

Экспериментальные исследования по определению суммарных боковых сил в кривых участках пути со шпалами типоразмера 1 526 мм

Д.А. Ковенькин¹✉, Р.И. Живин²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

Настоящая работа посвящена анализу результатов экспериментальных исследований движения поездов по участкам пути со шпалами типоразмера 1 526 мм. Такие шпалы в качестве эксперимента используются на Восточно-Сибирской железной дороге в кривых радиусом менее 350 м с 2016 г. В теории применение шпал этого типоразмера должно позволить снизить интенсивность уширения рельсовой колеи. Кроме того, анализ трудозатрат по текущему содержанию пути на участках с такими шпалами показал их снижение. Целью эксперимента являлось определение фактических внешних нагрузок, действующих от подвижного состава на рельсы в зависимости от нагрузки на ось. Для измерения нагрузок по деформации рельса в данном его сечении или на очень коротком отрезке рельса применялся метод Шлупфа. Определялись боковые силы, оказывающие влияние на состояние ширины рельсовой колеи. После проведения аппроксимации получили кривые боковых сил в зависимости от осевых нагрузок. С целью подтверждения достоверности результатов эксперимента были произведены теоретические расчеты. Сравнение итогов теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой показывает, что методы и алгоритмы определения вынужденных колебаний рельсов объективно отражают действительность и вполне пригодны для практического использования. Для подтверждения выдвинутых теоретических предположений о надежности шпал колеи 1 526 мм необходимо дальнейшее осуществление подобных экспериментальных исследований для шпал колеи 1 520 и 1 530 мм.

Ключевые слова

шпалы, колея 1 526 мм, боковые силы, метод Шлупфа, кривые участки пути

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Экспериментальные исследования по определению суммарных боковых сил в кривых участках пути со шпалами типоразмера 1 526 мм / Д.А. Ковенькин, Р.И. Живин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 78–90. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).78-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.09.2024 г.; принята к публикации: 23.09.2024 г.

Experimental studies to determine the total lateral forces in curved sections of track with sleepers of standard size 1 526 mm

D.A. Koven'kin¹✉, R.I. Zhivin²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²The East Siberian Directorate of Infrastructure – a Structural Division of the Central Directorate of Infrastructure – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

This work is devoted to the analysis of the results of experimental studies of train movement along track sections with sleepers of standard size 1 526 mm. Such sleepers, as a pilot experiment, have been used on the East Siberian Railway in curves with a radius of less than 350 m since 2016. In theory, the use of sleepers of this standard size will reduce the intensity of widening of the rail track. In addition, the analysis of labor costs for the current maintenance of the track in such sections showed a decrease. The purpose of the experimental studies was to determine the actual external loads acting from the rolling stock on the rails, depending on the axle load. The Schlumpf method was used to measure the deformation loads of the rail in a given section or on a very short section of the rail. The lateral forces influencing the state of the track width were determined. After the approximation, the curves of the lateral forces were obtained depending on the axial loads. In order to confirm the reliability of the experimental results, theoretical calculations were carried out. A comparison of the results of theoretical and experimental studies of the interaction of the elements of the rail grating under train load shows that the methods and algorithms for determining forced vibrations of rails objectively reflect reality and are quite suitable for practical use. To confirm the theoretical assumptions put forward about the reliability of sleepers of 1 526 mm gauge, it is necessary to conduct similar experimental studies for sleepers of 1520 and 1530 mm gauge.

Keywords

sleepers, 1526 mm gauge, lateral forces, Shlumpf's method, curved sections of the track

For citation

Koven'kin D.A., Zhivin R.I. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu summarnykh bokovykh usilii na krivolineinykh uchastkakh zheleznodorozhnogo puti so shpalami standartnogo razmera 1 526 mm [Experimental studies to determine the total lateral forces in curved sections of track with sleepers of standard size 1 526 mm]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 78–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).78-90.

Article info

Received: September 16, 2024; Revised: September 20, 2024; Accepted: September 23, 2024.

Введение

В настоящее время в Восточный полигон входят Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская и Дальневосточная железные дороги. Эксплуатационная длина составляет 17 207 км, в том числе электрифицированных линий 9 196 км. Доля двухпутных линий 7 812 км (45,4 %). Оборудовано автоматической блокировкой 12 144 км (70,6 %), полуавтоматической блокировкой 5 063 км (29,4 %), 827 железнодорожных станций и 21 719 искусственных сооружений.

Восточный полигон обеспечивает работу сразу нескольких трансевразийских коридоров:

- перевозки грузов из западных регионов страны в сторону портов Дальнего Востока;
- отправки через железнодорожные сухопутные переходы Дальнего Востока к промышленным центрам Китая;
- отправки по транзитному маршруту через территорию Монголии.

Программа модернизации Восточного полигона включает в себя следующие этапы проекта:

- модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей (увеличение провозной способности до 210 млн т к 2025 г.);
- сокращение времени контейнерных перевозок до семи суток и увеличение объемов контейнерных перевозок в 4 раза;
- проекты развития Красноярской железной дороги.

Время и политическая ситуация диктуют свои правила. Впервые за всю историю экономики железных дорог грузоперевозки на Восток превысили объем перевозок на Запад. Грузоперевозки в восточном направлении выросли на 10 % и сдерживаются только инфраструктурными ограничениями. В то же время рост грузоперевозок приводит к интенсивному износу существующей инфраструк-

туры, что требует дополнительных затрат на поддержание ее работоспособного состояния. В этой связи в первую очередь необходимо разрабатывать и внедрять конструкции пути с повышенной надежностью, а также совершенствовать существующие конструкции и нормы их содержания.

Изменение условий эксплуатации, повышение осевых нагрузок, увеличение массы поездов, безусловно, ведет к более интенсивному расстройству узлов промежуточных рельсовых скреплений, а также износу рельсовых нитей. Все это приводит к нестабильности ширины рельсовой колеи, особенно в кривых участках пути.

С целью повышения надежности работы конструкции пути на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) с 2016 г. в кривые радиусом менее 350 м в качестве эксперимента производится укладка шпал с нормой зашивки 1 526 мм. В теории применение шпал такого типоразмера должно позволить снизить интенсивность увеличения ширины рельсовой колеи и даже при боковом износе рельсов до 18 мм не приведет к ее критическим значениям, требующим снижения скорости или закрытия пути для движения поездов. Так, в работах Д.В. Величко дана оценка влияния типа рельсовых скреплений на размер ширины колеи при сборке рельсошпальной решетки [1, 2]. В связи с этим для подтверждения выдвинутых теоретических предположений необходимо проведение специальных экспериментальных исследований.

Целью экспериментальных исследований являлось определение фактических внешних нагрузок, действующих от подвижного состава на рельсы, получение качественной закономерности и количественных значений, характеризующих особенности интенсивности изменения ширины колеи в кривых участках в зависимо-

сти от параметров пути, осевой нагрузки и скорости движения подвижного состава.

Методика исследований

Испытания проводились на основе тензометрических измерений, выводимых с помощью мобильных устройств в краткосрочный период времени. Подобного рода эксперименты осуществлялись многими учеными: М.Ф. Вериго [3], О.П. Ершковым [4, 5], Н.И. Карпущенко [6, 7], А.Я. Коганом [8, 9], В.О. Певзнером, О.А. Сусловым [10] и др. Достаточно точные методы испытаний апробированы учеными Петербургского государственного университета путей сообщения, которые предложили метод двух сечений [11]. Экспериментальные исследования динамики вагонов в кривых участках ВСЖД малого радиуса с использованием специализированного комплекса проводились в том числе и учеными Иркутского государственного университета путей сообщения [12, 13].

Авторами же для проведения измерений использовался метод, представленный в ГОСТ 34759-2021 [14], который регламентирует способ оценки сил посредством регистрации относительных деформаций с использованием тензорезисторов, соединенных в тензосхемы. Задача является динамической в связи с ударными нагрузками при воздействии колеса на рельс. Процесс изменения нагрузок и вызванных ими деформаций и напряжений протекает достаточно быстро во времени. Для того чтобы регистрировать данные процессы, нужны системы обработки сигналов с определенной частотой дискретизации.

Для измерений относительной деформации рельсов применялись тензорезисторы с номинальным сопротивлением 100 Ом и базой 20 мм. При определении вертикальной и боковой силы, действующей от колеса подвижного состава на рельс, использовались тензорезисторы с разбросом тензочувствительности не более 1 %.

При проведении сбора данных оценке подлежали показатели воздействия на путь от грузовых поездов в реальный момент времени.

Основной измерительной схемой, используемой для определения сил, возникающих при набегании колеса подвижного состава на головку рельса с помощью тензометрирования, является мостовая схема (рис. 1).

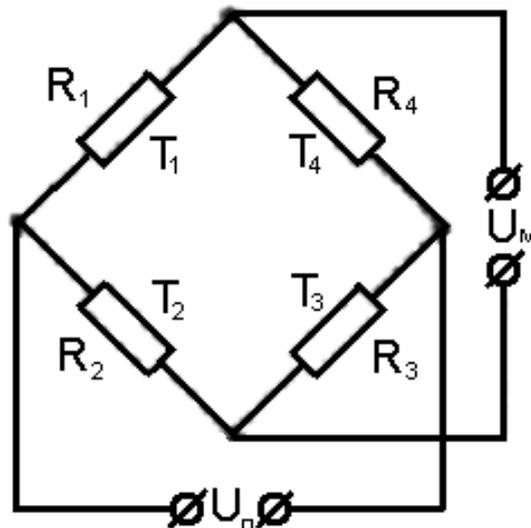


Рис. 1. Схема тензометрического моста с одним тензорезистором в каждом плече:

T_1, T_2, T_3, T_4 – тензорезисторы; U_{Π} – источник питания; $U_{\text{М}}$ – напряжение на выходе моста

Fig. 1. Diagram of a strain gauge bridge with one strain gauge in each arm:

T_1, T_2, T_3, T_4 – tensorisistors; U_{Π} – is the power supply; $U_{\text{М}}$ – is the voltage at the output of the bridge

Для измерения деформации изгиба при наличии деформации растяжения при измерении боковой нагрузки от подвижного состава использовались четыре активных тензорезистора (полный мост). На объект исследования наряду с изгибающим моментом действует растягивающая (сжимающая) сила. Можно установить четыре активных тензорезистора T_1, T_2, T_3 и T_4 и включить их в схему моста. При этом напряжение на выходе моста определяют по формуле:

$$U_{\text{М}} \approx U_{\Pi} \frac{\Delta R}{R}.$$

При такой схеме исключается действие составляющей растяжения, поскольку она вызывает у всех тензорезисторов одинаковое по величине и знаку изменение сопротивления.

Места установки тензорезисторов тщательно очищают от ржавчины, окалины или загрязнений с помощью абразивных средств.

Установка тензорезисторов в зависимости от их типа, назначения и условий испытаний выполнялась наклейкой непосредственно на объект исследования клеями холодного отверждения или экспресс-клеями типа циакрин для тензорезисторов общего назначения.

Для измерения боковых сил по деформации рельса в данном его сечении или на очень коротком отрезке рельса (порядка 1,0 м) использовался метод Шлупфа. Этот метод измерения приложенной к рельсу боковой силы сводится к измерению изгибающих моментов в шейке рельса [15] в точках A и C (датчиками 1, 2 и 5, 6):

$$M_A = Y_6 \cdot h_1 - Q \cdot e \quad (1)$$

$$M_C = Y_6 \cdot h_2 - Q \cdot e \quad (2)$$

где h_1, h_2 – плечи приложения силы Y_6 ; e – эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки (рис. 2).

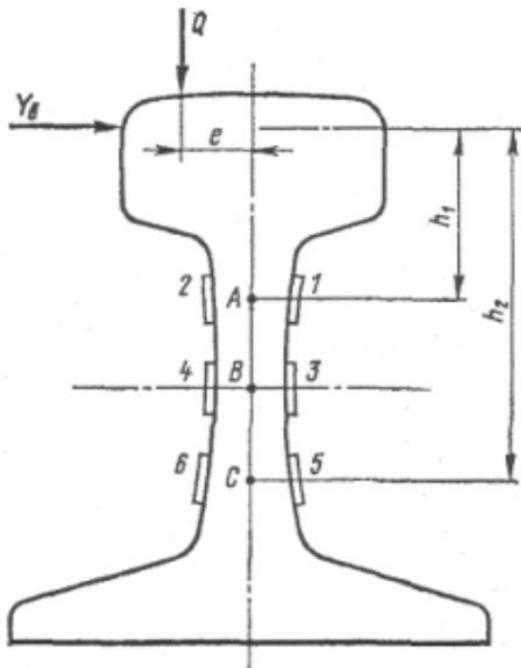


Рис. 2. Схема измерения в заданном сечении рельса динамических вертикальных Q и боковых Y_6 сил, передаваемых колесами подвижного состава: 1–6 – тензорезисторы

Fig. 2. A scheme for measuring dynamic vertical Q and lateral Y_6 forces transmitted by the wheels of a rolling stock in a given rail section: 1–6 – tensoristors

Вычитая (1) из (2), получим выражение боковой силы:

$$Y_6 = \frac{M_A - M_C}{h_2 - h_1}.$$

Точки A и C выбирают так, чтобы моменты сопротивления горизонтальных сечений, проходящих через эти точки, были равны, а наклеенные вертикально на шейку рельса датчики в точках A и C испытывали деформации, пропорциональные действующим моментам M_A и M_C . Это

достигается подбором одинаковой толщиной шеек рельсов по оси датчиков в точках A и C .

Моменты сил M_A и M_C вычитаются электрически в мостовой схеме включением датчиков в сечении A в одно плечо моста, а датчиков в сечении C – в другое плечо.

Схема измерения с помощью тензорезисторов в сечении рельса динамических вертикальных и боковых сил, передаваемых колесами подвижного состава в пути, показана на рис. 3.

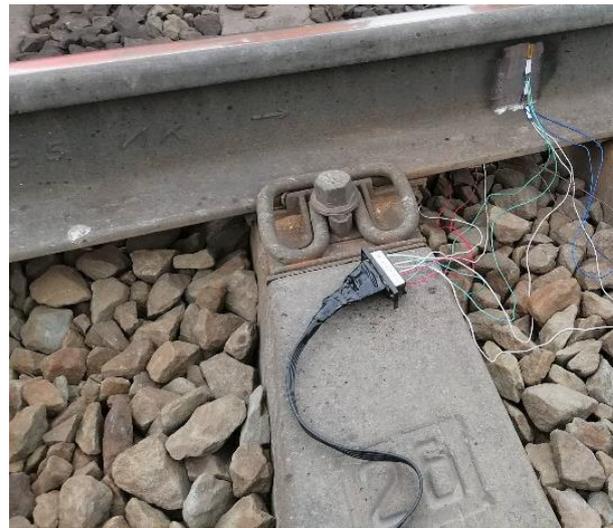


Рис. 3. Схема наклейки тензодатчиков в пути
Fig. 3. Load cell sticker diagram on the track

Для записи регистрируемых параметров применялся программно-аппаратный комплекс, состоящий из измерительного модуля QMBox и ноутбука. Все источники питания тензорезисторов, а также измерительный модуль размещаются рядом с действующим испытательным путем в пределах габарита приближения строений. Тензорезисторы на пути соединяют с регистрирующей аппаратурой специальными кабелями. Получаемые при прохождении подвижного состава данные по измерениям динамических процессов в пути подвергаются обработке по специальным методикам.

Тарировка датчиков

С целью настройки достаточной точности измерений тарировка датчиков проводилась в полевых условиях на экспериментальном участке. Для этого использовалась автомотриса с известной осевой нагрузкой равной 5 т на ось (рис. 4).



Рис. 4. Тарировка тензометрических схем на экспериментальном участке

Fig. 4. Calibration of strain gauge circuits at the experimental site

Измерения проводились в динамике и статике с полной остановкой автомотрисы одной осью над сечением с датчиками. Результаты тарировки боковых сил представлены в виде графиков на рис. 5.

Тарировочные испытания позволили перевести условные единицы измерений при определении боковых сил в абсолютные величины. По данным тарировочных испытаний чувствительность схем к воздействию измеряемых усилий, характеризуемая средним напряжением активных датчиков (в $\text{кг}/\text{см}^2$), при воздействии нагрузки в размере 5 т на ось составила по схеме измерения боковых сил $662,14 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Характеристика участков проведения испытаний

Для проведения тензометрических испытаний по определению боковых нагрузок, передаваемых подвижным составом на рельсы, были выбраны участки пути на ВСЖД, характеристики которых представлены в табл. 1.

В дни испытаний с 3 по 10 июля 2024 г. геометрия рельсовой колеи на экспериментальных участках имела следующие параметры:

1. На первом участке фактическое возвышение рельса – 112 мм, ширина колеи 1 532 мм, износ боковой – 1,3 мм, вертикальный – 0,6 мм.

2. На втором участке фактическое возвышение рельса – 104 мм, ширина колеи 1 546 мм, износ боковой – 8,8 мм, вертикальный – 1,5 мм.

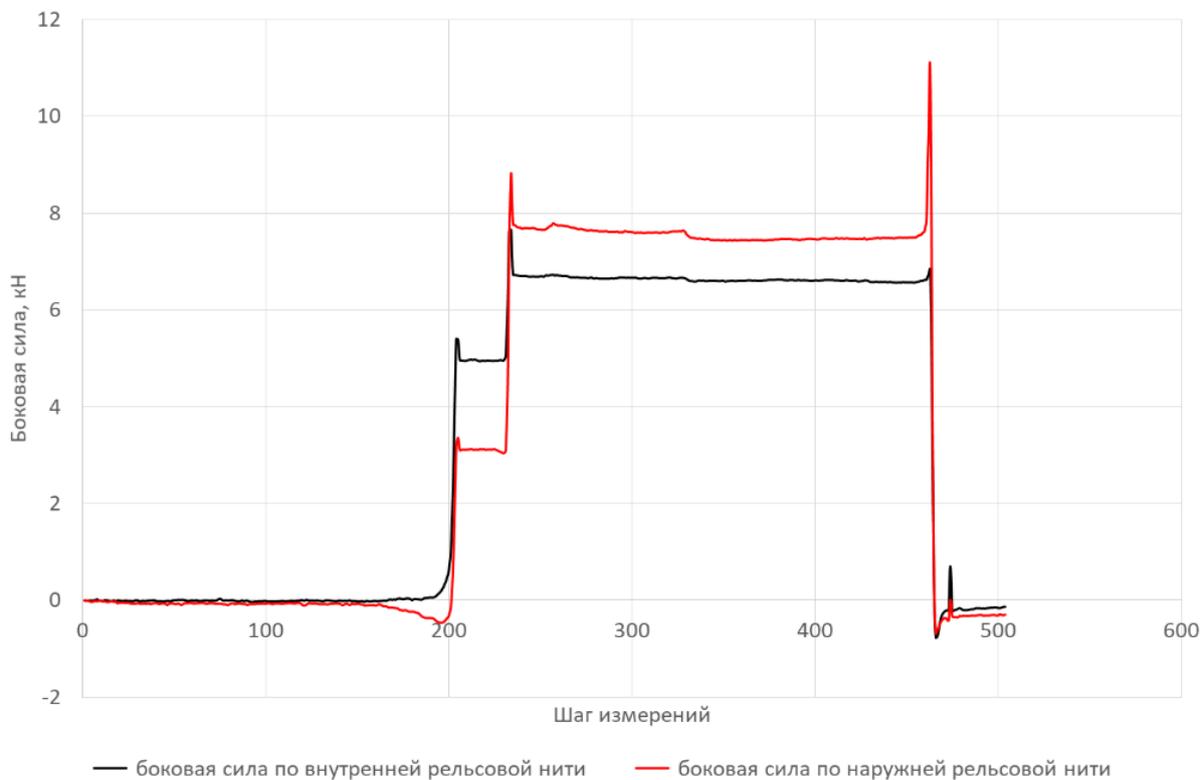


Рис. 5. Результаты тарировки боковых сил
Fig. 5. Lateral force calibration results

Таблица 1. Характеристика участков проведения испытаний
Table 1. Characteristics of test sites

Характеристика участка Section characteristics	ПЧ № 9 ТР № 9	
	1	2
№ участка № plot	1	2
Перегон Section	Большой Луг – Подкаменная	Большой Луг – Подкаменная
Путь Track	1	2
Км, пк Km, pc	5 225 пк 9	5 225 пк 9
Грузонапряженность, млн т · км брутто/км в год Cargo density, mln t · km gross/km per year	64,9	158,4
Типоразмер шпал, мм Standard size of sleepers, mm	1 526	1 526
Установленная скорость, км/ч пасс/груз Set speed, km/h passanger/freight	70/60	70/60
Кривая радиус, м/длина кривой, м Curve radius, m/curve length, m	290/349	298/347
Возвышение наружного рельса, мм Rail mark difference, mm	110	110
Профиль Profile	спуск 6,8	подъем 6,8

На участках проведения эксперимента обращался типовой подвижной состав локомотивами ВЛ85, ВЛ80р, ЗЭС5К, ЭП1. За опытный период веса поездов распределились следующим образом:

– на первом участке до 3 000 т – 58 %, 3 000–4 100 т – 42 %;

– на втором участке до 3 000 т – 13 %, 3 000–5 000 т – 33 %, 5 001–6 500 т – 27 %, более 6 500 т – 27 %.

В то же время нагрузка на ось распределялась в таких интервалах:

– на первом участке до 10 т на ось – 32 %, 10–15 т – 32 %, более 15 до 20 т – 36 %;

– на втором участке до 16 т на ось – 20 %, 19–21 т – 33 %, 22–23,5 т – 13 %, более 23,5 до 25 т – 34 %.

Состояние пути на первом участке можно оценить как отличное: все элементы новые, так как в мае – июне 2024 г. в данном месте проведен капитальный ремонт первого уровня. Пропущенный тоннаж на экспериментальном участке составил 5,4 млн т брутто. Состояние пути на втором участке удовлетворительное. Результаты прохода вагона путеизмерителя от 22 июня 2024 г. показывают наличие просадок II степени вблизи места проведения измерений. Последний капитальный ремонт про-

дился в мае 2019 г. Пропущенный тоннаж в момент проведения эксперимента составлял около 800 млн т брутто. Последняя смена наружной рельсовой нити датируется 22 сентября 2023 г.

Результаты измерений

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить фактические внешние нагрузки, действующие от подвижного состава на рельсы. Результаты испытаний представлены в виде осциллограмм (рис. 6–9).

Данные осциллограмм были статистически обработаны [16, 17], результаты сведены в таблицу (табл. 2). При принятом уровне надежности 0,95 согласно правилу трех сигм необходимо как минимум 25 измерений. Всего за время проведения эксперимента на каждом участке были проведены измерения от прохода порядка 50 поездов. В связи с этим можно сделать вывод о повышении надежности доверительных оценок. Если внимательно посмотреть на осциллограммы и сравнить их, то можно заметить, что на втором участке амплитуда колебаний заметно больше, чем на первом. Также на втором участке можно наблюдать остаточные деформации. Конечно, это связано с состоянием пути.

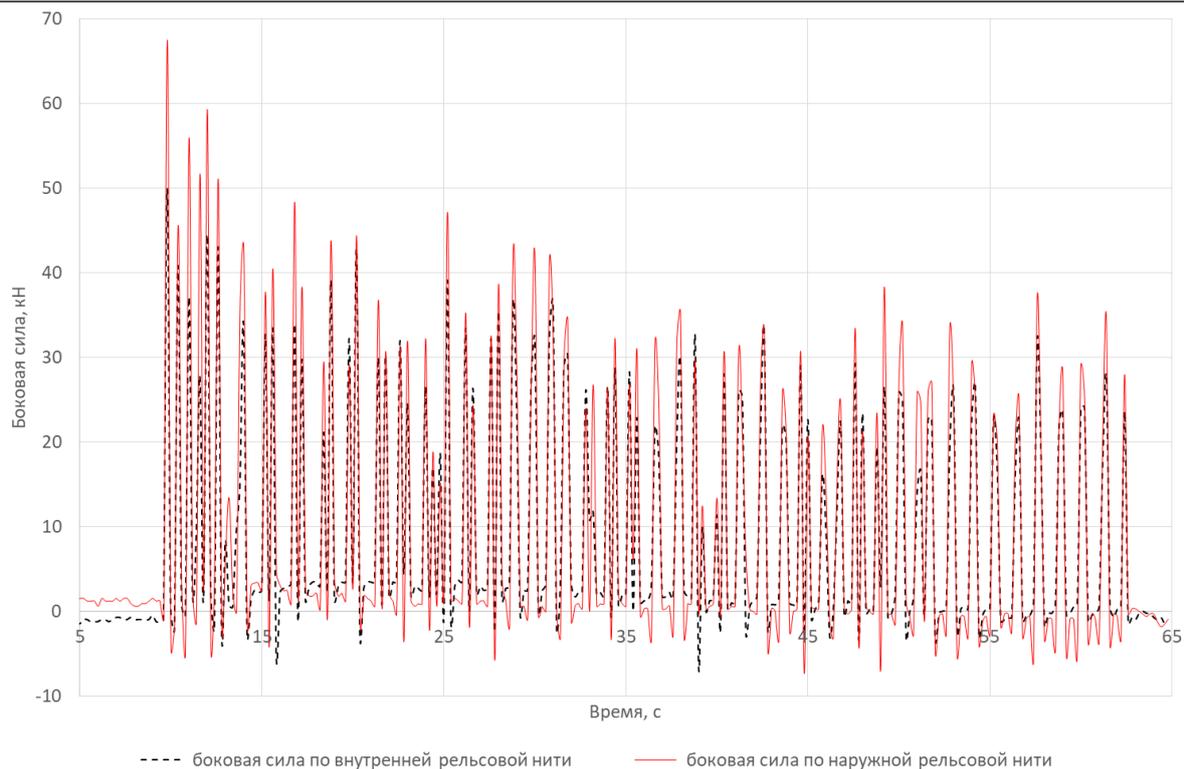


Рис. 6. Образец осциллограммы боковых сил, передаваемых от колеса к рельсу: локомотив 3ЭС5К № 151, вес поезда 3 347 тс, нагрузка на ось 20,04 тс на ось, скорость 47 км/ч, участок № 1
Fig. 6. Sample oscillogram of lateral forces transmitted from wheel to rail: locomotive 3ES5K No. 151, train weight 3 347 ts, axle load 20,04 ts/axle, speed 47 km/h, section No. 1

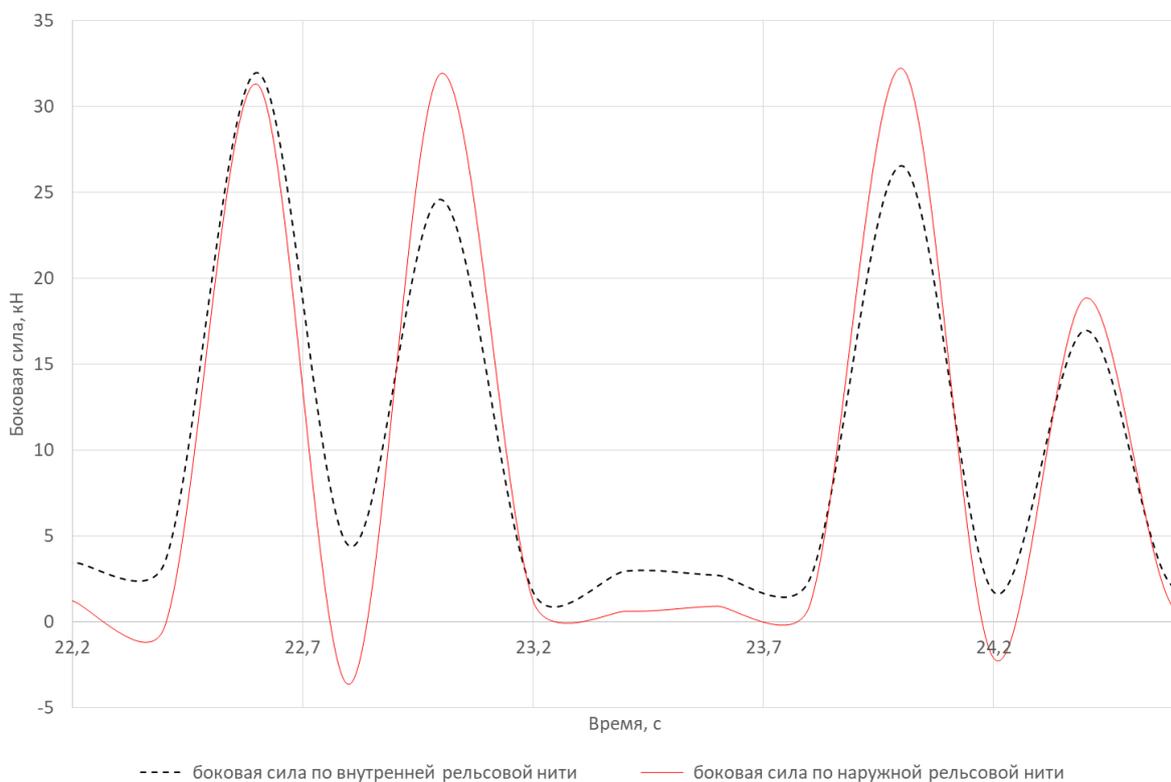


Рис. 7. Фрагмент осциллограммы: проход вагона, участок № 1
Fig. 7. A fragment of the oscillogram: the passage of the carriage, section No. 1

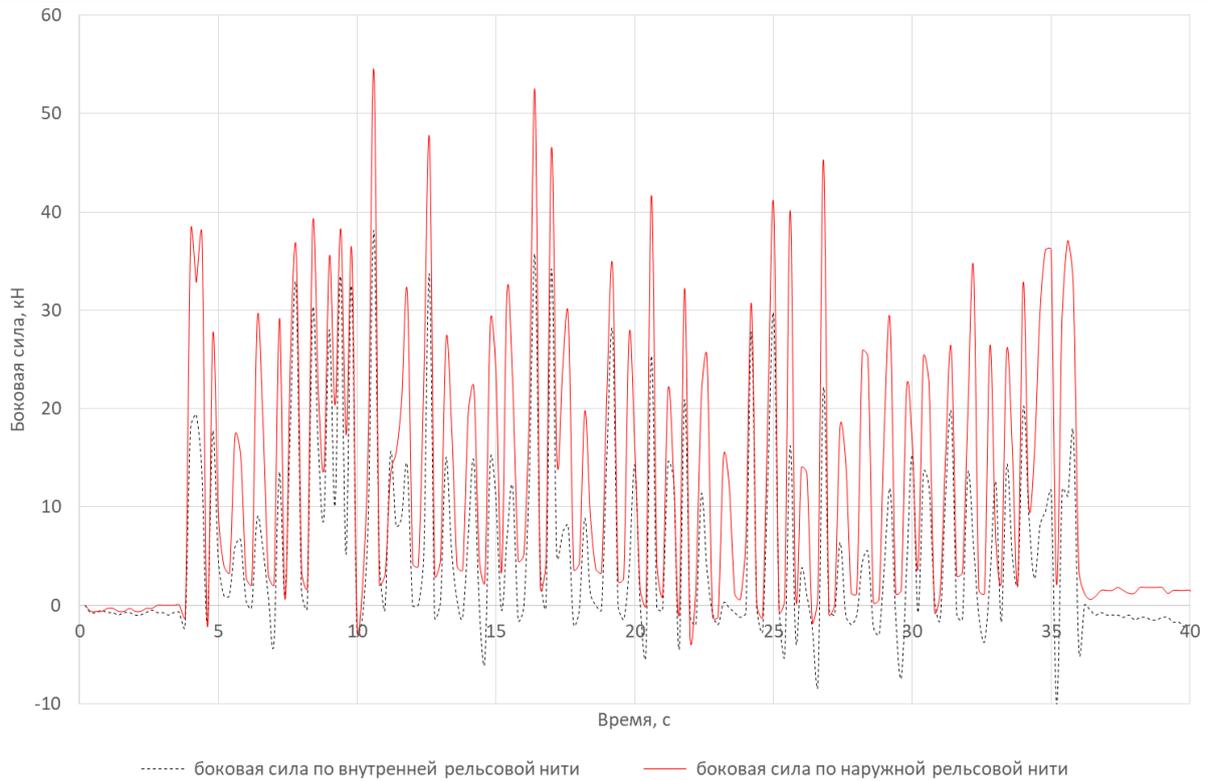


Рис. 8. Образец осциллограммы боковых сил, передаваемых от колеса к рельсу: локомотив 3ЭС5К №537, вес поезда 3 297 тс, нагрузка на ось 19,17 тс/ось, скорость 49 км/ч, участок № 2

Fig. 8. Sample of the oscillogram of lateral forces transmitted from the wheel to the rail:

locomotive 3ES5K No. 537, train weight 3 297 ts, axle load 19,17 ts/axle, speed 49 km/h, section No. 2

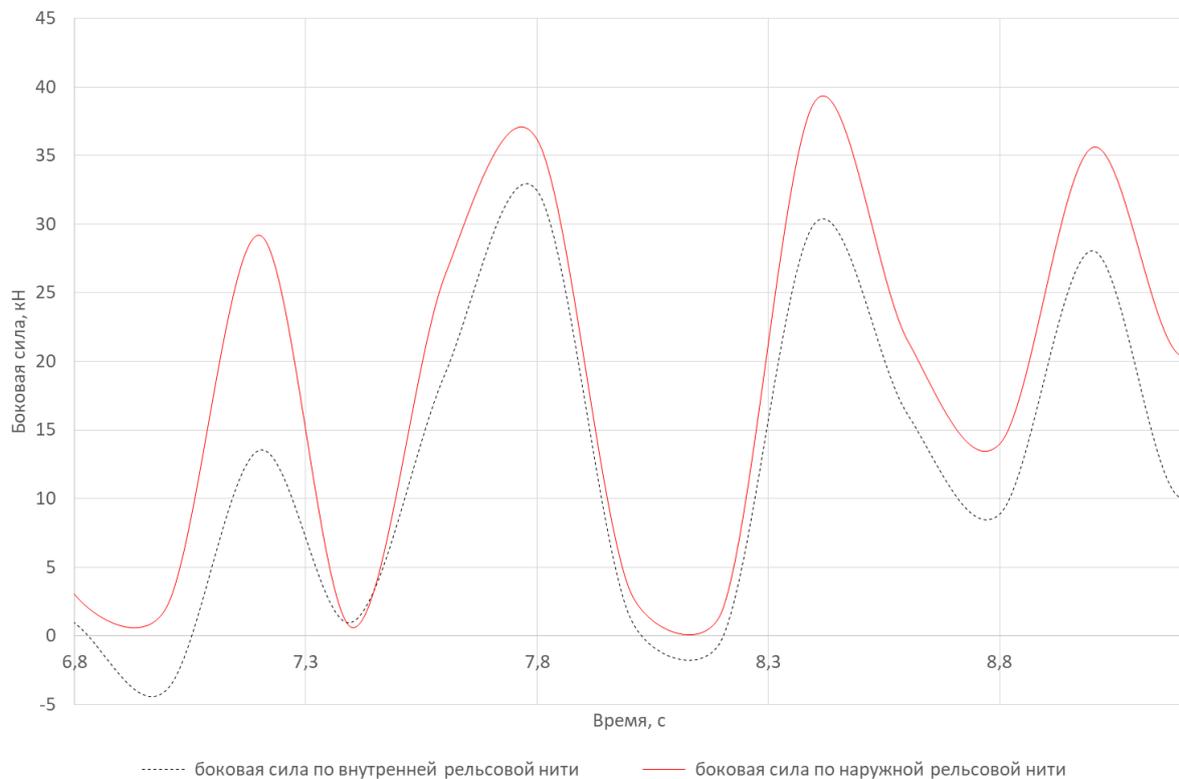


Рис. 9. Фрагмент осциллограммы: проход вагона, участок № 2

Fig. 9. A fragment of the oscillogram: the passage of the carriage, section No. 2

По представленным данным (табл. 2) подвижного состава по пути, от нагрузок на боковые силы, возникающих в рельсах при проходе

Таблица 2. Экспериментальные значения боковых сил, действующих на путь от подвижного состава
Table 2. Experimental values of the lateral forces acting on the path from the rolling stock

№ участка испытаний Test site No	Средняя нагрузка на ось, тс/ось Average axle load, tc/axle	Средняя скорость движения, км/ч Average speed, km/h	Измеренная боковая сила, средние значения, кН Measured lateral force, average values, kN			
			По наружной рельсовой нити On the outer rail	Среднеквадратическое отклонение Root mean square deviation	По внутренней рельсовой нити On the inner rail	Среднеквадратическое отклонение Root mean square deviation
1	6,36	51	9,41	3,28	9,29	2,29
	8,84	51	12,80	9,31	12,95	4,96
	11,10	48	18,52	8,45	14,16	5,39
	14,92	42	21,18	8,12	20,48	6,62
	19,22	47	28,35	7,79	26,63	7,40
2	13,69	48	22,09	7,17	20,20	5,16
	19,57	45	29,47	6,47	28,34	6,20
	21,31	40	30,93	7,65	29,41	7,90
	23,92	45	34,27	7,06	31,75	7,78
	24,72	44	37,54	7,89	34,82	8,97

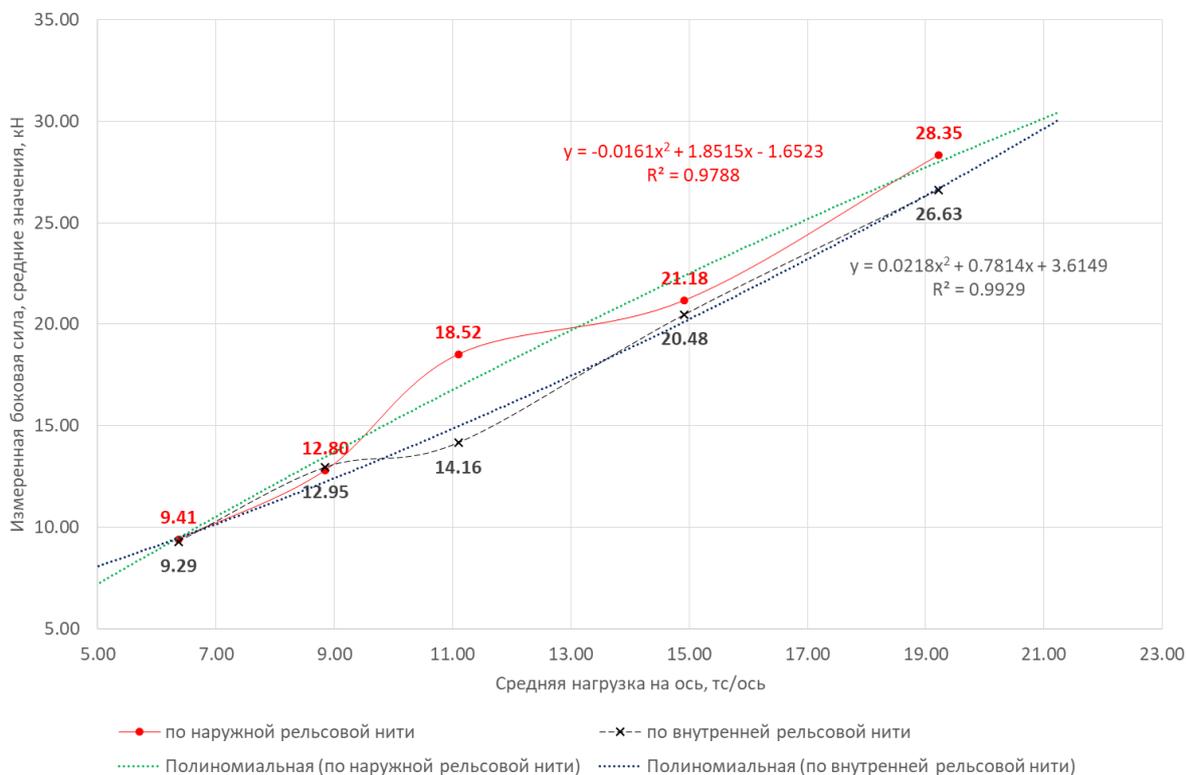


Рис. 10. График зависимости между боковыми силами, передаваемыми от колеса к рельсу и нагрузкой на ось (участок № 1)

Fig. 10. Graph of the relationship between the lateral forces, transmitted from the wheel to the rail and the axle load (section No. 1)

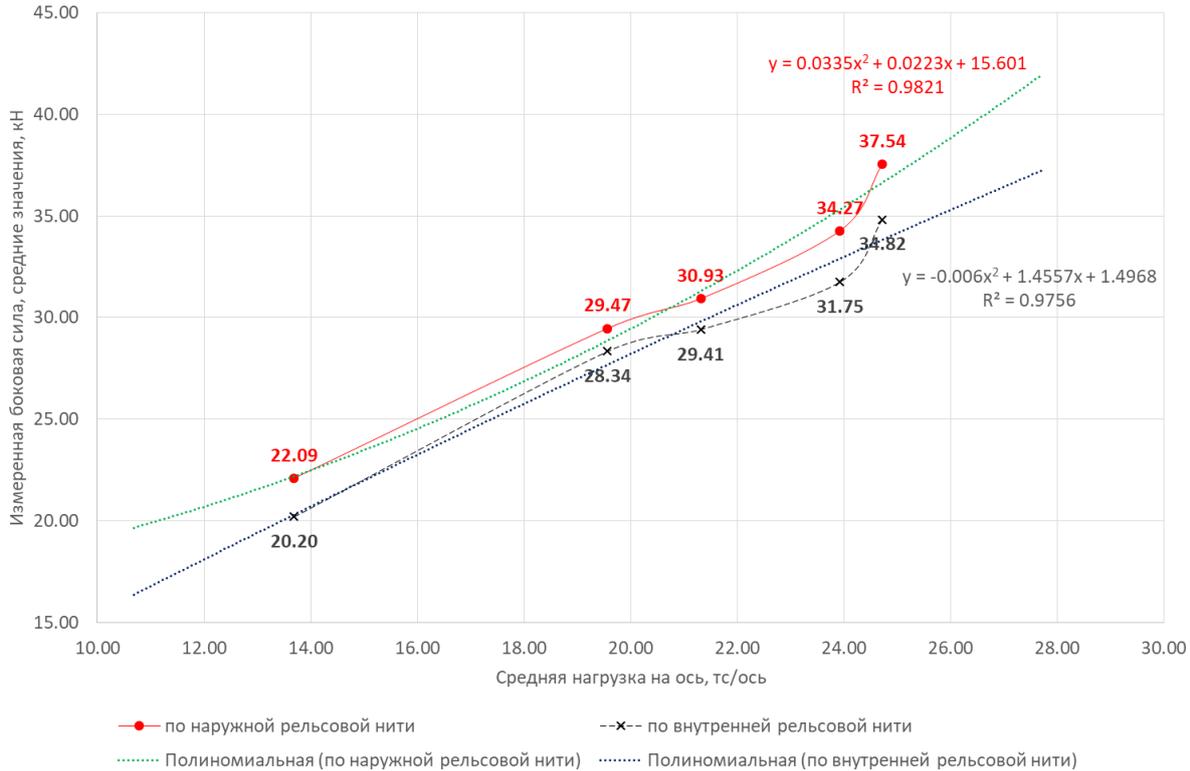


Рис. 11. График зависимости между боковыми силами, передаваемыми от колеса к рельсу и нагрузкой на ось (участок № 2)

Fig. 11. Graph of the relationship between the lateral forces, transmitted from the wheel to the rail and the axle load (section No. 2)

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить фактические внешние нагрузки, оказываемые подвижным составом на рельсы. Определялись боковые силы, влияющие на состояние ширины рельсовой колеи. После проведенной аппроксимации получили кривые боковых сил в зависимости от осевых нагрузок.

С целью подтверждения достоверности результатов эксперимента произведены теоретические расчеты.

Результаты теоретических расчетов

Теоретические расчеты производились с помощью программы «Взаимодействие экипажа и пути при пространственных колебаниях подвижного состава», разработанной под руководством доктора технических наук А.Я. Кога-на. В работе [18] представлены значения нагрузки, рассчитанных по данной методике.

Боковые силы, действующие на рельсы, определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} Y_{B1}(d_{1il}, u_{1il}) &= Y_1(d_{1il}) + Y_{f1}(u_{1il}); \\ Y_{B2}(d_{1il}, u_{1il}) &= Y_2(d_{1il}) + Y_{f2}(u_{1il}), \end{aligned} \right\}$$

где $Y_{B1}(d_{1il}, u_{1il})$ – боковая сила, действующая на наружную рельсовую нить; $Y_{B2}(d_{1il}, u_{1il})$ – боковая сила, действующая на внутреннюю рельсовую нить; $Y_{f1}(u_{1il})$ – сила трения, действующая на левую (наружную) рельсовую нить в поперечном направлении; $Y_{f2}(u_{1il})$ – сила трения, действующая на правую (внутреннюю) рельсовую нить в поперечном направлении; d_{1il} – смещение центра масс i -ой колесной пары I -ой тележки относительно средней линии рельсовой колеи, имеющей отступления от прямолинейного положения в плане; u_{1il} – поперечное перемещение центра масс i -ой колесной пары I -ой тележки относительно продольной оси x .

В табл. 3 представлены результаты расчета боковых сил, действующих на обе рельсовые нити от первой колесной пары по ходу движения в зависимости от осевой нагрузки. Боковые силы определялись при тех же осевых нагрузках и скоростях движения, которые были зафиксированы в ходе эксперимента.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что методы и алгоритмы определения боковых

нагрузок на рельсы объективно отражают действительность и вполне пригодны для практического использования. В большинстве случаев отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 5 %. Встречаются отклонения величиной 8–12 %, однако при определении боковых нагрузок экспериментальным методом показаны средние значения. Если же учитывать среднеквадратическое отклонение и ряд случайных факторов (неровности путевой структуры, состояние узлов креплений, состояние ходовых частей подвижного состава и др.), то результаты экспериментов и теоретических расчетов достаточно сопоставимы. В исследованиях Д.В. Овчинникова, А.Ю. Абдурашитова, В.А. Покацкого также определяется уровень взаимодействия подвижного состава и пути в зависимости от его состояния [19].

Заключение

1. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой показывает, что методы и алгоритмы определения вынужденных колебаний рельсов объективно отражают дей-

ствительность и вполне пригодны для практического использования.

2. Результаты испытаний позволили установить зависимость величины боковых сил от такого фактора, как осевые нагрузки для участков пути в кривых малых радиусов со шпалами 1 526 мм. В результате эксперимента не удалось снять показания под поездом, движущимся с установленной скоростью. Скорости движения поездов распределились в диапазоне 40–51 км/ч. Следующим этапом необходимо определить влияние скорости движения поездов на распределение боковых нагрузок на обе рельсовые нити.

3. Для подтверждения выдвинутых теоретических предположений о надежности шпал колеи 1 526 мм необходимо проведение подобных экспериментов для шпал колеи 1 520 и 1 530 мм. Также нужно определить остаточные деформации рельсовых нитей после прохода подвижного состава в начальный период эксплуатации. Итогом научной работы должно стать определение области применения шпал колеи 1 526 мм в зависимости от грузонапряженности.

Список литературы

1. Величко Д.В. Влияние типа рельсовых креплений на размер ширины колеи, получаемой при сборке рельсошпальной решетки // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : материалы науч.-практ. конф. Новосибирск, 2001. С. 245.
2. Величко Д.В. Влияние конструкций промежуточных креплений на ширину рельсовой колеи // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. Новосибирск, 2003. С. 108–116.
3. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес. М. : ПТКБ ЦП МПС, 1997. 207 с.
4. Ершков О.П. Построение графиков удельных характеристик и графиков-паспортов вписывания железнодорожных экипажей в кривые (теоретические основы) // Труды ВНИИЖТ. 1963. Вып. 268. С. 64–125.
5. Ершков О.П. Применение графиков-паспортов для оценки воздействия локомотивов на путь в кривых. М. : Транспорт, 1964. 34 с.
6. Карпушенко Н.И. Надежность связей рельсов с основанием. М. : Транспорт, 1986. 148 с.
7. Карпушенко Н.И., Антонов Н.И. Совершенствование рельсовых креплений. Новосибирск : СГУПС, 2003. 299 с.
8. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Транспорт, 1997. 325 с.
9. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. М. : Транспорт, 1969. 206 с.
10. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / О.А. Сулов, В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская и др. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. чтения, посвящ. памяти проф. Г.М. Шахунянца. М., 2016. С. 138–140.
11. Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений / А.В. Романов, А.А. Киселев, А.А. Мирошник и др. // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2024. Т. 21. № 2. С. 409–420.
12. Диль В.Ф., Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н. Анализ параметров динамики вагона в кривых участках ВСЖД малого радиуса с использованием специализированного комплекса // Безопасность регионов – основа устойчивого развития : материалы IV междунар. конф. Иркутск, 2014. Т. 1-2. С. 104–108.
13. Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н., Мартыненко Л.В. Анализ силового воздействия на колесо-рельс в условиях эксплуатации пути на горных перевалах малого радиуса ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VII междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 531–534.
14. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2022–02–01. М. : Рос. ин-т стандартизации, 2021. 32 с.
15. Шафрановский А.К. Непрерывная регистрация вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса. М. : Транспорт, 1965. 96 с.

16. Непомнящих Е.В., Кирпичников К.А. Диагностика состояния железнодорожного пути и его элементов. Чита : ЗаБИЖТ, 2013. 120 с.
17. Стоянович Г.М. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость. Хабаровск : ДВГУПС, 2013. 79 с.
18. Ковенькин Д.А., Покацкий В.А., Лысак А.С. Повышение стабильности ширины рельсовой колеи в кривых участках пути. Самара : СамГУПС, 2009. 126 с.
19. Уровень взаимодействия подвижного состава и пути в зависимости от его состояния / Д.В. Овчинников, А.Ю. Абдурашитов, В.А. Покацкий и др. // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : тр. XVII науч.-практ. конф. с междунар. участием. М., 2021. С. 4–13.

References

1. Velichko D.V. Vliyanie tipa rel'sovykh skreplenii na razmer shiriny kolei, poluchaemoi pri sborke rel'soshpal'noi reshetki [The influence of the type of rail fasteners on the size of the track width obtained during the assembly of the rail grating]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy Transsiba na sovremennom etape»* [Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Actual problems of the Trans-Siberian Railway at the present stage»]. Novosibirsk, 2001, pp. 245.
2. Velichko D.V. Vliyanie konstruktivnykh promezhutochnykh skreplenii na shirinu rel'sovoi kolei [The influence of intermediate fastener designs on the width of the rail track]. *Sbornik nauchnykh trudov «Zheleznye i avtomobil'nye dorogi v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings «Railways and highways in Siberian conditions»]. Novosibirsk, 2003, pp. 108–116.
3. Verigo M.F. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnei koles [Interaction of track and rolling stock in small radius curves and the fight against lateral wear of rails and wheel ridges]. Moscow: PTKB TsP MPS Publ., 1997. 207 p.
4. Ershkov O.P. Postroenie grafikov udel'nykh kharakteristik i grafikov-pasportov vpisyvaniya zheleznodorozhnykh ekipazhei v krivye (teoreticheskie osnovy) [Plotting of specific characteristics and schedules-passports inscribing railway crews in curves (theoretical foundations)]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Union Scientific-Research Institute of Railway Transport], 1963, iss. 268, pp. 64–125.
5. Ershkov O.P. Primenenie grafikov-pasportov dlya otsenki vozdeistviya lokomotivov na put' v krivykh [Application of schedules-passports to assess the impact of locomotives on the track]. Moscow: Transport Publ., 1964. 34 p.
6. Karpushchenko N.I. Nadezhnost svyazei rel'sov s osnovaniem [Reliability of rail connections with the base]. Moscow: Transport Publ., 1986. 148 p.
7. Karpushchenko N.I., Antonov N.I. Sovershenstvovanie rel'sovykh skreplenii [Improvement of rail fasteners]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2003. 299 p.
8. Kogan A.Ya. Dinamika puti i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom [Dynamics of the track and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1997. 325 p.
9. Kogan A.Ya. Vertikal'nye dinamicheskie sily, deistvuyushchie na put' [Vertical dynamic forces acting on the track]. Moscow: Transport Publ., 1969. 206 p.
10. Suslov O.A., Pevsner V.O., Tret'yakov V.V., Gromova T.I., Tret'yakov I.V., Shapetko K.V., Smelyanskaya I.S., Tomilenko A.S. Rabota puti v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya [The work of the track in conditions of heavy traffic]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Chteniya, posvyashchennye pamyati professora G.M. Shakhnyantsa «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhnyants «Modern problems of design, construction and operation of a railway track»]. Moscow, 2016, pp. 138–140.
11. Romanov A.V., Kiselev A.A., Miroshnik A.A., Bushuev M.V. Rezul'taty otsenki silovogo vozdeistviya tyazhelovesnykh i dlinnosostavnykh gruzovykh poezdov na zheleznodorozhnyi put' razlichnymi metodami izmerenii [The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2024, vol. 21, no. 2, pp. 409–420.
12. Dil' V.F., Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Analiz parametrov dinamiki vagona v krivykh uchastkakh VSZhD malogo radiusa s ispol'zovaniem spetsializirovannogo kompleksa [Analysis of the parameters of the dynamics of the wagon in the curved sections of the small-radius of East Siberian railway with the use of a specialized complex]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Bezopasnost; regionov – osnova ustoichivogo razvitiya»* [Proceedings of the IV International Conference «Regional security – the basis of sustainable development»]. Irkutsk, 2014, vol. 1-2, pp. 104–108.
13. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. [Analysis of the force effect on the wheel-rail in the conditions of operation of the track on the mountain passes of the small radius of the East Siberian Railway]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VII International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2016, vol. 2, pp. 531–534.
14. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021. Railway Rolling Stock. Normative limits of railway track interaction and test methods]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 32 p.
15. Shafranovskii A.K. Nepreryvnaya registratsiya vertikal'nykh i bokovykh sil vzaimodeistviya kolesa i rel'sa [Continuous registration of vertical and lateral forces of wheel and rail interaction]. Moscow: Transport Publ., 1965. 96 p.
16. Nepomnyashchikh E.V., Kirpichnikov K.A. Diagnostika sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti i ego elementov [Diagnostics of the condition of the railway track and its elements]. Chita: ZabIZhT Publ., 2013, 120 p.
17. Stoyanovich G.M. Rascheti verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustoichivost' [Calculations of the upper structure of the track for strength and stability]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2013. 79 p.

18. Koven'kin D.A., Pokatskii V.A., Lysak A.S. Povyshenie stabil'nosti shiriny rel'sovoi kolei v krivykh uchastkakh puti [Improving the stability of the rail gauge in the curved sections of the track]. Samara: SamGUPS Publ., 2009. 126 p.

19. Ovchinnikov D.V., Abdurashitov A.Yu., Pokatskii V.A., Kadyrov R.R. Uroven' vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puti v zavisimosti ot ego sostoyaniya [The level of interaction of rolling stock and track depending on its condition]. *Trudy XVII nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vnedrenie sovremennykh konstruksii i peredovykh tekhnologii v putevye khozyaistvo»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference with international participation «Introduction of modern structures and advanced technologies into the track facilities»]. Moscow, 2021, pp. 4–13.

Информация об авторах

Ковенькин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Живин Роман Ильич, начальник Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск; e-mail: di_zhivinri@esr.ru.

Information about the authors

Dmitrii A. Koven'kin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Roman I. Zhivin, Head of the East Siberian Directorate of Infrastructure – a Structural Division of the Central Directorate of Infrastructure – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk; e-mail: di_zhivinri@esr.ru.