

Оригинальная статья
УДК 625.172
EDN: <https://elibrary.ru/kqbcsc>



Влияние динамики взаимодействия пути и подвижного состава на изменение состояния пути и организацию его технического обслуживания в процессе эксплуатации

О. А. Суслов✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время на ряде направлений сети железных дорог Российской Федерации происходит повышение объемов перевозок. Наиболее характерными направлениями, которые показывают максимальный годовой прирост, являются Восточный полигон, участки Транссиба и БАМа. Повышение объемов перевозимого груза, особенно в условиях ограниченных провозных способностей, влечет за собой повышение длин и масс поездов, рост нагрузок на ось, что приводит к увеличению интенсивности использования всех элементов существующей железнодорожной инфраструктуры, и прежде всего пути. В результате увеличиваются силы взаимодействия в системе «колесо — рельс» и связанная с ними нагруженность и повреждаемость пути. Данная работа выполнена с целью выявления связи между эксплуатационными факторами и показателями, характеризующими нагруженность пути.

Материалы и методы. Для анализа фактических значений повреждаемости на различных участках сети и Восточного полигона с помощью автоматических устройств регистрации в течение нескольких месяцев были собраны данные, характеризующие величины сил в системе «колесо — рельс», определены законы и параметры их распределения.

Результаты. Анализ параметров распределений показал их большой разброс (45–55 % для средних значений и до 300 % для дисперсий). Аналогичный разброс получен для значений накопления повреждаемости пути и интенсивности исчерпания его ресурса на исследованных участках. Дополнительно было выявлено высокое влияние на повреждаемость (от 40 % и более) динамических качеств подвижного состава, зависящих от его конструктивных особенностей и фактического состояния.

Обсуждение и заключение. Для принятия решений по конструкции устройства пути и организации его технического обслуживания на направлениях сети, особенно с высокой интенсивностью эксплуатации, необходим постоянный контроль и анализ нагрузок в системе «колесо — рельс». Такой подход позволит оптимизировать устройство и техническое обслуживание пути с учетом эксплуатационных особенностей конкретных направлений, что обеспечит безопасность движения и повысит эффективность затрат на техническое обслуживание и ремонт пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: верхнее строение пути, взаимодействие пути и подвижного состава, отступления геометрии рельсовой колеи, текущее содержание пути, прогнозирование работ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суслов О. А. Влияние динамики взаимодействия пути и подвижного состава на изменение состояния пути и организацию его технического обслуживания в процессе эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 362–371.

✉ Suslov.oleg@vniizht.ru (О. А. Суслов)

© Суслов О. А., 2024

Original article

UDK 625.172

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



Effects of track and rolling stock interaction on track condition and maintenance

Oleg A. Suslov✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A number of railway lines in Russia experience increased traffic volume. The lines with the fastest annual growth are the Eastern Polygon, Transsib and BAM sections. Higher volumes of trailing load, especially in limited traffic-carrying capacity, entail longer and heavier trains and higher axle loads, which puts more strain on the existing railway infrastructure, especially the tracks. This intensifies the interaction in the wheel – rail system, further increasing track load and damage rates. This paper is intended to identify the correlation between operational factors and track load indicators.

Materials and methods. The study of the actual damage rate on the network and the Eastern Polygon sections involved automatic devices collecting wheel – rail interaction data for several months and determined the laws and parameters of their distribution.

Results. The analysis of distribution parameters showed large variation (45–55% for average values and up to 300% for dispersions). A similar variation was obtained for the accumulated damage and resource exhaustion rates on the investigated track sections. The work also reveals a high dependence of damage rate (from 40% and above) on the dynamic qualities of the rolling stock determined by its design and condition.

Discussion and conclusion. Structural and maintenance solutions for tracks with particularly high usage require constant monitoring and analysing of the loads in the wheel – rail system. This approach would improve track design and maintenance based on the operational characteristics of specific lines for safer traffic and more efficient track maintenance and repair costs.

KEYWORDS: track superstructure, track and rolling stock interaction, rail track geometry deviations, routine track maintenance, work forecasting

FOR CITATION: Suslov O. A. Effects of track and rolling stock interaction on track condition and maintenance. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):362-371. (In Russ.).

Введение. В настоящее время протяженность участков, где загрузка пропускной способности более 85 % от максимально возможной, составляет 25 % от общей эксплуатационной длины сети железных дорог. На этих участках обращается 80% от общесетевого грузооборота, а наибольший объем перевозок и количество таких участков сосредоточено на Восточном полигоне [1, 2]. Объем перевозок в направлении портов Дальнего Востока за 2023 г. составил 173 млн т, плановое значение на 2024 г. — 180 млн т, а на 2030 г. — 210 млн т. Освоение таких объемов перевозок осуществляется всеми технически возможными решениями [3, 4], в т. ч.:

- строительством двухпутных вставок, вторых и третьих путей, увеличением путевого развития станций;
- повышением массы и длины поездов (тяжеловесное движение);
- сокращением межпоездных интервалов (виртуальная сцепка);
- повышением гарантийных плеч подвижного состава и совершенствованием технологии обработки поездов в пути следования.

Повышение грузонапряженности, масс и длин поездов, уплотнение графика движения на таких участках вызывает увеличение интенсивности использования путевой инфраструктуры и, как следствие, приводит к повышению нагруженности пути (нагруженность — состояние изделия, обусловленное внешними воздействиями и режимами функционирования).

Краткий обзор проблемы. В настоящий момент наиболее перспективным направлением для организации технического обслуживания пути на линиях с высокой грузонапряженностью и дефицитом «оконного» времени, трудовых и материальных ресурсов для выполнения путевых работ является применение предиктивных технологий, основанных на применении деградационных моделей [5–10]. Состав этих моделей разнообразен и учитывает различные эксплуатационные факторы, связанные с влиянием на накопление отступлений пути от норм его устройства и содержания, такие как:

- конструктивные особенности пути (план, профиль, конструкция верхнего строения пути);
- конструктивные особенности подвижного состава (осевая схема, количество тележек и осей, нагрузка на ось) и техническое состояние его экипажной части;
- грузонапряженность, масса, скорость и режимы движения поездов.

Все вышеперечисленные факторы в результате определяют силы взаимодействия пути и подвижного состава, которые характеризуют итоговую нагруженность пути и являются итоговой причиной накопления его

расстройств [11]. Для выявления связи между эксплуатационными факторами и нагруженностью пути были выполнены исследования, результаты которых будут изложены ниже.

Методы и приемы анализа. Анализ нагруженности рассматриваемого сечения пути включает в себя следующие этапы:

- 1) определение структуры нагруженности;
- 2) определение вида нагруженности;
- 3) схематизацию нагруженности;
- 4) оценку параметров нагруженности.

Структура нагруженности для пути определяется передающимися от колес подвижного состава на рельсы силами (вертикальной, боковой и продольной) и крутящими моментами от этих сил, которые, в свою очередь, формируют силы, давления, напряжения и деформации в остальных элементах конструкции пути. Основным видом нагруженности является импульсный циклический процесс, формируемый проходом колес через сечение пути, где параметры цикла (длительность и амплитуда в одном нагружении, полный период цикла и межцикловый интервал, общее количество циклов) зависят от эксплуатационных условий участка, таких как грузонапряженность, масса/длина и скорость движения поезда, межпоездной интервал. Поскольку нагруженность циклическая (при этом каждый проход колеса через сечение пути является отдельным циклом со своей амплитудой и знаком), то наиболее актуальным является применение схематизации нагруженности по методу экстремумов, т. е. определяется значение амплитуды и ее знак от каждого колеса для каждой рассматриваемой силы, входящей в структуру нагруженности. Для получения оценочных параметров нагруженности выполняются измерения и накопления массивов амплитуд сил, передающихся от колеса на рельс. По результатам наблюдений для накопленных массивов получают оценочные параметры — закон распределения и характеризующие его параметры, которые являются базисом для дальнейших расчетов по анализу надежности пути и планирования мероприятий технического обслуживания.

Для мониторинга нагруженности пути в различных эксплуатационных условиях был разработан стационарный пост автоматической регистрации сил в системе «колесо — рельс» (далее — пост), схема и внешний вид которого представлены на рис. 1, 2 соответственно. Пост состоит из измерительных сечений, предназначенных для регистрации сил в соответствии с требованиями ГОСТ 34759–2021¹, датчиков прохода колес, регистрирующих проход подвижного состава через

¹ ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: дата введения 2022-02-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 33 с.

измерительные сечения, шкафа с аппаратурой измерения, обработки и регистрации сигналов. Набор оборудования и программное обеспечение поста позволяет в автоматическом режиме осуществлять регистрацию сигналов от вертикальных, боковых и продольных сил, их обработку для получения знаков и амплитуд сил, накопление полученных данных в массивы, передачу массивов на центральный сервер для дальнейшей обработки распределений². Данные посты были использованы в рамках проекта «Колесо — рельс» для исследования нагруженности пути на различных участках сети Октябрьской, Горьковской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог. Эксплуатационные характеристики участков установки постов приведены в табл. 1. В процессе регистрации были получены распределения вертикальных, боковых, продольных сил в системе «колесо — рельс» и их статистические характеристики за период наблюдений от 6 до 10 месяцев.

Для дальнейшего изучения были приняты вертикальные силы, так как более 60% отступлений геометрии рельсовой колеи, регистрируемых мобильными средствами диагностики, являются отступлениями в профиле — просадки, перекосы, короткие и длинные неровности.

Основные термины, которые были приняты в ходе проведения исследования:

Параметр деградации — вид отступления геометрии рельсовой колеи или элемента верхнего строения пути от нормы его устройства, измеряемого средствами диагностики или иным способом.

Амплитуда отступления — значение отступления геометрии рельсовой колеи или элемента верхнего строения пути от нормы его устройства, измеренное средствами диагностики или иным способом и выраженное в установленных единицах измерения.

Интенсивность параметра деградации — величина, определяемая как отношение разницы амплитуд отступлений параметра деградации за расчетный период к пропущенному за этот же период тоннажу или продолжительности периода.

Силовая нагрузка — совокупность значений вертикальных, боковых, продольных сил, передающихся от колес подвижного состава на рельсы.

Повреждаемость пути — показатель, функционально связывающий динамическую нагрузку с интенсивностью параметра деградации в одном цикле нагружения.

Основные гипотезы, которые были приняты для проведения исследования:

1. Причиной возникновения отступлений геометрии рельсовой колеи от норм устройства пути или выхода

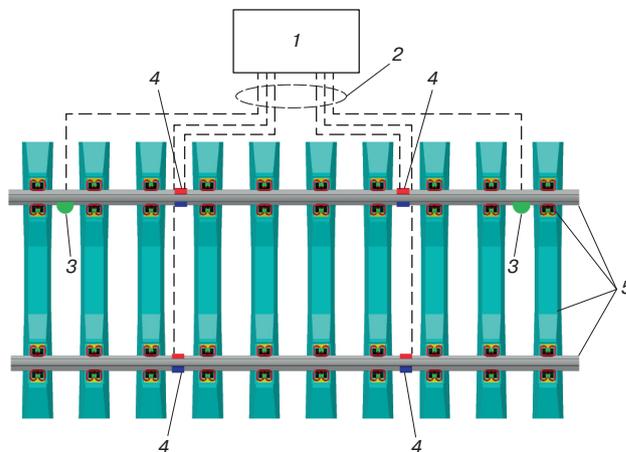


Рис. 1. Схема расположения измерительных элементов поста регистрации сил на пути:

- 1 — климатический шкаф с оборудованием; 2 — сигнальные линии; 3 — датчик прохода колес; 4 — измерительное рельсовое сечение; 5 — элементы рельсошпальной решетки измерительного участка

Fig. 1. Location of sensors and gauges in a force registration hub on the track:

- 1 — climate cabinet with equipment; 2 — signal lines; 3 — wheel detector; 4 — gauging rail section; 5 — elements of the rail-sleeper grid of the gauging section



Рис. 2. Стационарный пост автоматической регистрации сил в системе «колесо — рельс» для оценки динамики взаимодействия экипажа и пути (общий вид):

- 1 — антенна сотовой связи; 2 — климатический шкаф для оборудования; 3 — промышленный компьютер; 4 — аналогово-цифровой преобразователь сигналов от измерительного рельсового сечения; 5 — источник бесперебойного питания

Fig. 2. Stationary automatic force registration hub for assessing the cab and track interaction trends in the wheel — rail system (general view):

- 1 — mobile antenna; 2 — climate cabinet with equipment; 3 — industrial computer; 4 — A/D converter for signals from the gauging rail section; 5 — uninterruptible power supply

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617509 Российская Федерация. Программа регистрации сигналов с тензо-виброметрических датчиков измерения параметров взаимодействия в системе «колесо — рельс»: № 2020616368: заявл. 25.06.2020: опубл. 08.07.2020 / Адагуров А. С., Нерезков А. В., Сулов О. А.; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

Таблица 1

Эксплуатационные характеристики участков установки постов

Table 1

Performance of sections with installed hubs

Наименование показателя	Участок установки поста						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Железная дорога	Дальневосточная	Дальневосточная	Горьковская	Московская	Забайкальская	Забайкальская	Октябрьская
Место установки (перегон, км, пк)	Хурмули — Холони, II путь, 3752 км, пк 3	Кумтэ — Гайтер, I путь, 20 км, пк 8	Лянгасово — Поздино, II путь, 943 км, пк 3	Экспериментальное кольцо АО «ВНИИЖТ» 3 кольцевой путь, 6 км, пк 3	Укурей — Чернышевский, II путь, 6583 км, пк 6	Джиктанда — Талдан, II путь, 7381 км, пк 7	Веймарн — Котлы-II, I путь, 128 км, пк 3
План линии	Кривая R=340 м	Кривая R=400 м	Кривая R=593 м	Кривая R=1100 м	Кривая R=315 м	Кривая R=636 м	Кривая R=632 м
Установленная скорость движения грузовых поездов, км/ч	60	60	80	70	60	80	80
Средняя нагрузка на ось на участке, тс	17,0	18,3	19,0	19,3	21,2	23,9	24,0
Грузонапряженность на участке, млн т-км брутто/км в год	34,6	64,9	42,5	224,9	142,5	160,6	139,9

из строя элементов его верхнего строения являются динамические нагрузки, которые формируются поездом и вагонопотоком, проходящим через рассматриваемые сечения пути.

2. Силовая нагрузка, формируемая всем многообразием подвижного состава, режимами движения поездов для конкретного участка и конкретной силы, может быть описана кривой распределения сил в рассматриваемом сечении или на участке пути.

3. Значение амплитуды отступления в рассматриваемом сечении пути функционально связано с распределением динамических сил, действующих в этом сечении, а характер связи представлен на рис. 3.

4. Значение амплитуды отступления a складывается из накопленной в процессе эксплуатации средней части амплитуды a_{cp} и ее динамической части $a_{дин}$. Средняя часть амплитуды имеет функциональную связь с математическим ожиданием кривой распределения сил, динамическая часть — с отклонением распределения сил от ее математического ожидания.

5. Изменение амплитуды отступления Δa от значения a_i до значения a_{i+1} за период времени Δt (в этот период пропущено осей — ΔN , шт.) определяется следующим выражением:

$$a_{i+1} = a_i + W_v(d\Delta N), \quad (1)$$

где W_v — передаточная функция связи между накопленной за период времени Δt повреждаемостью $d\Delta N$ и изменением амплитуды отступления Δa ; d — повреждаемость пути в одном цикле нагружения (проход одной оси через рассматриваемое сечение пути), характерная для изменения амплитуды рассматриваемого отступления.

6. Повреждаемость пути d в одном цикле нагружения согласно исследованиям [12, 13] может быть определена выражением

$$d = \sum_{i=-3\sigma}^{i=+\sigma} (Q_i)^\chi f_i, \quad (2)$$

где Q_i — значение силы, соответствующее i -му диапазону ее распределения; f_i — значение плотности вероятности, соответствующее i -му диапазону нормированного распределения силы Q_i ; χ — степенной коэффициент.

На основании границ, приведенных на рис. 3 и в формуле (2), можно записать выражение, связывающее повреждаемость и параметры распределения этих сил:

$$d = \sum (Q_{\pm\sigma})^\chi f_{\pm\sigma} + \sum (Q_{\pm\sigma \div \pm 3\sigma})^\chi f_{\pm\sigma \div \pm 3\sigma}, \quad (3)$$

где $-3\sigma \div +\sigma$ — диапазон распределения, соответствующий среднему значению силы Q (составляющая от среднего значения нагрузки на ось); $+\sigma \div +3\sigma$ —

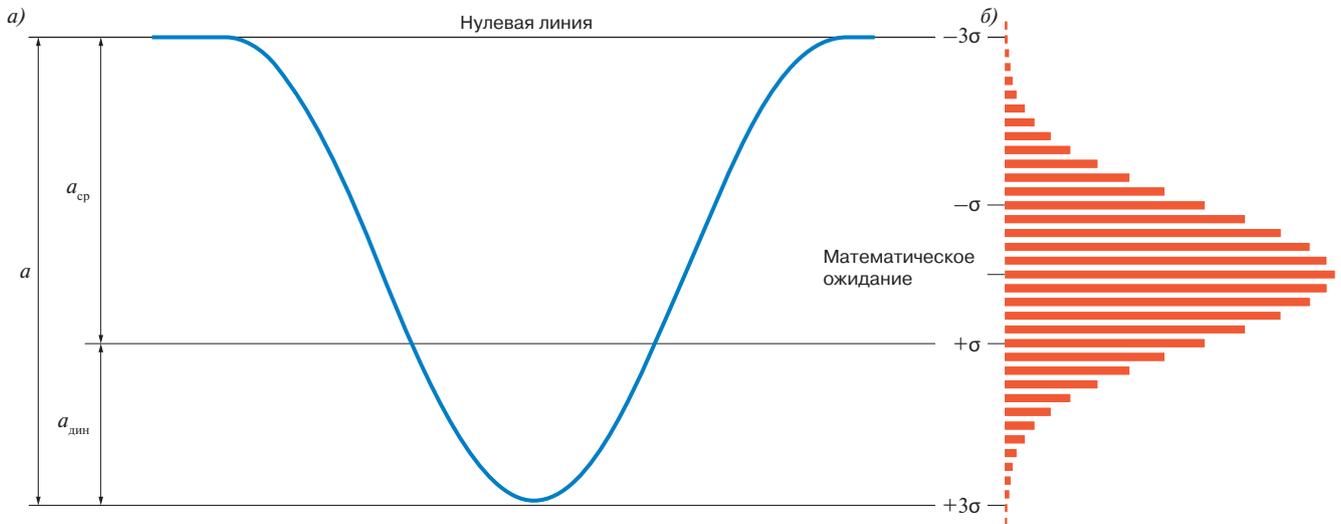


Рис. 3. Характер связи между амплитудой отступления в рассматриваемом сечении пути (а) и распределением динамических сил в системе «колесо — рельс» (б), действующих в этом же сечении и определяющих рост амплитуды отступления

Fig. 3. Correlation between the deviation amplitude in the considered track section (а) and the distribution of dynamic forces in the wheel — rail system (б) acting in the same section and determining the growth of the deviation amplitude

диапазон распределения, соответствующий отклонению распределения сил от их среднего значения (динамическая составляющая).

Результаты исследований. Анализ массивов вертикальных сил, зарегистрированных постами регистрации, показал их соответствие нормальному закону распределения, а математическое ожидание и отклонения могут быть описаны средним значением сил и среднеквадратическим отклонением (СКО). На рис. 4 представлены характеристики полученных распределений. Для расчета статистических характеристик выбраны данные измерений летних (июнь — август) и осенних (сентябрь — ноябрь) месяцев. Параметры распределений показывают, что средние значения вертикальных сил и СКО значительно отличаются по участкам наблюдений. Разброс средних значений составляет 45–55% и коррелирует со средним значением нагрузки на ось и составом вагонопотока на участке — преимущественно грузовое (участки со значением более 90 кН) или смешанное движение с наличием возврата порожних составов (участки со значением 85 кН и менее). Разброс СКО составляет более 300% и характеризует динамические качества и техническое состояние подвижного состава.

На основе выражения (3) были определены значения повреждаемости пути вертикальными силами — динамическая и среднестатистическая составляющие, а также суммарное значение повреждаемости. Результаты расчетов, расположенные в порядке возрастания средней нагрузки на ось на участке измерений, приведены в табл. 2 и на рис. 5. Дополнительно была построена зависимость распределения долевого участия

в суммарной повреждаемости вертикальными силами динамической и среднестатистической составляющих на участках измерений (рис. 6).

Анализ данных табл. 1 и величин на рис. 5 показывает, что максимальное значение суммарной удельной повреждаемости не соответствует максимальному значению средней нагрузки на ось и максимальная удельная повреждаемость соответствует участку № 2

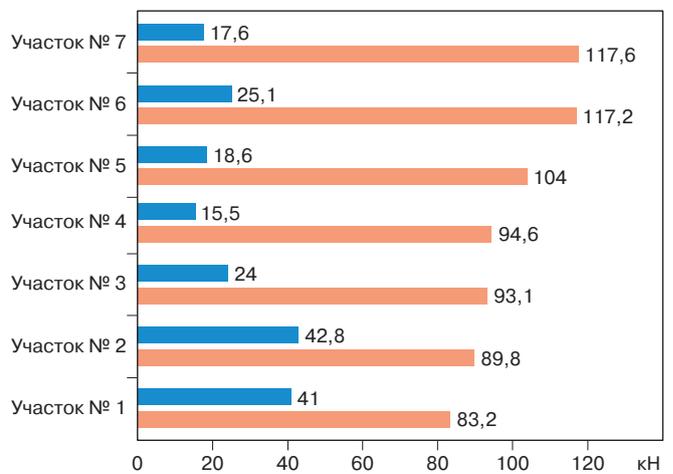


Рис. 4. Характеристики распределений вертикальных сил, полученные в процессе обработки записей сигналов с измерительных рельсовых сечений постов регистрации сил на различных участках сети:

■ — СКО, кН; ■ — среднее значение, кН

Fig. 4. Vertical force distributions obtained by processing signals from gauging rail sections of force registration hubs on network sections:

■ — standard deviation, kN; ■ — average, kN

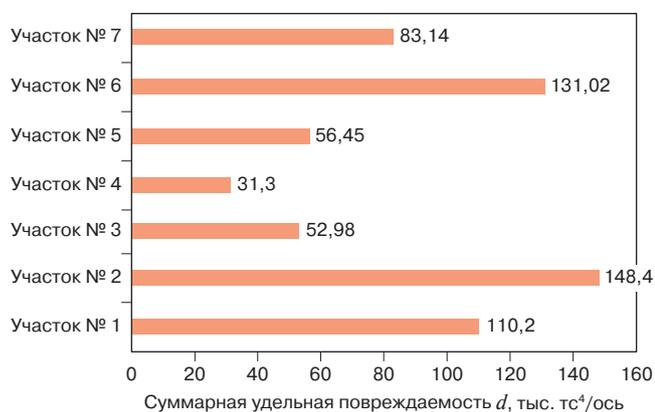


Рис. 5. Величины суммарной удельной повреждаемости пути вертикальными силами в одном цикле нагружения на различных участках сети

Fig. 5. Total specific track damage rates under vertical forces in one loading cycle on different sections of the network

Таблица 2

Значения повреждаемости пути вертикальными силами в одном цикле нагружения

Table 2

Track damage rate under vertical force in one loading cycle

Наименование показателя	Участок установки поста						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Составляющая удельной повреждаемости от средних значений сил, тыс. тс ⁴ /ось	45,97	66,15	31,22	22,48	41,77	90,17	60,09
Составляющая удельной повреждаемости от динамических добавок сил, тыс. тс ⁴ /ось	64,23	82,25	21,76	8,82	14,68	40,85	23,05
Суммарная удельная повреждаемость d , тыс. тс ⁴ /ось	110,2	148,40	52,98	31,30	56,45	131,02	83,14

(средняя нагрузка на ось — 18,3 тс), а суммарная удельная повреждаемость на участке в 1,8 раза выше повреждаемости участка с максимальным значением средней нагрузки на ось — участок № 7 (средняя нагрузка на ось — 24 тс). Дополнительно можно отметить, что повреждаемости участков № 3 и 5 идентичны (разница составляет 6,5%), при этом разница в средних нагрузках на ось составляет 12%, а значение коэффициента корреляции между средней нагрузкой на ось и суммарной удельной повреждаемостью составляет менее 0,05, что свидетельствует о полном отсутствии связи между суммарной удельной повреждаемостью и средней нагрузкой на ось на участке.

Значение коэффициента корреляции между средней нагрузкой на ось и удельной повреждаемостью

динамической составляющей распределения составляет 0,51; для удельной повреждаемости среднее значение распределения коэффициента корреляции составляет 0,41. Оба значения коэффициента свидетельствуют о наличии корреляции слабой силы. Значения доли динамической составляющей колеблются от 28 до 58%. Повышение долевого значения связано с ростом значения величины СКО вертикальных сил на участке, что, как было отмечено ранее, связано с динамическими качествами и состоянием подвижного состава.

Удельная повреждаемость характеризует состояние вагонопотока в единичном цикле нагрузки, однако для накопления отступлений важна не только удельная характеристика, но и влияние фактической нагруженности пути на изменение амплитуды отступления $\Delta a = W_v(d\Delta N)$ за период времени $\Delta t = 15$ сут, что соответствует среднему значению периодичности контроля состояния пути мобильными средствами диагностики, при пропуске за этот период осей, шт., т. е. $\Delta N_{15\text{сут}} = (15/365)\Gamma \cdot 10^6 / P_{\text{сред}}$, где Γ — грузонапряженность на участке, млн т·км брутто/км в год, $P_{\text{сред}}$ — средняя нагрузка на ось на участке. В табл. 3 представлены результаты анализа.

Оценка производилась в первом приближении при условии линейности передаточной функции связи W_v между накоплением амплитуды Δa и накоплением повреждаемости $d\Delta N$. Как видно из данных табл. 3, наиболее интенсивно накопление амплитуд отступлений за период 15 сут будет происходить на участке № 6 (перегон Джиктанда—Талдан Забайкальской железной дороги), а значение накопления повреждаемости данного участка практически в 7,4 раза больше среднесетевого уровня. Повышенное значение накопления может привести к появлению отступлений, значения амплитуд которых могут требовать ограничений скорости при следующем проходе мобильных средств диагностики, что повышает риск возникновения отказов и подтверждается высокой балловой оценкой состояния пути на участке № 6 (336 баллов при среднесетевом значении 46 баллов).

Также данный показатель характеризует общий темп накопления отступлений и истощения ресурса элементов пути в целом, а с учетом полученных значений накоплений возможно обоснованно вносить корректировки в периодичность диагностики и потребные трудовые и материальные ресурсы с учетом особенностей вагону- и поездопотока на конкретном участке. Оценка силы корреляционной связи между значением накопленной повреждаемости на участке и его грузонапряженностью показала значение 0,46 (сила связи слабая); аналогичный коэффициент для среднего значения нагрузки на ось составляет 0,70 (связь между параметрами сильная), что говорит о необходимости учета показателя среднего значения

нагрузки на ось в качестве критерия для нормирования при организации текущего содержания.

В рамках научного проекта по оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс», реализованного в 2022–2024 гг. научно-образовательным комплексом ОАО «РЖД» под руководством АО «ВНИИЖТ» [14], были разработаны и утверждены комплексные мероприятия по снижению силового воздействия на инфраструктуру путевого хозяйства. Комплексные мероприятия, кроме разделов по оптимизации норм устройства и содержания пути, включают технические требования к тележкам грузовых вагонов, позволяющие добиться снижения динамической составляющей воздействия на путь до 15–25 %.

Для оценки влияния этого снижения на общее накопление повреждаемости пути были сделаны расчеты, аналогичные приведенным ранее, при которых было задано снижение значений СКО вертикальных сил на 25 %. Результаты расчета, представленные в табл. 4, показывают, что возможное снижение накопления повреждаемости пути при снижении СКО вертикальных сил составляет от 40 до 80 %.

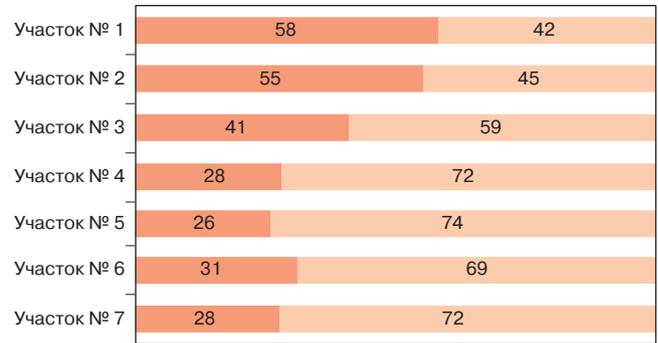


Рис. 6. Распределения долевого участия в суммарной удельной повреждаемости среднего значения и динамической составляющей вертикальных сил на различных участках сети:

■ — доля повреждаемости динамической составляющей распределения сил, %; ■ — доля повреждаемости средним значением распределения сил, %

Fig. 6. Shares of the mean value and dynamic component of vertical forces in the total specific damage on different network sections:

■ — share of the damage from the dynamic component of the force distribution, %; ■ — share of the damage from the mean value of the force distribution, %

Таблица 3

Значения накопленной повреждаемости пути вертикальными силами за период 15 сут

Table 3

Accumulated track damage under vertical force for 15 days

Наименование показателя	Участок измерений						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Число осей за период 15 сут (ΔN), шт.	83 700	146 000	91 900	479 000	276 000	276 000	239 000
Значение накопленной повреждаемости за 15 сут ($d\Delta N$), млрд тс ⁴	9,23	21,6	4,87	15,01	15,6	36,2	19,9
Изменение накопленной повреждаемости относительно среднесетевого уровня*	1,9	4,4	1**	3,1	3,2	7,4	4,1

* Определено как отношение накопленной повреждаемости на рассматриваемом участке к повреждаемости на участке, соответствующей среднесетевому значению эксплуатационных условий (участок № 3, Горьковская железная дорога).

** Среднесетевой уровень.

Таблица 4

Значения накопленной повреждаемости пути вертикальными силами за период 15 сут с учетом снижения динамичности подвижного состава

Table 4

Accumulated track damage under vertical force for 15 days considering reduced dynamics of the rolling stock

Наименование показателя	Участок измерений						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Число осей за период 15 сут (ΔN), шт.	83 700	146 000	91 900	479 000	276 000	276 000	239 000
Значение накопленной повреждаемости с учетом снижения динамичности подвижного состава (период 15 сут), млрд тс ⁴	5,01	11,9	3,31	10,5	10,8	24,5	14,1
Изменение накопленной повреждаемости относительно среднесетевого уровня	1,03	2,45	0,68	2,16	2,23	5,03	2,90

Обсуждение и заключение. Нагруженность пути силовым воздействием и соответствующее этой нагруженности накопление повреждаемости пути — параметры, которые комплексно характеризуют условия эксплуатации пути. Эти параметры позволяют учесть реальное состояние подвижного состава, входящего в вагонопоток участка, а также режимы движения поездов с учетом их масс, скоростей движения, особенностей формирования составов, межпоездных интервалов.

Проведенный для различных участков пути анализ полученных распределений нагруженности пути показывает, что результаты значительно отличаются по участкам наблюдений. Разброс средних значений нагруженности составляет 45–55 % и коррелирует со средним значением нагрузки на ось на участке, разброс дисперсии нагруженности составляет более 300 % и характеризует динамические качества и состояние подвижного состава. Полученная разница в нагруженности рассмотренных участков объясняет результаты оценки состояния пути по балловой оценке: на участках с меньшей нагруженностью и интенсивностью накопления повреждаемости количество штрафных баллов в 3–5 раз ниже, чем на участках с максимальным выявленным значением.

Выявлена зависимость значения повреждаемости пути от динамических качеств подвижного состава — его устройства и технического состояния. Доля в суммарной повреждаемости от динамической составляющей нагруженности составляет от 30 до 60 %. Такой разброс позволяет использовать эту составляющую как резерв для продления срока службы пути за счет улучшения состояния и конструкции подвижного состава с целью снижения динамической составляющей и накопленной повреждаемости. Расчеты показали, что снижение дисперсии для нагруженности от вертикальных сил в системе «колесо — рельс» на 25 % позволяет снизить повреждаемость в зависимости от участка на 40–80 %, продлив тем самым срок эксплуатации пути и снизив расходы на его техническое обслуживание и ремонт.

С учетом выявленного влияния полученных значений нагруженности и повреждаемости на общее состояние пути можно сделать вывод о необходимости наблюдения за этими параметрами. Таким образом, по полученным результатам для пути должны синхронизироваться:

- требования к конструкции;
- периодичность диагностики;
- периодичность проведения ремонтов;
- расчет контингента и норм расхода ресурсов;
- сроки проведения работ по устранению выявленных отступлений.

Анализ динамической составляющей нагруженности позволяет уточнять требования к состоянию подвижного состава с учетом возможностей технического

обслуживания пути на данном участке и затраты на его текущее содержание. Такой подход позволит оптимизировать устройство и техническое обслуживание пути с учетом эксплуатационных особенностей конкретных направлений, что обеспечит безопасность движения и повысит эффективность затрат на техническое обслуживание и ремонты пути.

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

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

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Выдашенко Л. А., Выдашенко П. А., Гарифуллина Ю. М. Исследование перспектив развития Восточного полигона на Транссибирской магистрали // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9, № 4. С. 389–398. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/89/45>.
2. Vydashenko L. A., Vydashenko P. A., Garifullina Yu. M. Study of the prospects of development of the Eastern polygon on the Trans-Siberian highway. *Bulletin of Science and Practice*. 2023;9(4):389-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/89/45>.
3. Кокшаров В. А. Отраслевая оценка развития железнодорожного транспорта // Инновации и инвестиции. 2022. № 11. С. 155–158. EDN: <https://elibrary.ru/lcesti>.
4. Koksharov V. A. Sectorial assessment of the development of railway transport. *Innovations and Investments*. 2022;(11):155-158. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/lcesti>.
5. Рачек С. В., Колышев А. С. Применение технологии тяжеловесного движения на железных дорогах мира // Евразийский союз ученых. 2016. № 1 (22). С. 94–96. EDN: <https://elibrary.ru/xdeamh>.
6. Rachek S. V., Kolyshev A. S. Application of heavy-weight traffic technology on the world railways. *Eurasian Union of Scientists*. 2016;(1):94-96. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xdeamh>.
7. Криворотов А. А., Григорьева Н. Н. Инфраструктура Восточного полигона: реальность и перспективы // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием, Хабаровск, 16–19 апреля 2019 г.: в 2 т. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. Т. 1. С. 330–334. EDN: <https://elibrary.ru/gpymnb>.
8. Krivorotov A. A., Grigor'yeva N. N. Infrastructure of the Eastern Polygon: reality and prospects. In: *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia Pacific countries in the XXI century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Creative Youth with international participation, 16–19 April 2019, Khabarovsk: 2 Vols*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University Publ.; 2019. Vol. 1. p. 330–334. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/gpymnb>.

5. Сулов О. А., Федорова В. И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 5. С. 251–259. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.

Suslov O. A., Fedorova V. I. Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(5):251-259. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.

6. Бельтюков В. П. Принципы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути // Инфраструктура транспорта. 2022. № 1 (3). С. 65–78. EDN: <https://elibrary.ru/oesaoh>.

Beltyukov V. P. Principles for forecasting of railway track technical condition changes. *Infrastruktura transporta*. 2022;(1):65-78. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oesaoh>.

7. Дружинина О. В., Гапеева А. С., Людаговская М. А. Анализ системы «железнодорожный путь — подвижной состав» на основе методов оценки влияния поездных нагрузок на техническое состояние пути // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 6. С. 3–9. EDN: <https://elibrary.ru/vafnsw>.

Druzhinina O. V., Gapeeva A. S., Ludagovskaya M. A. Analysis of the “railway track — rolling stock” system on the basis of methods for assessment of the impact of train loads on technical condition of track. *Transport: science, equipment, management*. 2019;(6):3-9. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vafnsw>.

8. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Process organisation modelling for maintaining rail track geometry. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):168-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

9. Бельтюков В. П., Симонюк И. А. К вопросу об улучшении среднесрочного планирования путевых работ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13, № 4(49). С. 472–477.

Beltyukov V. P., Simonyuk I. A. Concerning the improvement of medium-term track works planning. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016;13(4):472-477. (In Russ.).

10. Баронайте Р. А. Определение потребности в выправочных работах с учетом интенсивности роста расстройств // Железная дорога: путь в будущее: сб. материалов I Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 г. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. С. 9–15. EDN: <https://elibrary.ru/tpnjyo>.

Baronayte R. A. Determination of the need for surfacing on railway track according to the intensity of the growth deviations. In: *The railway: track to the future: Proceedings of the International Scientific Conference of postgraduates and young scientists, 28–29 April 2022, Moscow*. Moscow: Railway Research Institute; 2022. p. 9–15. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tpnjyo>.

11. Федорова В. И., Назаров И. В., Горский Д. В. Анализ состояния пути Восточного полигона с применением цифрового грузового вагона V.1.0 в рамках оптимизации взаимодействия системы колесо — рельс // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб.

материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 августа 2023 г. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2023. С. 275–283. EDN: <https://elibrary.ru/kglsbb>.

Fedorova V. I., Nazarov I. V., Gorskiy D. V. Analysis of the track condition of the eastern polygon using the V.1.0 Digital freight car in the framework of optimising the interaction of the wheel — rail system. In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Proceedings of the II International Conference, 24–25 August 2023, Moscow*. Moscow: Railway Research Institute; 2023. p. 275–283. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kglsbb>.

12. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М. Ф. Вериги. М.: Транспорт, 1986. 558 с.

Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Track and rolling stock interaction*. Moscow: Transport Publ.; 1986. 558 p. (In Russ.).

13. Huesmann H., Beck A. Система колесо — рельс с точки зрения путевого хозяйства // Железные дороги мира. 2005. № 10. С. 12. EDN: <https://elibrary.ru/hsxxoj>.

Huesmann H., Beck A. The wheel and rail system in terms of railway facilities. *Zheleznyye dorogi mira*. 2005;(10):12. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hsxxoj>.

14. Оптимизация взаимодействия в системе колесо — рельс / С. А. Виноградов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45. EDN: <https://elibrary.ru/pevfyz>.

Vinogradov S. A., Sukhov A. V., Lunin A. A., Suslov O. A., Nazarov I. V., Zagranichesk K. L. Improvement of wheel and rail interaction. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2023;(3):37-45. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pevfyz>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Олег Александрович СУСЛОВ,

д-р техн. наук, технический эксперт, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 445985, <https://orcid.org/0000-0001-5466-5479>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg A. SUSLOV,

Dr. Sci. (Eng.), Technical Expert, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 445985, <https://orcid.org/0000-0001-5466-5479>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 11.11.2024, рецензия от второго рецензента получена 18.11.2024, рецензия от третьего рецензента получена 25.11.2024, принята к публикации 25.11.2024.

The article was submitted 06.03.2024, first review received 11.11.2024, second review received 18.11.2024, third review received 25.11.2024, accepted for publication 25.11.2024.