

Оценка эффективности применения шпал рельсовой колеи 1526 мм в кривых малых радиусов

Д.А. Ковенькин¹✉, Р.И. Живин²

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

²Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

В работе рассматриваются вопросы, связанные с эксплуатацией железобетонных шпал разных типоразмеров в кривых малых радиусов. Анализ проводился для участков пути с высокой грузонапряженностью. Оценивалась эффективность содержания шпал на рельсовой колее 1 520, 1 526 и 1 530 мм. Для этого было выбрано три участка, схожих по плану и профилю пути и имеющих примерно одинаковые условия эксплуатации по грузонапряженности. С целью выявления того, какие шпалы обладают более высокой эффективностью, был проведен анализ изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа рельсов на экспериментальных участках с момента укладки рельсовой плети до момента ее смены. Выполнен расчет силового воздействия от подвижного состава на путь с учетом фактических скоростей движения. Расчет проводился в программном комплексе «Универсальный механизм». По результатам проведенных исследований можно сказать, что шпалы с типоразмером рельсовой колеи 1 526 мм являются более эффективными по сравнению с другими. Использование шпал типоразмера 1 520 мм в кривых малых радиусов приводит к сужению рельсовой колеи в начальный период эксплуатации, а применение шпал типоразмера 1 530 мм – к уширению колеи после нескольких месяцев содержания. Укладка шпал типоразмера 1 526 мм в кривых малых радиусов не противоречит правилам технической эксплуатации и обеспечивает стабильность содержания колеи на протяжении всего жизненного цикла рельсовой плети.

Ключевые слова

шпалы, рельсовая колея, износ, кривые малых радиусов, типоразмер шпал

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Оценка эффективности применения шпал рельсовой колеи 1 526 мм в кривых малых радиусов / Д.А. Ковенькин, Р.И. Живин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 93–104. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).93-104.

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 02.06.2023 г.; принята к публикации: 05.06.2023 г.

Assessment of the efficiency of 1 526 mm rail gauge sleepers in curves of small radii

D.A. Koven'kin¹✉, R.I. Zhivin²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²East Siberian Directorate of Infrastructure, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

The paper considers issues related to the operation of reinforced concrete sleepers of different types and sizes in curves of small radii. The analysis was carried out for the track sections with a high load. The efficiency of the maintenance of sleepers on the rail gauge of 1 520, 1 530 and 1 526 mm was assessed. To this end, three sections were selected with approximately the same operating conditions in terms of load, plan and track profile. To identify which sleepers are the most effective in use, an analysis of the change in the width of the rail track and the lateral wear of the rails in the experimental sections from the moment of laying the rail lash to the moment of its replacement was carried out. The calculation of the force effect from the rolling stock upon the track was carried out, taking into account the actual speeds of movement. The calculation was performed in the «Universal Mechanism» software package. Based on the conducted research, it can be stated that sleepers with a standard 1 526 mm rail gauge show more efficient operation as compared to others. The use of a standard size 1 520 mm sleepers in curves of small radii results in a narrowing of the rail track in the initial period of operation. At the same time, the use of standard size 1 530 mm sleepers results in a widening of the track after several months of maintenance. The laying of the standard size 1 526 mm sleepers in curves of small radii does not contradict the norms of technical operation rules, and ensures the stability of the track content throughout the entire life cycle of the rail lash.

Keywords

sleepers, rail track, wear, curves of small radii, standard size of sleepers

For citation

Koven'kin D.A., Zhivin R.I. Otsenka effektivnosti primeneniya shpal relsovoi kolei 1 526 mm v krivykh malykh radiusov [Assessment of the efficiency of 1 526 mm rail gauge sleepers in curves of small radii]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 93–104. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).93-104.

Article info

Received: May 18, 2023; Revised: June 2, 2023; Accepted: June 5, 2023.

Введение

Согласно требованиям правил технической эксплуатации (ПТЭ) все элементы железнодорожного пути по прочности, устойчивости и техническому состоянию должны обеспечивать безопасное, плавное и бесперебойное движение поездов с установленными скоростями. Одним из основных резервов роста надежности эксплуатации железнодорожного пути является обеспечение стабильности ширины рельсовой колеи.

Для качественной работы верхнего строения пути, подвижного состава и их элементов вопрос обеспечения стабильности рельсовой колеи имеет, безусловно, важное значение. Сверхнормативные отклонения ширины рельсовой колеи в сторону ее сужения являются причиной повышенного бокового износа головок рельсов и гребней колес, а также возникновения неисправностей неподрессоренных масс подвижного состава. Сверхнормативные отклонения ширины рельсовой колеи в сторону ее уширения требуют уменьшения скоростей движения поездов вплоть до его прекращения и принятия немедленных мер по устранению таких неисправностей.

Трудозатраты на выполнение путевых работ, связанных с регулировкой ширины колеи, устранением неисправностей, затрудняющих движение поездов, а также заменой преждевременно изношенных элементов верхнего строения пути, составляют существенную часть затрат на текущее содержание пути.

На Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) бесстыковой путь на железобетонных шпалах начал укладываться и эксплуатироваться с 1999 г. Требования ТУ-2000 ограничивали укладку бесстыкового пути прямыми и кривыми радиусами более 350 м. В кривых участках пути радиусами 300–350 м укладка бесстыкового пути допускалась при наличии технико-экономического обоснования. В кривых участках радиусами менее 300 м бесстыковой путь укладывать было нельзя. В 2008 г., с появлением шурупно-дюбельных рельсовых скреплений,

на перегоне Большой Луг – Подкаменная в кривых радиусами менее 350 м была произведена укладка железобетонных шпал типа ШЗД. Применялись шпалы типоразмера 1 520 мм в нарушение требований ПТЭ, устанавливающих рельсовую колею в таких кривых, равную 1 530 мм. Причина заключалась в том, что шпал других типоразмеров на ВСЖД в то время не было. Использование шпал типоразмера 1 520 мм в кривых малых радиусов приводило к сужению рельсовой колеи и, как уже было сказано, к интенсивному износу элементов пути и подвижного состава. Только в 2012 г., с выходом новых технических условий, бесстыковой путь разрешили укладывать в кривых радиусами более 250 м. Именно в это время на Слюдянской дистанции пути ВСЖД на таких участках, согласно нормам ширины колеи, при реконструкции верхнего строения пути была произведена укладка опытных шпал типа ШЗДК, рассчитанных на ширину колеи 1 530 мм. Однако после нескольких месяцев эксплуатации ширина колеи стала превышать значение 1 540 мм. Боковой износ рельсов при этом составил 5–7 мм, т. е. всего 1–3 мм не хватило до предельно допустимой ширины колеи – 1 548 мм [1, 2]. Теперь уже встал вопрос о целесообразности применения шпал ШЗДК типоразмера 1 530 мм в кривых малого радиуса в условиях высокой грузонапряженности.

Итак, как показала практика эксплуатации железобетонных шпал типоразмеров 1 520 и 1 530 мм в кривых малых радиусов на особо грузонапряженных участках, ни один из этих типов шпал не обеспечивал надежности работы пути.

С целью минимизации затрат на текущее содержание кривых малого радиуса горно-перевального участка и в соответствии с проектом бережливого производства, утвержденного в Слюдянской дистанции пути, при всех капитальных видах ремонтов в кривые менее 350 м с 2016 г. производится укладка шпал с нормой зашивки 1 526 мм (ШЗДК). По состоянию на 1 января 2023 г. шпалы такого типоразмера уло-

жены в 23 кривых, общей протяженностью 12,91 км. Укладка данного типа шпал в кривых малых радиусов не противоречит нормам ПТЭ, так как ширина колеи находится в допустимых пределах. Кроме того, при норме зашивки ширины рельсовой колеи 1 526 мм и боковом износе рельсов от 15 до 18 мм уширение рельсовой колеи составит 1 545 мм (вторая степень в соответствии с «Инструкцией по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436/р, до 1 544 мм в кривых радиусом 300–350 м и до 1 545 мм в кривых радиусом менее 300 м), что позволяет осуществлять пропуск поездов с установленной скоростью [3].

Исследованию вопросов повышения стабильности ширины рельсовой колеи посвящены работы В.Г. Альбрехта [4], Д.В. Величко [5, 6], М.Ф. Вериго [7], О.П. Ершкова [8, 9], А.Я. Когана [10, 11]. Однако решены еще далеко не все вопросы обеспечения надежности связей рельсов со шпалами.

Исходя из изложенного основная цель данной работы заключается в исследовании

возможности повышения стабильности ширины рельсовой колеи в кривых малых радиусов на участках с высокой грузонапряженностью. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

- исследуются и определяются величины и характер направляющих сил;
- оценивается эффективность применения шпал типоразмеров 1 520, 1 526 и 1 530 мм на экспериментальных участках.

Характеристика экспериментальных участков

Слюдянская дистанция пути расположена на южной оконечности озера Байкал.

Дистанция обслуживает один из сложнейших на сети дорог горно-перевальный участок от ст. Большой Луг (5 222 км) до ст. Слюдянка I (5 310 км). От начала движения по перевалу поезда уже через 30 км поднимаются на отметку 400 м над уровнем озера Байкал – ст. Андриановская.

Горно-перевальный участок имеет следующие характеристики. Протяжение пути с уклонами до 20 ‰, в том числе 60,13 км от 15 до 20 ‰, протяжение кривых радиусом менее 299 м

Таблица 1. Характеристика экспериментальных участков
Table 1. Characteristics of experimental sites

Показатель Indicator	Участок Section		
	1	2	3
Километр начала Start kilometer	5 225	5 246	5 314
Метр начала Start Meter	752	215	204
Километр конца End kilometer	5 226	5 246	5 314
Метр конца End Meter	99	468	477
Длина, м Length, m	347	254	273
Радиус, м Radius, m	298	317	320
Возвышение, мм Elevation, mm	110	100	95
Уклон, ‰ Slope, ‰	подъем 6,8 climb 6,8	подъем 4,4 climb 4,4	подъем 4,2 climb 4,2
Направление кривой Direction of the curve	Левая Left	Левая Left	Левая Left
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530

– 33,06 км, кривых радиусом 300–350 м – 86,10 км. Участок состоит из шести двухпутных перегонов. Грузонапряженность путей главного хода составляет для первого пути 64,9 млн т брутто на километр в год, а для второго – 158,4 млн т брутто, что значительно влияет на состояние пути. Установленная скорость для горно-перевального участка пассажирских и грузовых поездов – 70 и 60 км/ч соответственно.

Для анализа эффективности применения железобетонных шпал разных типоразмеров были выбраны три экспериментальных участка, характеристики которых представлены в табл. 1.

Анализ изменения ширины рельсовой колеи

Надежность крепления рельсов к подрельсовому основанию, интенсивность износа элементов верхнего строения пути, а также интенсивность изменения рельсовой колеи в значительной степени зависят от характера взаимодействия элементов пути с элементами подвижного состава [12, 13]. Так, на исследуемых участках, доля поездов массой 6 тыс. т и более составляет 72,92 % от общего количества; массой 7 тыс. т и более 25,0 %. Средняя осевая нагрузка при этом составила 22,18 т/ось, а доля поездов с осевой нагрузкой более 23 т/ось оказалась равной 50 %. Обращение тяжеловесных поездов в

условиях горно-перевальных участков в том числе сопряжено с сосредоточением на малой длине дополнительных единиц тяги. В таких условиях эксплуатации максимальные значения горизонтальных поперечных сил в кривых участках пути могут достигать до 120 кН и более. Безусловно, осложнение условий эксплуатации отражается на стабильности железнодорожного пути и требует принятия дополнительных мер к повышению надежности его работы. Для оценки воздействия подвижного состава на путь был проведен анализ изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа рельсов на исследуемых участках в зависимости от наработанного тоннажа. Результаты анализа представлены на рис. 1–3.

Из диаграммы (см. рис. 2) можно определить, что в начальный период на всех участках скорость изменения ширины рельсовой колеи максимальна. При достижении пропущенного тоннажа до 40–50 млн т брутто идет резкое снижение данного параметра. Тоннаж в 50 млн т брутто при грузонапряженности 158,8 млн т брутто соответствует 3,8 месяцам работы пути. После тоннажа 50 млн т брутто и вплоть до смены рельсовой плети показатель интенсивности стабилизируется и меняется незначительно. Для данного конкретного случая, при сравне-

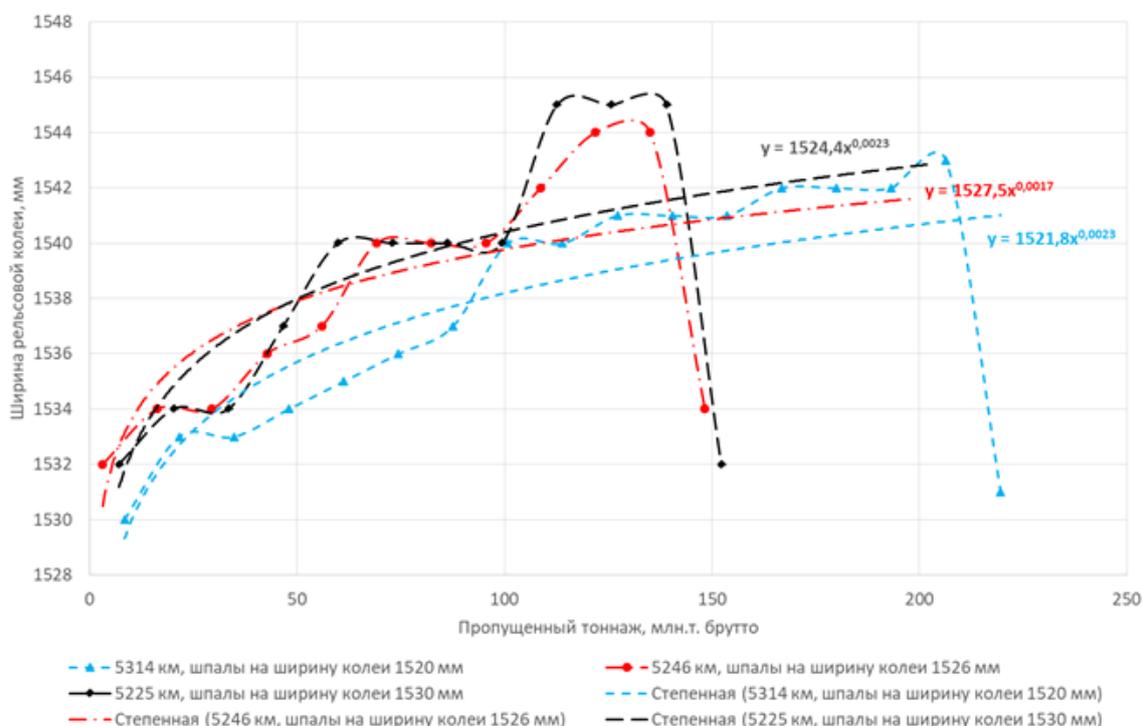


Рис. 1. Изменение ширины рельсовой колеи

Fig. 1. Change in the width of rail gauge

таты. Более высокая интенсивность изменения ширины рельсовой колеи на участке со шпалами типоразмера – 1 520 мм, объясняется более сложным механизмом вписывания подвижного состава в кривую [14–17].

Из диаграммы (см. рис. 3) можно определить, что в начальный период скорость изменения бокового износа рельсов максимальна на участках со шпалами типоразмеров 1 520 и 1 530 мм. Не совсем понятно, почему интенсивность бокового износа максимальна на участках со шпалами типоразмера 1 530 мм. На этом участке из-за возможности более свободного вписывания тележки в кривую износ рельса должен меняться медленнее. Однако в данной работе мы не учитываем другие факторы, помимо типоразмера шпал, которые могут влиять на интенсивность износа рельсов (лубрикация, категория рельсов и т.п.). Кроме того, на данный показатель влияет возвышение наружного рельса, которое на участке 5 314 км меньше по сравнению с другими участками. В целом также, как и по изменению ширины колеи, после наработки тоннажа 50 млн т брутто и вплоть до смены рельсовой плети показатель интенсивности стабилизируется и меняется незначительно. При сравнении показателя изме-

нения бокового износа рельсов на шпалах разных типоразмеров выявлены следующие особенности:

– для шпал на колею 1 520 мм (5 314 км) скорость увеличения бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,12–0,14 мм/млн т брутто;

– для шпал на колею 1 526 мм (5 246 км) скорость роста бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,07–0,09 мм/млн т брутто;

– для шпал на колею 1 530 мм (5 225 км) скорость роста бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,15–0,19 мм/млн т брутто.

Оценивая значения интенсивности бокового износа наружного рельса на исследуемых участках в начальный период, можно сказать, что на участке с типоразмером шпал 1 526 мм она ниже базовой интенсивности, равной 0,105–0,109 мм/млн т брутто [18]. На других участках выше базовой.

В табл. 2 приведены данные статистической обработки.

Таблица 2. Среднестатистические показатели интенсивности изменения ширины колеи и бокового износа
Table 2. Average statistical indicators of the intensity of changes in track width and lateral wear

Показатель	Участок		
	1	2	3
Километр начала Kilometer of start	5 225	5 246	5 314
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530
Средняя интенсивность изменения ширины колеи, мм/млн т бр. Average intensity of track width change, mm/million tons br	0,114	0,102	0,096
Среднее квадратичное отклонение Mean square deviation	0,025	0,021	0,039
Интенсивность изменения ширины колеи в начальный период, мм/млн т бр. The intensity of the change in track width in the initial period, mm / million tons br	0,12– 0,15	0,11– 0,15	0,17– 0,23
Средняя интенсивность изменения бокового износа, мм/млн т бр. Average intensity of lateral wear change, mm/million tons br	0,106	0,099	0,093
Среднее квадратичное отклонение Mean square deviation	0,030	0,018	0,057
Интенсивность изменения бокового износа в начальный период, мм/млн т бр. Intensity of lateral wear change in the initial period, mm/million tons br	0,15– 0,19	0,07– 0,09	0,12– 0,14

Опираясь на данные средних показателей из диаграмм и сведений, приведенных в табл. 2, можно определить, что изменение ширины колеи происходит в основном за счет изменения бокового износа рельсов и составляет практически 100 % на участке со шпалами типоразмера 1 530 мм (5 225 км), 60–64 % на участке со шпалами типоразмера 1 526 мм (5 246 км) и 61–70 % на участке со шпалами типоразмера 1 520 мм (5 314 км), т.е. при укладке шпал типоразмера 1 530 мм и зашивке их на колею 1 535 мм происходит выборка всех люфтов в узлах креплений. Это может привести к увеличению боковой жесткости пути и, как следствие, к росту интенсивности бокового износа рельсов. При укладке шпал типоразмера 1 520 мм и зашивке их на колею 1 530 мм возможность изменения ширины рельсовой колеи за счет отжатия рельсов и выборки зазоров узлов креплений составила 30–39 %. Если говорить о шпалах типоразмера 1 526 мм и зашивки их на колею 1 530 мм, то такой же показатель составил 36–40 %. С одной стороны, это приводит к снижению бокового

износа рельсов, с другой – к возможности увеличения интенсивности изменения рельсовой колеи. В целом можно констатировать, что в начальный период времени на участке со шпалами типоразмера 1 526 мм (5 246 км) среднестатистические показатели интенсивности изменения ширины колеи и бокового износа ниже, чем на других опытных участках. Однако рельсовая плеть на 5 314 км прослужила на пять месяцев дольше (66 млн т брутто), чем на других участках. В связи с этим возникла необходимость оценить силовое воздействие от подвижного состава на всех исследуемых участках.

Анализ скоростемерных лент

Для оценки силового воздействия на путь учитывались следующие исходные данные:

- план и профиль пути;
- характеристика верхнего строения;
- осевая нагрузка;
- фактическая скорость движения.

Для определения фактической скорости движения подвижного состава проводился ана-



Рис. 4. Фрагмент скоростемерной ленты
Fig. 4. A fragment of a speed-measuring tape

Таблица 3. Показатели фактической скорости движения
Table 3. Indicators of the actual speed of movement

Участки Sections	Установленная скорость, км/ч Set speed, km/h	Фактическая скорость, км/ч Actual speed, km/h	Средневзвешенная характеристика подвижного состава Average assessed characteristics of rolling stock	
			Масса состава, т Train weight, t	Осевая нагрузка, т/ось Axial load, t/axle
5 225	60	44,08	5 954,04	22,18
5 246		49,68		
5 314		33,41		

лиз скоростемерных лент на исследуемых участках. Всего было рассмотрено более 100 лент в период отсутствия ограничений по скорости на участках. На рис. 4 представлен фрагмент одной из скоростемерных лент. Все данные сведены в табл. 3.

Расшифровка скоростемерных лент показала, что на особо грузонапряженных участках в условиях горных перевалов грузовые поезда почти всегда следуют со скоростью меньше расчетной или установленной. Так, на экспериментальном участке 5 225 км фактическая скорость ниже установленной на 26,5 %, на 5 246 км разница составляет 17,2 %, на 5 314 км – 44,3 %, 5 314 км находится на подходе к станции.

Расчет силового воздействия от подвижного состава на путь

Расчеты проводились с применением программного комплекса «Универсальный механизм».

В данном случае было принято решение определить направляющую силу, возникающую при набегании гребня колеса на боковую грань головки рельса в кривых участках пути. В расчете принималось свободное вписывание двухосной жесткой базы в кривую. Центр (полюс) поворота жесткой базы в этом случае находится на пересечении продольной оси жесткой базы с радиусом к ней, перпендикулярным за задней осью двухосной базы (рис. 5).

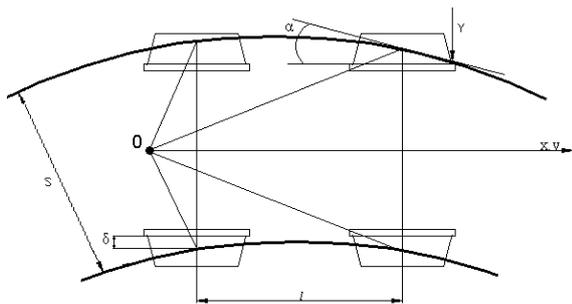


Рис. 5. Схема свободного вписывания тележки в кривую

Fig. 5. The scheme of the bus free fitting into the curve

Рассматривалось движение экипажа в круговой кривой со средним радиусом $\{\rho^0\}$ и средним возвышением наружного рельса h_p^0 .

Система уравнений, описывающая вписывание в кривую с такими параметрами кривой может быть записана в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} & m \left(\frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) + c_y^+ \left[\langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \\ & + Q_{cm} \delta \langle d_{II} \rangle - f_{yII} (\langle \psi_{II} \rangle) + f_{yII} (\langle d_{II} \rangle) = 0; \\ & c_{\psi I}^+ \left(\langle \psi_{II} \rangle - \langle \psi_I^+ \rangle - \frac{a_{II} - a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = f_{yII} \left(-\frac{1}{\langle \rho^0 \rangle} - \lambda^2 \langle d_{II} \rangle \right); \\ & \langle y_{II} \rangle - \langle d_{II} \rangle = 0; \\ & m^+ \left(\frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) - \sum_{I=1}^n c_y^+ \left[\langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \\ & + c_y^* \left[\langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] = 0; \\ & \sum_{I=1}^n \left\{ c_y^+ (a_{II} - a_I^*) \times \left[\langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \right. \\ & \left. + c_{\psi I}^+ \left(\langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi_{II} \rangle - \frac{a_I^* - a_{II}}{\langle \rho^0 \rangle} \right) \right\} + c_{\psi I}^* \left(\langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi^* \rangle - \frac{a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = 0; \\ & m^+ \left(\frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) - \sum_{I=1}^N c_y^* \left[\langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] = 0; \\ & \sum_{I=1}^N a_I^* c_y^* \left(\langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right) - \\ & - \sum_{I=1}^N c_{\psi I}^* \left(\langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi^* \rangle - \frac{a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = 0; \\ & m^+ H^* \left(\frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - g \langle \phi^* \rangle \right) + 2Nnb_z^2 c_z^+ \langle \phi^* \rangle - \frac{2b_z^{*2}}{S} Nnc_z^+ \langle h_p^0 \rangle = 0. \\ & i = \overline{1, n}, \quad I = \overline{1, N}. \end{aligned} \right\}$$

В данной системе использованы следующие обозначения параметров: m^* – масса кузова; $2b_z^*$ – расстояние между рессорными комплектами одной колесной пары; $S = 2S_1$ – расстояние между кругами катания колесной пары; c_{zI}^+ – жесткость, отнесенная к рессорному комплекту i -го колеса I -й тележки; c_{yI}^* – жесткость поперечной связи I -й тележки с кузовом; $c_{\psi I}^*$ – угловая жесткость поворота I -й тележки относительно кузова; a_I^* – координата по оси x центра масс I -й тележки; c_{yil}^+ – жесткость поперечной связи i -й колесной пары с I -й тележкой; $c_{\psi il}^+$ – угловая жесткость поворота i -й колесной пары относительно I -й тележки; h_{pIil}^0 – возвышение наружного рельса под i -м колесом I -й тележки; a_{II} – координата по оси x центра масс i -й колесной пары I -й тележки; g – ускорение силы тяжести; H^* – расстояние от центра качаний при боковой качке кузова до его центра масс; u_{iII} – поперечное перемещение центра масс i -й колесной пары I -й те-

лежки относительно продольной оси x ; ψ_{il} – угол между осью i -й колесной пары I -й тележки и нормалью к продольной оси x ; y_{il}^+ – поперечное перемещение центра масс I -й тележки относительно продольной оси x ; ψ_{il}^+ – угол между продольной осью пути x и осью I -й тележки; y_1^* – поперечный относ кузова; ψ_1^* – угол между продольной осью x и осью кузова; φ^* – угол боковой

качки кузова; V – скорость движения [10, 11].

Результаты расчета изменения направляющей силы во времени представлены в виде графиков на рис. 6. Данные графиков были статистически обработаны. Учитывалось движение экипажа только по круговой кривой. Результаты сведены в табл. 4, в которой также представлены все данные, полученные по результатам исследований.

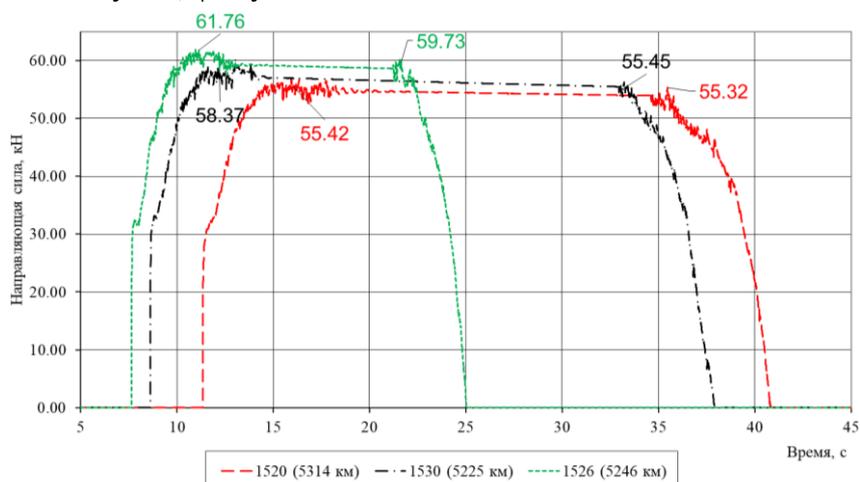


Рис. 6. График изменения направляющей силы на экспериментальных участках
Fig. 6. Graph of the change in the guiding force in the experimental sections

Таблица 4. Исследуемые параметры воздействия от подвижного состава на путь
Table 4. Investigated parameters of the impact of rolling stock upon the track

Показатель	Участок		
	1	2	3
Километр Kilometer	5 225	5 246	5 314
Радиус, м Radius, m	298	317	320
Возвышение, мм Elevation, mm	110	100	95
Уклон, ‰ Slope, ‰	подъем 6,8 climb 6,8	подъем 4,4 climb 4,4	подъем 4,2 climb 4,2
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530
Фактическая скорость, км/ч Actual speed, km/h	44,08	49,68	33,41
Средняя интенсивность изменения ширины колеи, мм/млн т бр. Average intensity of track width change, mm/million tons br	0,114	0,102	0,096
Средняя интенсивность изменения бокового износа, мм/млн т бр. Average intensity of lateral wear change, mm/million tons br	0,106	0,099	0,093
Среднее значение направляющей силы в круговой кривой, кН The average value of the guiding	56,41	59,13	54,42
Среднеквадратичное отклонение Mean square deviation	0,73	0,85	0,52

Полученные данные показывают, что в целом силовое воздействие от подвижного состава на рельсы на участке со шпалами колеи 1 526 мм немногим выше, чем на других участках. Однако с определенной уверенностью можно сказать, что это вызвано большей скоростью на этом участке. Кроме того, несмотря на то, что в данном месте скорость движения и направляющая сила выше, интенсивность изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа ниже, чем на участке со шпалами колеи 1 530 мм. Низкая интенсивность износа рельсов и ширины колеи на 5 314 км со шпалами 1 520 мм объясняется невысокой скоростью движения и, соответственно, пониженным воздействием от подвижного состава по сравнению с другими километрами.

Заключение

Исходя из проведенных расчетов и исследований, можно сказать, что основная цель данной работы достигнута. Шпалы с типоразмером рельсовой колеи 1 526 мм показывают более эффективную работу по сравнению с другими.

Укладка данного типа шпал в кривых малых радиусов не противоречит нормам ПТЭ, так как ширина колеи находится в допустимых пределах. Кроме того, при норме зашивки ширины рельсовой колеи 1 526 мм и боковом износе рельсов 15–18 мм уширение рельсовой колеи составит 1 545 мм, что позволяет осуществлять пропуск поездов с установленной

скоростью вплоть до смены плети.

Изменение ширины колеи на участке со шпалами типоразмера 1 530 мм (5 225 км) происходит в основном за счет изменения бокового износа рельсов и составляет практически 100 %, т.е. при укладке шпал типоразмера 1 530 мм и зашивке их на колею 1 535 мм, происходит выборка всех люфтов в узлах скреплений. Это приводит к увеличению боковой жесткости пути и, как следствие, к росту интенсивности бокового износа рельсов. Результаты исследований подтвердили эту гипотезу. При укладке шпал типоразмера 1 520 мм и зашивке их на колею 1 530 мм возможность изменения ширины рельсовой колеи за счет отжатия рельсов и выборки зазоров узлов скреплений составила 30–39 %. Если говорить о шпалах типоразмера 1 526 мм и зашивки их на колею 1 530 мм, то такой же показатель составил 36–40 %. На наш взгляд, это положительный момент, так как рельс имеет возможность за счет чуть большего отжатия под поездом воспринимать большую нагрузку. Кроме того, за счет этого идет снижение передаваемой нагрузки на подрельсовое основание и основную площадку земляного полотна.

Более продолжительный срок службы рельсовой плети на 5 314 км (шпалы 1 520 мм) объясняется невысокими скоростями на данном участке.

Список литературы

1. Малгатаев Д.С., Филатов Е.В. Определение целесообразности применения шпал ШЗ в кривых радиусом 300–350 м вместо шпал ШЗ-К // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 144–150.
2. Малгатаев Д.С., Дюндик Л.С., Филатов Е.В. Анализ эффективности работы шпал типа Ш-3 и Ш-3К в кривых радиусом 300–350 метров на ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск. 2013. Т. 1. С. 438–445.
3. Об утверждении инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.02.20 г. № 436/р (ред. 6.08.2021). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
4. Альбрехт В.Г., Шиладжян А.А. Работа рельсов в крутых кривых // Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации : сб. науч. тр. М. : Интекст, 2000. С. 42–54.
5. Величко Д.В. Влияние типа рельсовых скреплений на размер ширины колеи, получаемой при сборке рельсошпальной решетки // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : материалы науч.-практ. конф. Новосибирск, 2001. С. 245.
6. Величко Д.В. Влияние конструкций промежуточных скреплений на ширину рельсовой колеи // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. Новосибирск, 2003. С. 108–116.
7. Вериги 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.
8. 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.
9. Ершков О.П. Применение графиков-паспортов для оценки воздействия локомотивов на путь в кривых. М. : Транспорт, 1964. 34 с.
10. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Транспорт, 1997. 325 с.

11. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. М. : Транспорт, 1969. 206 с.
12. Вершинский С.В., Данилов В.И., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
13. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
14. 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.
15. 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.
16. 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 : труды XVII науч.-практ. конф. с междунар. участием. Москва, 2021. С. 4–13.
17. 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 : труды XIII Междунар. науч.-техн. конф. чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. Москва, 2016. С. 138–140.
18. Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества с нормативами интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации : методика ОАО «РЖД» от 29.09.2022 № 1824 : утв. заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Центральной дирекции инфраструктуры Е.А.Шевцовым. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.

References

1. Malgataev D.S., Filatov E.V. Opredelenie tselesoobraznosti primeneniya shpal Sh3 v krivykh radiusom 300–350 m v mesto shpal Sh3-K [Determining the feasibility of using Sh3 sleepers in curves with a radius of 300–350 m instead of Sh3-K sleepers]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of a regional railway network], 2013, no. 1, pp. 144–150.
2. Dyundik L.S., Malgataev D.S., Filatov E.V. Analiz effektivnosti raboty shpal tipa Sh-3 i Sh-3K v krivykh radiusom 300–350 metrov na VSZhD [Analysis of the efficiency of Sh-3 and Sh-3K type sleepers in curves with a radius of 300–350 meters on the East Siberian Railway]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 1, pp. 438–445.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 28.02.20 г. № 436/г «Об утверждении инструкции по отсенке состояния рельсов колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов» (ред. 6.08.2021) [Order of JSC «Russian Railways» dated February 28, 2020 no 436/r «On approval of the instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the safety of train traffic» (ed. August 6, 2021)]
4. Al'brecht V.G., Shiladzhyan A.A. Rabota rel'sov v krutykh krivykh [The work of rails in steep curves]. *Trudy Vserossiiskogo ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta «Povyshenie nadezhnosti raboty verkhnego stroeniya puti v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii»* [Proceedings of the All-Russian Order of the Red Banner of Scientific-Research Institute of Railway Transport «Improving the reliability of the upper structure of the track in modern operating conditions»]. Moscow, 2000, pp. 42–54.
5. 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.
6. Velichko D.V. Vliyanie konstruktivnykh 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.
7. 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.
8. 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, is. 268, pp. 64–125.
9. 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.
10. 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. 326 p.
11. Kogan A.Ya. Vertikal'nye dinamicheskie sily, deistvuyushchie na put' [Vertical dynamic forces acting on the track]. Moscow: Transport Publ., 1969. 206 p.
12. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Wagon Dynamics]. Moscow: Transport Publ., 360 p.
13. Shakhunyan G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
14. 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.

15. 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.

16. 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 konstruktssii i peredovykh tekhnologii v putevoe 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.

17. Suslov O.A., Pevsner V.O., Petropavlovskiy I.B., 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.

18. Metodika prognozirovaniya iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva s normativami intensivnosti iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva v zavisimosti ot uslovii ekspluatatsii: utv. zamestitelem general'nogo direktora OAO «RZhD» – nachal'nikom Tsentral'noi direktsii infrastruktury 29.09.2022 g. N 1824 [The methodology for predicting the wear of rails of various quality categories with standards for the intensity of wear of rails of various quality categories, depending on the operating conditions: approved by the Deputy General Director of JSC «Russian Railways» – Head of the Central Directorate of Infrastructure on September 29, 2022 N 1824].

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, г. Иркутск; e-mail: di_zhivinri@esrr.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, Irkutsk; e-mail: di_zhivinri@esrr.ru.