испытательных нагрузок на стенде
Fig. 6. Scheme of test loads on the stand

Самая большая проблема – передача данных с тензорезисторов при движении поезда [7]. Подключить датчики с помощью проводов не представляется возможным. Использовать для измерений контактные токосъемники – нецелесообразно из-за их ненадежности и качества контакта (малейшее изменение сопротивления в контактах влияет на результат измерений). Существуют портативные регистраторы с записью данных с датчиков на карту памяти и питанием от аккумулятора. Такие системы не позволяют контролировать результаты измерений в реальном времени и ограничены по времени работы.

Для измерения деформаций на колесной паре лучше всего подходит мостовой метод, характеризующийся наличием мостовой ветви между двумя точками схемы, не соединенными непосредственно с источником электрической энергии [8, 9]. В основу мостовой схемы положена схема моста Уинстона. Для определения зон минимального взаимного влияния вертикальных и боковых сил применялась конечно-элементная модель колесной пары с использованием программного комплекса Nastran [10]. В узлах конечно-элементной сетки, расположенных в радиальном сечении колеса, с помощью специальной

опции MSC. Fatigue размещены виртуальные датчики с базой 10×5 мм для оптимизации обработки информации. Общее количество тензорезисторов в модели – 54. Виртуальные датчики деформаций позволяли определять напряженно-деформированное состояние диска колеса при приложении вертикальных и боковых сил [11]. По результатам моделирования тензометрической колесной пары на стенде определены зоны минимального взаимного влияния от вертикальных сил на боковые и наоборот. В качестве основной схемы соединения тензорезисторов на входе измерительных каналов выбран полумост из двух активных тензорезисторов, размещенных на измерительных диаметрах, которые при вращении колеса поочередно входят в зону контактирования и воспринимают деформацию поверхности диска колеса, пропорциональную действующим силам [12]. При такой схеме включения тензорезисторов обеспечивается максимальная чувствительность при минимальных погрешностях измерений, связанных с необходимостью температурной компенсации. Кроме того, вы-

бранный способ соединения тензорезисторов обеспечивает самый простой контроль балансировки (контроль нулей) измерительных каналов. Места размещения тензорезисторов на дисках колес тензометрической колесной пары выбраны на основании расчетных данных о напряженном состоянии диска колеса под действием внешних нагрузок различных направлений и результатов экспериментальной проверки напряженного состояния диска на специальном стенде АО «ВНИИЖТ», где колесные пары нагружали внешними силами различных уровней и направлений (табл. 2) [13]. Подготовка тензорезисторов к наклейке, их наклейка в предварительно выбранных местах, соединение в измерительные полумосты, изоляция от влаги и механических повреждений были выполнены по технологии АО «ВНИКТИ», обеспечивающей возможность длительной и надежной работы измерительных схем без замены и ремонта в условиях работы колесных пар под вагоном [14].

В этой системе данные передаются непрерывно в режиме реального времени и с

Таблица 2. Значения боковых и вертикальных нагрузок на колесную пару, определенных тензометрическими датчиками, при различных расстояниях между внутренними гранями ободьев колес

Table 2. The values of lateral and vertical loads on the wheelset, determined by strain gauges, at different Distances between the inner faces of the wheel rims

Режим Нагрузок Loading mode	Датчики Sensors	Вертикальная нагрузка на одну буксу Р (тс) Vertical load on one box R (t power)	Боковая нагрузка Н (тс) Lateral load N (t power)	Внутреннее расстояние, мм Internal distance, mm			Эквивалентная вертикальная сила для определения изгибающего момента в подошве рельса, кН Equivalent vertical force to determine the bending moment at the foot of the rail, kN
				L_1	L_2	L_3	
(1) 07.07.2016	Правое колесо Right wheel ОК-1 ОК-2	4,5	2,5	1 441,5	1 441,2	1 441,5	227
(2) 07.07.2016	ОК-1 ОК-2	7,0	4,0	1 441,5	1 440,5	1 441,5	251
(3) 07.07.2016	ОК-1 ОК-2	10,0	7,3	1 441,5	1 439,8	1 441,0	281
(1) 08.07.2016	Левое колесо Left wheel НК-2 НК-3	4,5	2,5	1 441,5	1 440,0	1 441,0	207
(2) 08.07.2016	НК-2 НК-3	7,0	4,0	1 441,0	1 439,8	1 441,0	231
(3) 08.07.2016	НК-2 НК-3	10,0	7,3	1 441,0	1 439,7	1 440,9	260

высокой частотой опроса датчиков. Головное устройство, т.е. компьютер, может совершенно спокойно располагаться на вагоне для приема и обработки информации непосредственно с датчиков. Посредником в этой системе выступает телеметрический тензоусилитель, который преобразует сигналы в частотные импульсы и передает их непосредственно на компьютер [15].

При помощи одного модуля усилителя можно контролировать до четырех датчиков. Тензоусилители телеметрические размещены рядом с датчиками. Выходной сигнал усилителя МТР-NT представляет собой поразрядный РСМ-сигнал, который модулируется для беспроводной передачи и может передаваться на расстоянии до 5 м. Он предназначен для скорости передачи данных до 10 Мбит/с [16, 17].

Методика определения напряжений на основной площадке земляного полотна по результатам измерений тензодатчиков

Расчетные напряжения шпалы (рис. 7) определяются на основании текущих значений боковых сил (F_{6L} и F_{6R}), действующих на тензометрическую колесную пару со стороны рельсов по максимально вероятной боковой силе, действующей от колеса на рельс (с вероятностью 0,994) [18–20].

Силы можно рассчитать по формулам (1):

$$Y_{6L} = F_{6L}(0,994), Y_{6R} = F_{6R}(0,994), \quad (1)$$

где Y_{6L} , Y_{6R} – максимально вероятная боковая сила, действующая от левого и правого колес на рельс (с вероятностью 0,994), Н;

$$\sigma_h = \sigma_h' + \sigma_{hc}' + \sigma_h'',$$

где σ_h' – напряжения на основной площадке, вызванные давлением основной расчетной

шпалы (под ее подрельсовым сечением) (МПа), вычисляются по формуле (2):

$$\sigma_h' = r_1 \cdot [2,55 \cdot b \cdot h \cdot b_2 + 4h_2 + (0,635 \cdot (b_2 \cdot h - b \cdot 324h_3) - 1,275 \cdot b \cdot h \cdot b_2 + 4h_2) \cdot m] \cdot \sigma_6, \quad (2)$$

где r_1 – параметр учета влияния материала шпал на напряжения (принимают равным 0,8 для деревянных шпал); b – ширина нижней постели шпалы, м; h – толщина балластного слоя под шпалой, м; m – переходный коэффициент от осредненного по ширине шпалы давления на балласт к давлению под осью шпалы (принимается в пределах 1 ... 2), вычисляется по формуле (3):

$$m = 0,89\sigma_6 + 0,435, \quad (3)$$

где σ_6 – напряжение под расчетной шпалой на балласте, МПа; σ_{hc}' , σ_h'' – напряжения под соседними шпалами (МПа), вычисляемые по формуле (4):

$$\sigma_{hc}' + \sigma_h'' = r_1 \pi A \sigma_6 \quad (4)$$

где A – параметр, зависящий от ширины нижней постели шпалы b и толщины балластного слоя h , вычисляемый по формуле (5):

$$A = [\theta_1 - \theta_2 + 0,5 \cdot (\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2))], \quad (5)$$

где θ_1 – угол отклонения шпалы по расчетному сечению, град; θ_2 – угол отклонения шпалы по основной площадке, град.

$$\theta_1 = \arctg l_{ш} + 0,5 \cdot bh, \theta_2 = \arctg l_{ш} + 0,5 \cdot bh,$$

где $l_{ш}$ – расстояние между осями шпал, м. Напряжения в балласте (аналогично для соседних шпал, полагая их расчетными) под расчетной шпалой (МПа), вычисляются по формуле (6):

$$\sigma_6 = k \cdot l_{ш} \cdot 10 - 62 \cdot \Omega \cdot \alpha \cdot P_{экр}, \quad (6)$$

где k – коэффициент относительной жесткости рельсового основания, м⁻¹; $\Omega \alpha$ – площадь полшпалы с учетом поправки на ее изгиб, м²; $P_{экр}$ – эквивалентная вертикальная сила, вы-

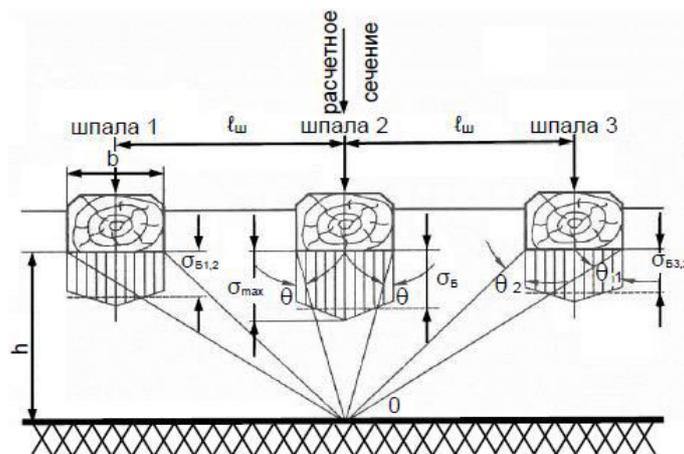


Рис. 7. Расчетная схема определения напряжений на основной площадке земляного полотна
Fig. 7. Calculation scheme for determining stresses on the main subgrade area

числяемая по формуле (7) для определения давления на шпалу и упругого прогиба от системы сил, Н:

$$P_{\text{эв}} = P_{\text{ср}} + \lambda \cdot S, \quad (7)$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднее значение вертикальной нагрузки на путь (Н), которое вычисляется по формуле $P_{\text{ср}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{рсп}}$, где $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка колеса на рельс, принимаем 115 000 Н; $P_{\text{рсп}}$ – среднее значение динамической силы от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах, Н; λ – нормирующий множитель, определяющий появление максимальной динамической нагрузки (для уровня вероятности 0,994 нормируемый множитель принимают равным 2,5); S – среднее квадратичное отклонение вертикальной динамической нагрузки колеса на рельс, Н.

Среднее значение динамической силы от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах вычисляют по формуле (8):

$$P_{\text{рсп}} = 0,75 \cdot P_p, \quad (8)$$

где P_p – максимальная динамическая сила от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах, принимаем 91 480 Н.

Среднее квадратичное отклонение вертикальной динамической силы от колеса на рельс S (Н), вычисляется по формуле (9) композиции законов распределения его составляющих:

$$S = \sqrt{S_{p_2}^2 + S_{\text{шп}_2}^2 + 0,95 \cdot S_{\text{шк}_2}^2 + 0,05 \cdot S_{\text{шк}_2}^2}, \quad (9)$$

где S_p – среднее квадратичное отклонение дополнительного вертикального воздействия на путь от работы рессорного подвешивания (Н), вычисляется как $S_p = 0,08 \cdot P_p$; $S_{\text{шп}}$ – среднее квадратичное отклонение дополнительных инерционных вертикальных сил от неровности пути (Н), вычисляется по формуле (10):

$$S_{\text{шп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} L_{\text{шп}} P_{\text{ср}} \sqrt{Ukq}, \quad (10)$$

где L – коэффициент, учитывающий тип рельса, шпал и балласта, принимаем 1,1; U – модуль упругости рельсового основания, принимаем 18 МПа; q – неподдресоренный вес, приходящийся на одно колесо, у состава, движущегося со скоростью 90 км/ч по пути с рельсами Р50, деревянными шпалами и щебеночным балластом, наибольшая сила составляет 207 000 Н; $S_{\text{шк}}$ – среднее квадратичное отклонение дополнительного инерционного вертикального усилия на рельсы от влияния непрерывной неровности на

колесе (Н), вычисляется по формуле (11):

$$S_{\text{шк}} = 6,739 \cdot 10^{-3} \alpha_0 UV \sqrt{qdkU} - 326kq \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

где d – диаметр колеса по кругу катания, 0,95 м; α_0 – коэффициент, характеризующий отношение необдресоренной массы колеса и массы пути, участвующей во взаимодействии (0,433); V – скорость движения вагона, принимаем 25 м/с; $S_{\text{шк}}$ – среднее квадратичное отклонение дополнительного вертикального усилия от влияния изолированной неровности на колесе, Н (для скорости движения более 20 км/ч), вычисляется по формуле (12):

$$S_{\text{шк}} = 0,735 \cdot \alpha_0 Uke \cdot 10^6, \quad (12)$$

где e – глубина плавной изолированной неровности на колесе (принимают равной $6,7 \cdot 10^{-4}$ м для вагонов с подшипниками качения).

Главной задачей оборудования колесных пар тензометрическими датчиками являются предупреждение вертикальных перегрузок на колесную пару и соблюдение уровней воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну (рис. 8).

Боковые нагрузки вызывают дополнительное вертикальное загрузление частей тележек с одной стороны вагона и соответствующее разгрузление с другой. Величина такого дополнительного загрузления рассчитываемой детали находится по формуле (13):

$$Y_{6L} = H_{\text{ц}} h_{\text{ц}} + H_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} / m_1 \cdot 2b_2 \quad (13)$$

где $H_{\text{ц}}$ – центробежная сила, направленная наружу кривой, кН; $H_{\text{в}}$ – сила давления ветра на кузов вагона; m_1 – количество деталей под вагоном; $h_{\text{в}}$, $h_{\text{ц}}$ – вертикальные расстояния от места приложения Y_6 до точек приложения сил $H_{\text{ц}}$ и $H_{\text{в}}$ соответственно, м.

При снятых значениях с тензометрических датчиков, которые условно меняли значения расстояний между внутренними гранями ободьев колес и, соответственно, менялись боковые нагрузки при увеличении вертикальных, получим значения, по которым определим дополнительную динамическую нагрузку, влияющую на рельсошпальную решетку. В нашем случае загрузление рассматривается до колесной пары и, соответственно, расстояния $h_{\text{в}}$ и $h_{\text{ц}}$ – это вертикальные расстояния от места приложения Y_6 до точек приложения сил $H_{\text{ц}}$ и $H_{\text{в}}$.

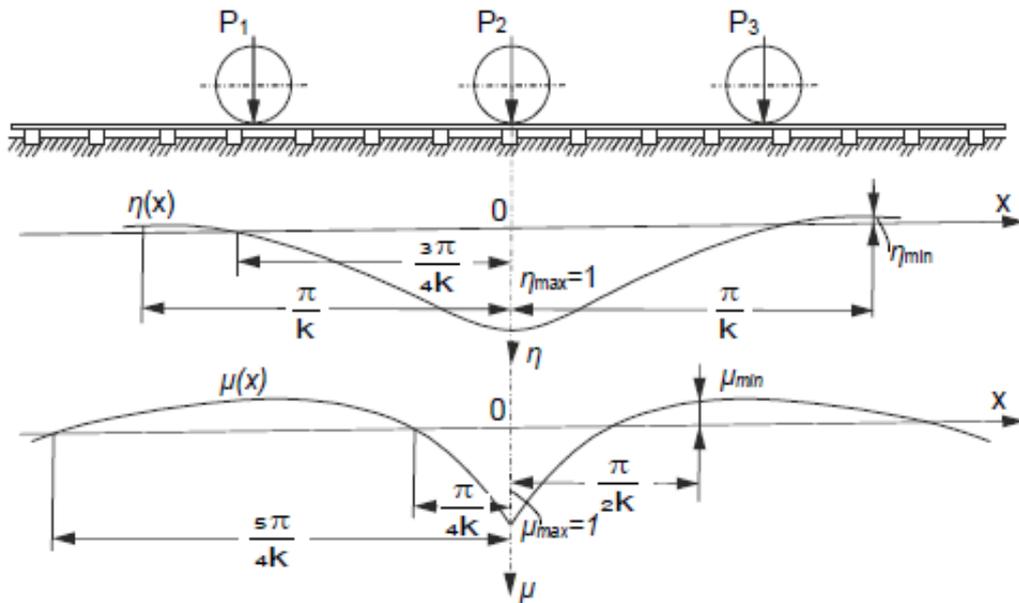


Рис. 8. Линии влияния прогибов $\eta(x)$ и моментов $\mu(x)$ от действия системы сил (от расчетного колеса P_2 и от соседних колес P_1, P_3)

Fig. 8. Lines of influence of deflections $\eta(x)$ and moments $\mu(x)$ from the action of a system of forces (from calculation wheel P_2 and from adjacent wheels P_1, P_3)

Данные расчеты, приведенные в табл. 2, показывают, что при увеличении боковых и вертикальных сил возникают дополнительные динамические силы, и их изменение зависит не только от сил, приложенных к данному узлу, но и от расстояния, на котором должны прикладываться силы. Когда оно меняется, значения сил, соответственно, тоже меняются.

Заключение

Главной задачей проведения данного исследования является выявление смещения шпалы под воздействием силы реакции рельса и внешних причин сдвига рельсошпальной решетки, т.е. устойчивость пути при поперечном сдвиге относительно балласта. Коэффициент устойчивости рельсошпальной решетки напрямую зависит от типа шпал – деревянные и железобетонные, а также увеличения вертикальной нагрузки и сопротивления балласта. При расчете поперечной устойчивости рельсошпальной решетки были проведены замеры сил, действующих на колесные пары, и их влияние на расстройство пути под воздействием циклически меняющейся нагрузки. На основании результатов, полученных при данных рас-

четах, зависимость сдвига при увеличенном колебании кузова вагона возрастает в 1,5 раза, а боковое смещение рельсошпальной решетки, действующее на путь максимально, меняется при увеличенной вертикальной нагрузке от собственного веса вагона или поезда в целом при рассмотрении на большой протяженности, а также дополнительного инерционного вертикального усилия на рельсы от влияния непрерывной неровности на колесе. В соответствии с полученными выводами были проведены расчеты напряжений, а также рассчитаны боковые силы, действующие со стороны рельсов на колесную пару, и вертикальные силы для определения давления на шпалу и упругого прогиба от систем сил. По результатам напряженно-деформированного состояния рельсошпальной решетки действие увеличенной боковой силы приводит к изменению формы рельсовой нити при приложенной силе 40 кН, так как увеличивается сила трения, способствующая смещению рельсошпальной решетки. Дальнейшее ее увеличение приводит к выбросу пути или излому рельса при меняющейся динамической нагрузке от движущегося состава.

Список литературы

1. Лукин В.В., Анисимов В.Н., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов. М. : УМЦ по образованию на

ж.-д. трансп., 2011. 688 с.

2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
3. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Труды ВНИИЖТ. 1975. № 542. С. 84–92.
4. Пирогова И.А. Рейтинг служб вагонного хозяйства, депо и ПТО дирекций инфраструктуры по итогам работы за I квартал 2021 г. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 2 (66). С. 18–23.
5. Миколайчук Т.А. Эффективность использования современных средств диагностики подвижного состава // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования : материалы XXIII междунар. студен. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2017. С. 162–167.
6. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
7. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
8. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Труды ВНИИЖТ. 1976. № 549. С. 4–25.
9. Ромен Ю.С., Николаев В.Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев : Наук. думка, 1980. С. 40–42.
10. Кудрявцев Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов. М. : Транспорт, 1977. 143 с.
11. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики необрессоренных масс вагонов. М. : Транспорт, 1965. 168 с.
12. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
13. Нагорная Ж.А. Текущее содержание пути. М. : Маршрут, 2006. 62 с.
14. Тихомиров В.И. Содержание и ремонт железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1969. 344 с.
15. Амелин С.В., Дановский Л.М. Путь и путевое хозяйство. М. : Транспорт, 1972. 214 с.
16. Скалов А.Д., Коваль В.А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1980. № 6. С. 15–20.
17. Инновационные вагоны и проблемы их взаимодействия с элементами инфраструктуры / В.Н. Филиппов, А.В., Смольянинов И.В. Козлов и др. // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2016. С. 68–73.
18. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
19. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
20. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2023–02–01 с правом досрочного применения. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 31 с.

References

1. Lukin V.V., Anisimov V.N., Koturanov V.N. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Design and calculation of wagons]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2011. 688 p.
2. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.
3. Zhelnin G.G., Pevzner V.O., Shinkarev B.S. Issledovanie zavisimosti mezhdu pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdeistviya ego na put' [Investigation of dependencies between indicators of rolling stock dynamics and its impact on the track]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1975, no. 542, pp. 84-92.
4. Pirogova I.A. Reiting sluzhby vagonnogo khozyaistva, depo i PTO direktsii infrastruktury po itogam raboty za I kvartal 2021 g. [Rating of wagon services, depots and technical facilities of infrastructure directorates based on the results of work for the first quarter of 2021]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2021, no. 2 (66), pp. 18–23.
5. Mykolaichuk T.A. Effektivnost' ispol'zovaniya sovremennykh sredstv diagnostiki podvizhnogo sostava [Efficiency of using modern means of rolling stock diagnostics]. *Materialy XXIII mezhdunarodnoi studentcheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdistiplinarynye issledovaniya»* [Proceedings of the XXIII International Student Scientific and Practical Conference «Scientific community of students: interdisciplinary research»]. Novosibirsk, 2017, pp. 162–167.
6. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Wagon Dynamics]. Moscow: Transport Publ., 360 p.
7. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs [Wagons. General course]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
8. Gracheva L.O., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeistviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhok i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Indicators of the dynamics and impact on the track of freight four-axle wagons with various wear of bogies and deviations from the standards of maintenance in straight sections of the track]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1976, no. 549, pp. 4-25.
9. Romen Yu.S., Nikolaev V.E. Issledovanie vliyaniya determinirovannykh nerovnostei puti v plane na uroven' bokovykh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona [Investigation of the influence of deterministic track irregularities in the plan on the level of lateral forces during the movement of a freight wagon]. *Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta* [Problems of Railway Transport Mechanics]. Kiev, 1980, pp. 40-42.
10. Kudryavtsev N.N. Dinamicheskie nagruzki khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Dynamic loads of running parts of freight wagons]. Moscow: Transport Publ., 1977. 144 p.

11. Kudryavtsev N.N. Issledovaniya dinamiki neobressorenykh mass vagonov [Studies of the dynamics of unsprung masses of wagons]. Moscow: Transport Publ., 1965. 168 p.
12. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
13. Nagornaya Zh.A. Tekushchee sodержanie puti [The current content of the track]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 62 p.
14. Tikhomirov V.I. Soderzhanie i remont zheleznodorozhnogo puti [Maintenance and repair of the railway track]. Moscow: Transport, 1969. 344 p.
15. Amelin S.V., Danovskii L.M. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]. Moscow: Transport Publ., 1972. 214 p.
16. Skalov A.D., Koval V.A. Metodika issledovaniya vertikal'nykh i bokovykh sil pri iznosnykh ispytaniyakh rel'sov [Technique for the study of vertical and lateral forces during wear tests of rails]. *Vestnik VNIIZhT*, [Bulletin of All-Union Scientific-Research Institute of Railway Transport], 1980, no. 6, pp. 15–20.
17. Fillipov V.N., Smolyaninov A.V., Kozlov I.V., Podlesnikov Ya.D. Innovatsionnye vagony i problemy ikh vzaimodeistviya s elementami infrastruktury [Innovative wagons and problems of their interaction with infrastructure elements]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 68-73.
18. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
19. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010, 211 p.
20. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021. Railway rolling stock. Standards of permissible impact on the railway track and test methods]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 31 p.

Информация об авторах

Арефьева Кристина Валерьевна, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kris.arefeva23@mail.ru.
Мартыненко Любовь Викторовна, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.

Information about the authors

Kristina V. Aref'eva, Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kris.arefeva23@mail.ru.
Lyubov' V. Martynenko, Assistant Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.