

# Проверка точности восстановления вертикальных нагрузок от колеса на рельс по напряжениям в двух сечениях рельса на стенде



**Р. В. Рахимов,**  
к. т. н., докторант  
Петербургского государственного университета путей сообщения  
Александра I (ПГУПС)



**А. А. Петров,**  
аспирант ПГУПС

Выполнена экспериментальная проверка точности восстановления вертикальных нагрузок от колеса на рельс по измеренным напряжениям в двух сечениях рельса и сравнение полученных данных с результатами измерений согласно ГОСТ Р 55050–2012. Эксперимент включал действия центральной вертикальной нагрузки и вертикальной нагрузки, смещенной относительно продольной оси рельса. Результаты проведенных экспериментов подтвердили эффективность метода кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил между колесом и рельсом по измерению напряжений в двух сечениях рельса.

Работы по совершенствованию и повышению точности измерений сил, действующих от колес подвижного состава на рельсы, постоянно проводятся в России и за рубежом [1–4]. Для устранения недостатков существующих методов по определению силовых воздействий подвижного состава на железнодорожный путь в работе [5] разработан и теоретически обоснован новый метод кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил между колесом и рельсом по измерению напряжений в двух сечениях рельса.

Для проверки работоспособности предложенного метода [5] были выполнены эксперименты на стенде. При этом ставились следующие задачи:

- разработать программу и методику экспериментальных исследований по определению вертикальных нагрузок на рельс по измеренным напряжениям в двух сечениях рельса;

- оценить точность определения нагрузки от колеса на рельс при действии центральной вертикальной нагрузки при стендовых экспериментах;
- определить влияние поперечного смещения колеса от оси симметрии рельса на точность восстановления вертикальной силы в стендовых экспериментах;
- сравнить получаемые результаты с измерениями согласно ГОСТ Р 55050–2012 [6].

## Экспериментальные исследования по определению вертикальных нагрузок от колеса на рельс

Экспериментам подвергся фрагмент рельса типа Р65 [7] длиной 665 мм, закрепленный на двух опорах размерами 200×140×20 мм. Расстояние между опорами составляет 544 мм.

Подготовка к эксперименту включала прецизионную разметку фрагмента рельса между опорами на 16 сечений, расстояние между ними составляет 34 мм (рис. 1).

Для проведения экспериментов на стенде с целью определения вертикальной нагрузки на рельс на обе стороны шейки рельса были наклеены тензорезисторы (рис. 1):

- по методу согласно ГОСТ Р 55050–2012 на нейтральной оси рельса в сечении 0;
  - по методу кусочно-непрерывной регистрации сил по измерению напряжений в двух сечениях рельса [5] на нейтральной оси рельса в сечениях –6 (6) и –5 (5).
- Для регистрации сигналов в сечениях –5 (5) и –6 (6) тензорезисторы были сое-

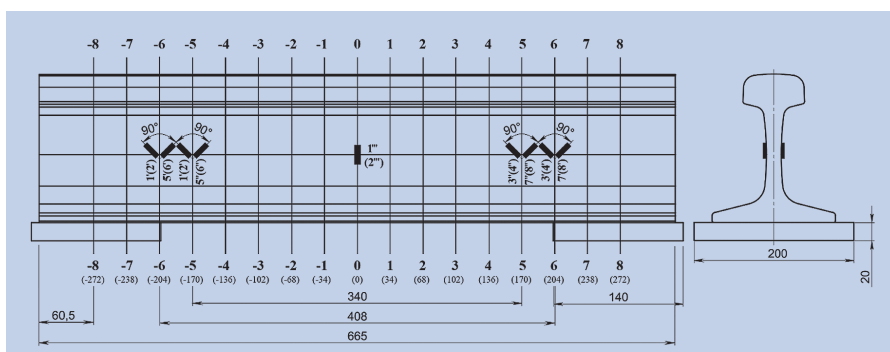


Рис. 1. Сечения и схема размещения тензорезисторов на исследуемом фрагменте рельса: –8–8 – номера сечений; в скобках для каждого сечения указаны расстояния от средней части между опорами; 1'–8', 1''–8'', 1'''–2''' – номера тензорезисторов

динены по схеме двух параллельных полных мостов с четырехпроводной схемой подключения. Для регистрации сигналов в сечении 0 тензорезисторы были соединены по схеме полного моста с четырехпроводной схемой подключения согласно ГОСТ Р 55050–2012. Схемы подключения тензорезисторов представлены на рис. 2.

Выражение для определения вертикальной силы от колес на рельсы через главные деформации  $\varepsilon_p$ , измеряемые восемью тензорезисторами, имеет вид

$$P = Q_1 - Q_2 = \frac{K_p(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} - \frac{K_p(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{2} - \frac{K_p(\varepsilon_5 + \varepsilon_6)}{2} + \frac{K_p(\varepsilon_7 + \varepsilon_8)}{2} = \frac{K_p}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4 - \varepsilon_5 - \varepsilon_6 + \varepsilon_7 + \varepsilon_8), \quad (1)$$

где  $Q_1 - Q_2$  – разность поперечных сил;  $K_p$  – постоянная, зависящая от характеристик материала и геометрических размеров рельса; при эксплуатации может медленно изменяться вследствие износа головки рельса.

Изменение выходного напряжения для схемы параллельной работы двух мостов определяется выражением

$$\Delta U = k(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4 - \varepsilon_5 - \varepsilon_6 + \varepsilon_7 + \varepsilon_8)(1 - \eta)U, \quad (2)$$

или

$$\Delta U = k \cdot \varepsilon_{\Sigma} \cdot (1 - \eta)U,$$

где  $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4 - \varepsilon_5 - \varepsilon_6 + \varepsilon_7 + \varepsilon_8$ ;  $\eta$  – член, характеризующий нелинейность моста (при деформациях менее  $10^{-4}$  мм/н  $\eta < 1$ );  $k$  – коэффициент тензочувствительности датчиков.

Из равенства (1) и (2) получаем следующую формулу для вычисления вертикальной силы по показаниям тензометрических мостов:

$$P = \frac{K_p}{2} \varepsilon_{\Sigma} = \frac{K_p}{2} \frac{\Delta U}{Uk(1 - \eta)}. \quad (3)$$

При проведении стендовых экспериментов для приложения на головку рельса центральной вертикальной нагрузки и вертикальной нагрузки, смещенной относительно продольной плоскости рельса, были разработаны специальные устройства, имитирующие профиль поверхности катания железнодорожного колеса. Чертежи устройств (общий вид) для приложения нагрузок приведены на рис. 3.

В эксперименте к фрагменту рельса последовательно, по сечениям (см. рис. 1), через нагрузитель прикладывалась вертикальная нагрузка  $P$ , равная 0 кН, от 100 до 200 кН с шагом 25 кН и последующим снижением нагрузки от 200 до 100 кН, 0 кН с тем же шагом до полной разгрузки.

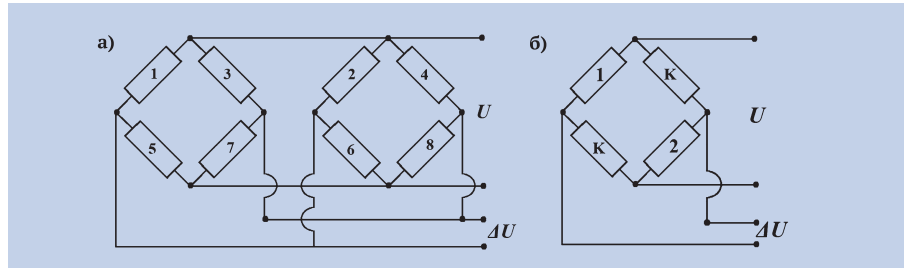


Рис. 2. Схемы соединения тензорезисторов для регистрации сигналов: а – по схеме двух параллельных полных мостов с четырехпроводной схемой подключения для вычисления разности деформаций в измеряемых сечениях – 5 (5) и – 6 (6); б – по схеме полного моста с четырехпроводной схемой подключения согласно ГОСТ Р 55050–2012

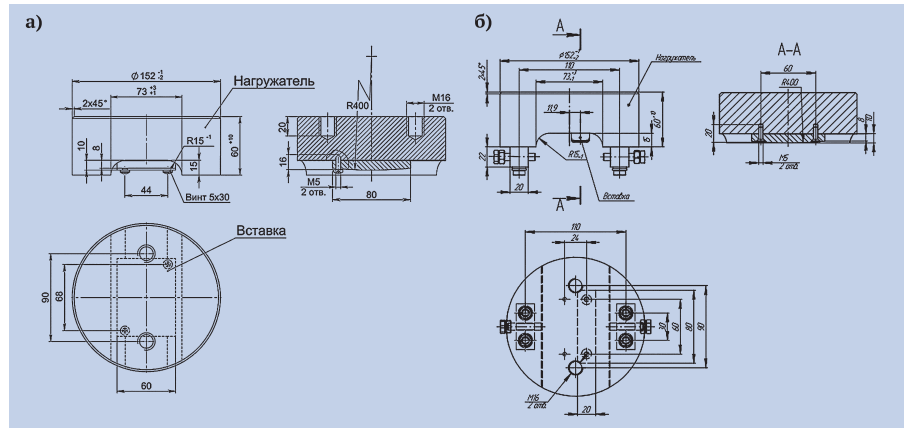


Рис. 3. Чертежи устройств для приложения на головку рельса центральной вертикальной нагрузки (а) и вертикальной нагрузки, смещенной относительно продольной оси рельса (б)

В каждом цикле нагружения – обезгрузки регистрация проводилась непрерывно до полной обезгрузки фрагмента рельса. Выполняли более трех циклов нагружения – обезгрузки. Характерная осциллограмма процесса нагружения и обезгрузки фрагмента рельса вертикальным усилием приведена на рис. 4.

Для определения масштаба измерения каждой измерительной схемы строились графики зависимости показаний прибора от вертикальной нагрузки,

прикладываемой в каждом сечении рельса (рис. 5).

Полученные значения аппроксимировались методом наименьших квадратов в зависимости  $\frac{\Delta U}{U} = K_i P$ , затем определялся коэффициент  $K_i$ . Масштабы измерения  $K_i$  в сечениях – 3–3 представлены в таблице 1.

По результатам определения масштабов измерения установлено, что для измерительной схемы, расположенной в сечениях – 6 (6) (расстояние между датчиками 408 мм),

Таблица 1. Масштабы измерения в измерительных схемах при действии центральной вертикальной нагрузки

№ сечения	$K_i$ по измерениям в сечениях 5(–5), кН*В/мВ	$K_i$ по измерениям в сечениях 6(–6), кН*В/мВ
–3	407,38	408,47
–2	387,27	405,86
–1	383,73	406,97
0	380,49	405,07
1	381,61	404,88
2	384,01	402,77
3	402,34	405,46

Таблица 2. Результаты статистического анализа масштабов измерения

Параметры выборки	Значение	
	в сечениях – 6 (6)	в сечениях – 5 (5)
Среднее значение, кН*В/мВ	405,64	383,42
Стандартное отклонение, кН*В/мВ	1,78	2,6

в сечениях с -3 по 3 (на длине 204 мм) масштаб измерения стабилен, а для измерительной схемы, расположенной в сечениях -5 (5) (расстояние между датчиками 340 мм), масштаб измерения стабилен в сечениях с -2 по 2 (на длине 136 мм). В результате статистического анализа были выбраны следующие средние значения масштабов измерения для измерительных схем, расположенных в сечениях -6 (6) и -5 (5) (табл. 2).

По результатам эксперимента определены зависимости восстановленной вертикальной силы от точки приложения нагрузки (рис. 6) согласно предложенному методу [5].

По результатам эксперимента установлено, что среднее значение восстановленных усилий на длине измерительного участка 136 мм для измерительной схемы, расположенной в сечениях -5 (5), составляет  $199,52 \pm 1,22$  кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность 0,24 %. Среднее значение восстановленных усилий на длине измерительного участка 204 мм для измерительной схемы, расположенной в сечениях -6 (6), составляет  $199,67 \pm 0,93$  кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность - 0,16 %.

**Оценка влияния поперечного смещения колеса от оси симметрии рельса на точность восстановления вертикальной силы**

При движении подвижного состава пятно контакта «колесо - рельс» непрерывно перемещается в поперечной плоскости, вертикальная сила также меняет свое расположение относительно продольной оси рельса. Поэтому были проведены дополнительные стендовые эксперименты по определению вертикальных нагрузок на рельс при действии вертикальной нагрузки, смещенной относительно продольной плоскости рельса на 12 мм.

Установлено, что среднее значение восстановленных усилий на длине измерительного участка 136 мм для измерительной схемы, расположенной в сечениях -5 (5), составляет 203,08 кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность - 1,54 %. Среднее значение восстановленных усилий на длине измерительного участка 204 мм для измерительной схемы, расположенной в сечениях -6 (6), составляет 206,29 кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность - 3,14 %.

Увеличение погрешности измерений по длине измерительного участка при смещении вертикальной нагрузки по сравнению с центральным приложением нагрузки составило:

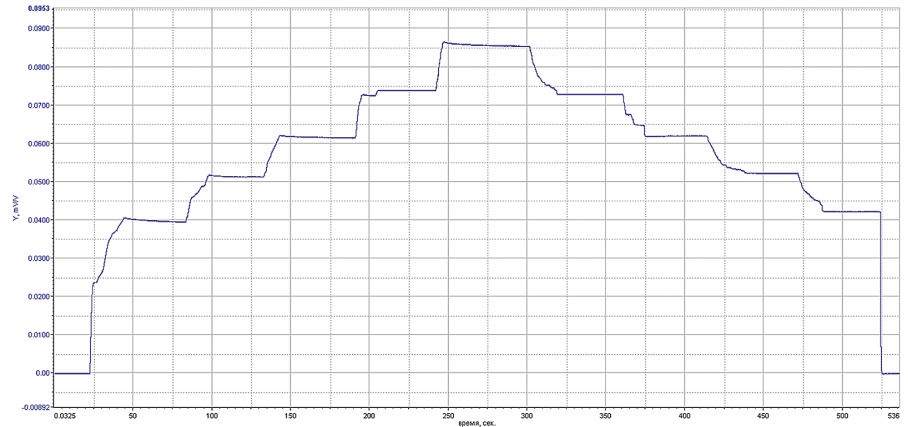


Рис. 4. Оциллограмма процесса нагружения и обезгрузки фрагмента рельса

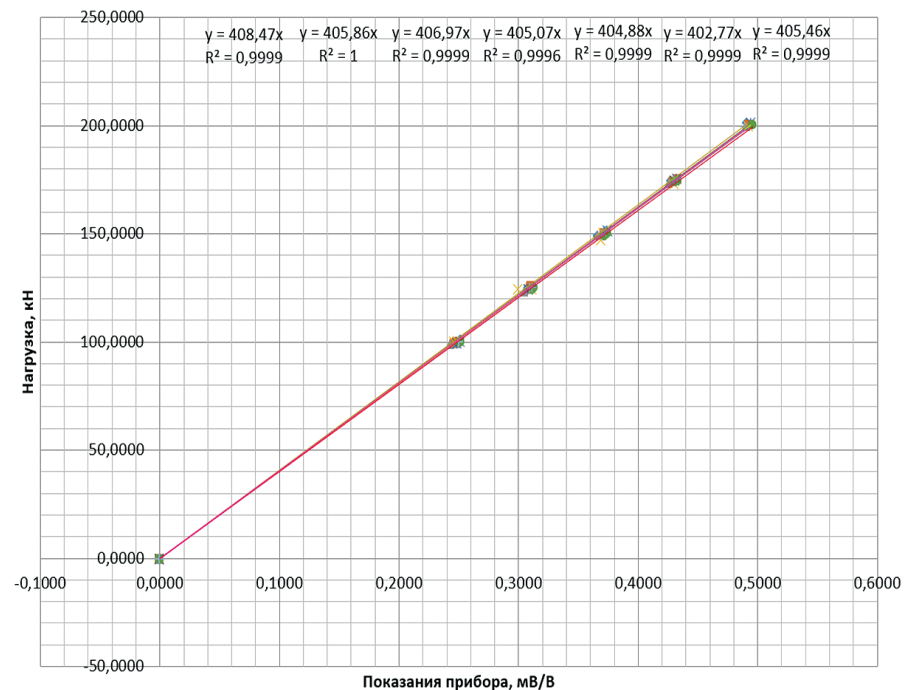


Рис. 5. Зависимость показаний прибора от вертикальной нагрузки, прикладываемой в сечении рельса

- для измерительной схемы, расположенной в сечениях -6(6), в среднем по длине измерительного участка 204 мм от 0,16 до 3,14 %;
- для измерительной схемы, расположенной в сечениях -5(5), в среднем по длине измерительного участка 136 мм - от 0,24 до 1,54 %.

**Сравнение полученных результатов с измерениями согласно ГОСТ Р 55050-2012**

После стендовых экспериментов по определению вертикальной нагрузки на рельс согласно предложенному методу [5] и сравнения полученных данных с результатами по измерению напряжений в соответствии с ГОСТ Р 55050-2012 [6] установлено, что расхождения восстановления усилия величиной 200 кН при точке приложения нагрузки в сечении 0 для измеритель-

ной схемы, расположенной в сечениях -6 (6), относительно измерительной схемы, расположенной в сечении 0 и регистрирующей показания по ГОСТ Р 55050-2012 [6], составляет 0,04 %, а для измерительной схемы, расположенной в сечениях -5 (5), - 0,01 %.

Результаты восстановления вертикальных сил по методу [5] и согласно ГОСТ 55050-2012 [6] представлены на рис. 7.

**Заключение и рекомендации**

Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность метода кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил в контакте между колесом и рельсом по измеренным напряжениям в двух сечениях рельса.

Для измерительной схемы, расположенной в сечениях -6 (6) (расстояние между датчиками 408 мм), в сечениях от -3 до 3 (на длине 204 мм) среднее зна-

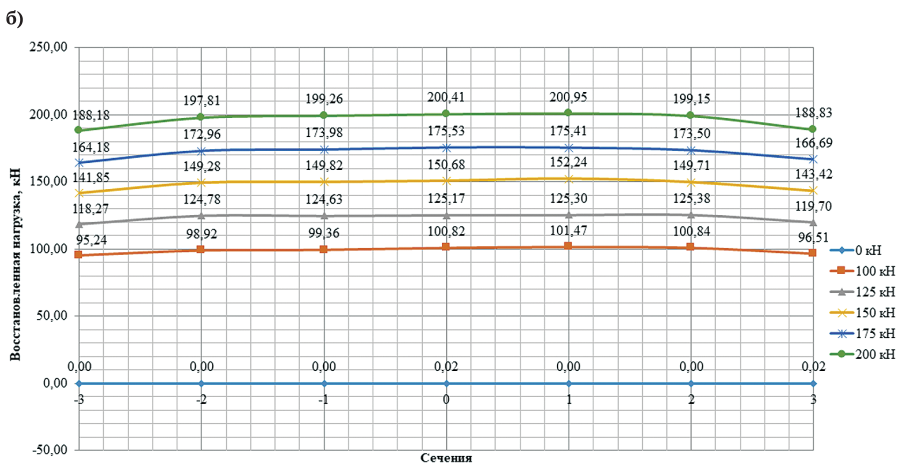
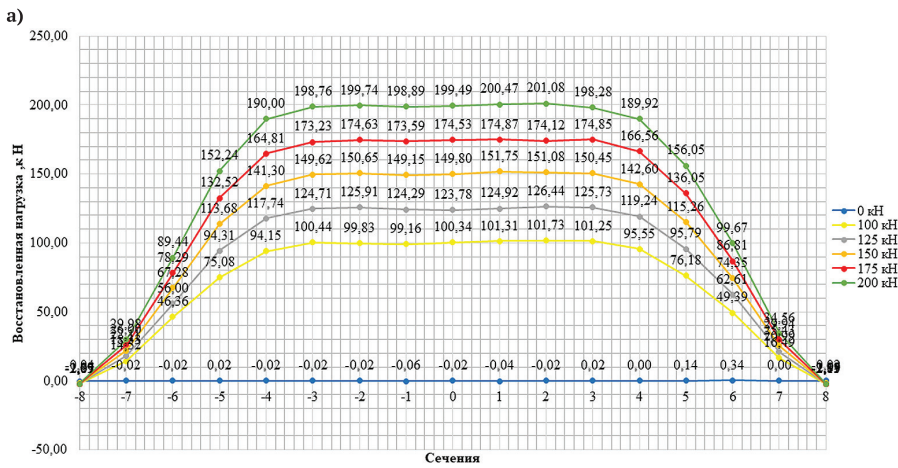


Рис. 6. Зависимость восстановленных усилий от точки приложения нагрузки: а – по сечениям –6(6); б – по сечениям –5(5)

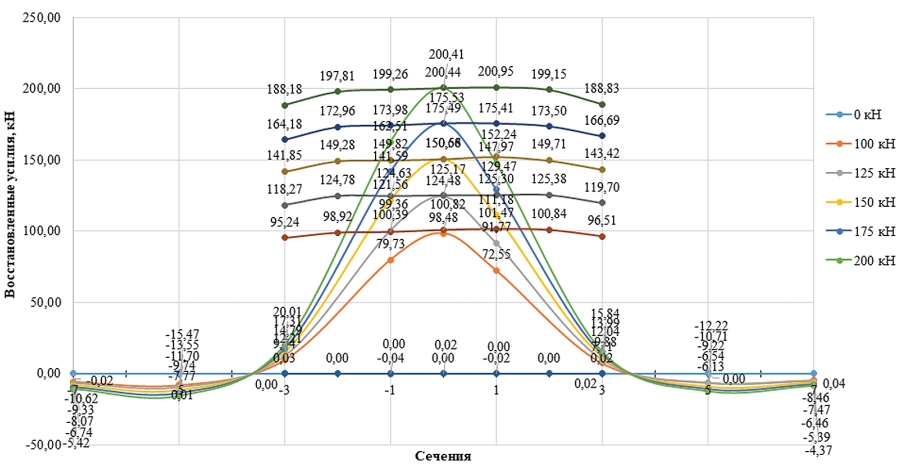


Рис. 7. Зависимость восстановленных усилий от точки приложения нагрузки для измерительной схемы, расположенной в сечениях –5(5), расстояние между датчиками 340 мм

чение восстановленных усилий составляет  $199,67 \pm 0,93$  кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность 0,16 %. Для измерительной схемы, расположенной в сечениях –5(5) (расстояние между датчиками 340 мм), в сечениях от –2 до 2 (на длине 136 мм) среднее значение восстановленных усилий составляет  $199,52 \pm 1,22$  кН при нагрузке 200 кН. Относительная погрешность – 0,24 %.

Оптимальный вариант для вос-

становления вертикальной нагрузки в контакте между колесом и рельсом по методу [5] — измерение напряжений в сечениях 6 (–6) (расстояние между датчиками 408 мм), длина измерительного участка 204 мм. Это обеспечивает стандартное отклонение восстановленной вертикальной силы не более 1 % по длине измерительного участка, при этом влияние поперечного смещения

колесной пары на результат составляет не более 3,14 %.

Восстановленные нагрузки по методу [5] и согласно ГОСТ Р 55050–2012 [6] совпадают количественно, однако значительно отличаются качественно, так как предлагаемый метод [5] дает примерно в 20 раз больше статистически достоверной информации и позволяет проводить измерения при смещениях колеса.

Таким образом, подтверждена работоспособность предложенного метода [5] для определения нагрузок от колеса на рельс по измеренным напряжениям в двух сечениях рельса. Метод рекомендуется для определения силовых воздействий подвижного состава на железнодорожный путь и, кроме того, может использоваться для выявления дефектов на поверхности катания колес при диагностике подвижного состава «на ходу».

**Литература**

1. Ромен Ю. С. Определение сил взаимодействия колес и рельсов в процессе испытаний подвижного состава // Матер. XIII межд. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». СПб.: ПГУПС, 2018. С. 120–122.
2. Шевченко Д. В., Савушкин Р. А., Кузьминский Я. О. и др. Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь // Техн. жел. дорог. 2018. № 1 (41). С. 38–51.
3. Третьяков А. В., Петров А. А., Зимакова М. В. и др. Опыт применения тензометрической колесной пары при проведении ходовых динамических испытаний грузовых вагонов // Матер. XIII межд. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». СПб.: ПГУПС, 2018. С. 165–168.
4. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
5. Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Петров А. А. Кусочно-непрерывное измерение сил между колесом и рельсом по касательным напряжениям в двух сечениях рельса // Транспорт РФ. 2018. № 3 (76). С. 58–64.
6. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с Изм. № 1 от 01.10.2014). М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
7. ГОСТ 8161–75. Рельсы железнодорожные типа Р65. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1975. – 9 с.