

Влияние различных скоростей движения поездов на силовое взаимодействие подвижного состава и железнодорожного пути в условиях высокой грузонапряженности

А.А. Осколков^{1,2}, Т.Н. Асалханова²✉

¹Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Резюме

В условиях активного развития российско-китайских торгово-экономических отношений и ориентации перевозочного процесса нашей страны на восток возникают новые вызовы для железнодорожной инфраструктуры, связанные с расширением объемов грузопотока по Восточному полигону. Провозная способность по железным дорогам полигона к 2024 г. должна увеличиться до 180 млн т в год, а транзитный контейнеропоток – почти в 4 раза; к 2030 г. планируется рост первого показателя до 255 млн т. Таким образом, полигон становится одним из ключевых российских транспортных коридоров. В этих условиях эксплуатации инфраструктурный комплекс будет испытывать огромную нагрузку. Планирование и организация текущего содержания железнодорожного пути, ремонтных работ становятся сложной задачей для структурных подразделений путевого хозяйства: с одной стороны, обеспечение качественной эксплуатации пути, а с другой – сохранение пропускной способности с учетом установленных скоростей и безопасности движения подвижного состава. Анализ инцидентов, зафиксированных в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой за последние годы по Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры, показал, что на указанные процессы негативно влияют отказы технических средств, ненадежность конструкций элементов верхнего строения пути, а также недостаточные меры безопасности в виде ограничения скорости движения. Для решения стоящих проблем необходимо искать новые подходы к планированию, организации и выполнению работ по поддержанию объектов инфраструктуры путевого хозяйства на требуемом техническом уровне в условиях высокой грузонапряженности с целью обеспечения безопасного движения поездов с установленными скоростями, использовать различные способы продления ресурсного срока эксплуатации железнодорожного пути и пересматривать скоростные режимы, которые должны не только способствовать повышению безопасности перевозочного процесса, но и положительно повлиять на пропускную способность.

Ключевые слова

железнодорожный путь, рельсовая нить, кривые участки пути, оптимальный скоростной режим, планирование, текущее содержание пути

Для цитирования

Осколков А.А. Влияние различных скоростей движения поездов на силовое взаимодействие подвижного состава и железнодорожного пути в условиях высокой грузонапряженности / А.А. Осколков, Т.Н. Асалханова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1 (81). С. 126–137. DOI 10.26731/1813-9108.2024.1(81).126-137.

Информация о статье

поступила в редакцию: 27.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 01.03.2024 г.; принята к публикации: 05.03.2024 г.

The influence of different train speeds on the force interaction of rolling stock and railway track under high freight intensity

А.А. Oskolkov¹, T.N. Asalkhanova²✉

¹The East-Siberian Infrastructure Directorate – Structural Subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Abstract

In the context of the widespread development of Russian-Chinese trade and economic relations and the orientation of our country's transportation process to the east, new challenges are faced by the railway infrastructure associated with an increase in freight traffic through the Eastern polygon. The freight capacity on the polygon's railways is expected to increase to 180 million tons per year by 2024, the transit container traffic almost four times, and by 2030 it is planned to increase to 255 million tons.

Therefore, the polygon is becoming one of the key Russian transport corridors. Under such operating conditions, the infrastructure complex experiences an enormous strain. Planning and organization of the current maintenance of the railway track and repair work are becoming a difficult task for the structural divisions of the track management: on the one hand, ensuring the quality operation of the track, and on the other, maintaining the passage of train traffic taking into account the established speeds and ensuring the safety of rolling stock. The analysis of incidents recorded in the unified corporate automated infrastructure management system in recent years by the East Siberian Directorate of Infrastructure showed that the planning and organization of the current maintenance of the track and the capacity of the East Siberian Railway are negatively affected by failures of technical means, insufficient reliability of the element design of the upper structure of the track, as well as the security measures in the form of a speed limit. To solve the problems, it is necessary to find new approaches to planning, organizing and performing work to maintain the technical level of track infrastructure facilities under high load conditions, ensuring safe movement of trains with established speeds, but also to consider methods for extending the service life of a railway track and revising the speed management system, which not only have to increase the safety of the transportation process, but also to have a positive effect on the throughput capacity of the transportation process while extending the service life of the track infrastructure.

Keywords

railway track, rail thread, curved sections of track, optimal speed, planning, current maintenance of the track

For citation

Oskolkov A.A., Asalkhanova T.N. Vliyaniye razlichnykh skorostei dvizheniya poezdov na silovoe vzaimodeistvie podvizhnogo sostava i zheleznodorozhnogo puti v usloviyakh vysokoi gruzonapryazhennosti [The influence of different train speeds on the force interaction of rolling stock and railway track under high freight intensity]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 1(81), pp. 126–137. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.1(81).126-137.

Article info

Received: October 27, 2023; Revised: March 1, 2024; Accepted: March 5, 2024.

Введение

В нормативно-технических документах ОАО «РЖД» по планированию, организации ремонтных путевых работ, текущему содержанию железнодорожного пути при выявлении критичных отступлений от норм и допусков содержания пути должны приниматься меры безопасности в виде плановых, первоочередных и неотложных путевых работ, как правило, для последних принято использовать меру безопасности в виде ограничения скоростей движения поездов. Правилами и инструкциями определяются общие принципы, технические параметры, нормы и требования в современных условиях ремонта железнодорожного пути, в том числе при высокой грузонапряженности, постоянном движении грузовых поездов с повышенной массой и длиной, то, что и наблюдается в последние годы на железных дорогах Восточного полигона [1–5].

С учетом существующих условий и дальнейшего развития магистральной инфраструктуры перед путевым хозяйством стоят определенные задачи по поддержанию показателей качества, надежности и работоспособности всех элементов железнодорожного пути в условиях нарастания нагрузки на путь. Прежде всего эти задачи касаются планирования, организации

технического обслуживания объектов путевой инфраструктуры Восточного полигона [6–9].

Своевременное выполнение путевых ремонтных работ часто связано с потерями пропускной способности, вызываемыми ограничением скорости движения поездов. Однако в ряде случаев можно определить, что не всегда ограничение скорости является эффективной мерой не только для обеспечения безопасности движения поездов, но и для снижения негативного воздействия на техническую составляющую инфраструктуры железнодорожного пути, которая напрямую связана с ресурсным сроком эксплуатации рельсовой нити [10, 11].

Целью статьи является анализ силового воздействия подвижного состава на рельсовые нити железнодорожного пути при различных скоростях движения, расчет рациональных скоростных режимов ведения поездов для повышения ресурса рельсов и снижения влияния на железнодорожный путь подвижного состава в условиях высокой грузонапряженности.

Постановка проблемы

Режимы движения поездов на малых скоростях и критичные ограничения скорости – до 15–40 км/ч, устанавливаемые в кривом участке пути при возвышении 100 мм и более, способствуют повышенному вертикальному усилию

на внутреннюю рельсовую нить – до 156 кН, что на 35 кН больше, чем усилие на рельс при равновесном движении (121 кН) (рис. 1).

Разрушительное усилие на внутреннюю рельсовую нить возникает при отсутствии достаточной центробежной силы, необходимой для компенсации бокового воздействия, возникшего от поперечного уклона пути (горизонтальной составляющей силы тяжести) при установлении критического ограничения скорости движения. непогашенное ускорение рассчитывается по формуле (1):

$$A_{\text{нп}} = A_{\text{ц}} - A_{\text{Т}} = \left(\frac{V^2}{R} \right) - \left(\frac{gH}{S} \right);$$

$$A_{\text{нп}} = \frac{\Delta F}{m} (\Delta F - \text{сила от } A_{\text{нп}}); \quad (1)$$

$$V_{\text{огр}} = \sqrt{\left(\frac{gHR}{S} \right)} \text{ при } A_{\text{нп}} \geq 0,$$

где $A_{\text{нп}}$ – непогашенное ускорение вагона; $A_{\text{ц}}$ – центростремительное ускорение вагона; $A_{\text{Т}}$ –

ускорение силы тяжести, вызванное уклоном железнодорожного пути [11–13].

Проведем расчеты силы давления на наружную нить при различных скоростях движения.

Силовое воздействие на железнодорожный путь рассчитывается по формуле моментов сил:

$$\sum M_{E_{\text{в}}} = 0; (E_{\text{н}} \cdot S - M_{\text{ц}} - F_{\text{Т}} \cdot \cos \alpha \cdot l_{\text{в}}) / S = 0.$$

Сумма моментов сил относительно $E_{\text{в}}$:

$$\sum M_{E_{\text{н}}} = 0; (E_{\text{в}} \cdot S + M_{\text{ц}} - F_{\text{Т}} \cdot \cos \alpha \cdot l_{\text{н}}) / S = 0.$$

Сумма моментов сил относительно точки

$E_{\text{н}}$:

$$\sum F_{E_{\text{н}}} = 0; E_{\text{в}} + E_{\text{н}} - F_{\text{Т}} \cdot \cos \alpha = 0$$

(проверка пройдена).

Расчет составляющих частей:

$M_{\text{ц}} = P \cdot V^2 \cdot H/R$ (момент от центробежной силы); $F_{\text{Т}} = m \cdot g$ (сила тяжести экипажа с тележкой вагона); $l_{\text{н}} = (S/2) + H \cdot \tan \alpha$ (плечо от реакции опоры наружного рельса до проекции центра масс вагона); $l_{\text{в}} = S - l_{\text{н}}$ (плечо от реакции опоры внутреннего рельса до проекции центра масс вагона).

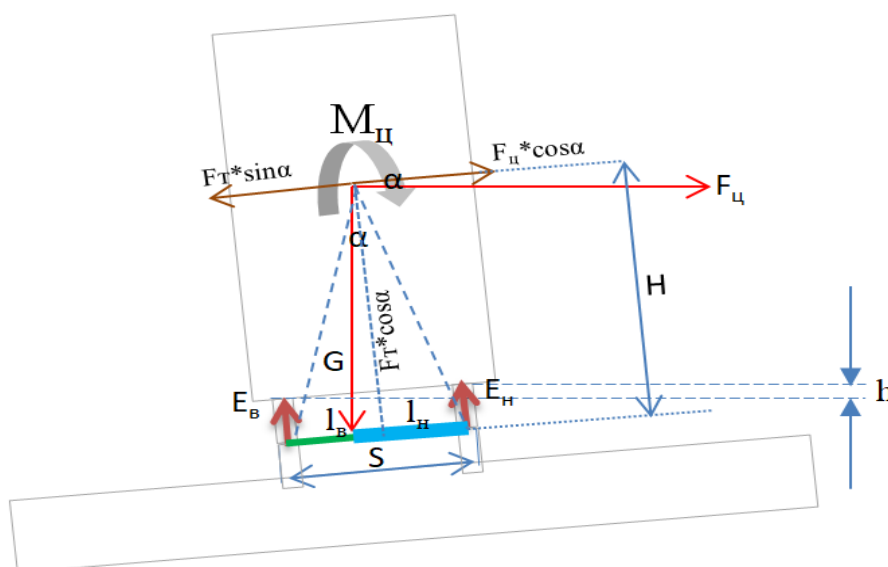


Рис. 1. Боковое воздействие подвижного состава на наружную рельсовую нить:

h – возвышение наружного рельса; S – ширина рельсовой колеи; α – угол наклона железнодорожного пути; H – высота центра масс вагона; $F_{\text{ц}}$ – центробежная сила; G – вес экипажа; $F_{\text{Т}}$ – сила тяжести экипажа с тележкой вагона; $M_{\text{ц}}$ – момент вызванный центробежной силой; $E_{\text{в}}$ – вертикальная реакция опоры внутреннего рельса; $E_{\text{н}}$ – вертикальная реакция опоры наружного рельса; $l_{\text{в}}$ и $l_{\text{н}}$ – плечи от реакции опор внутреннего рельса и наружного рельса относительно проекции центра масс вагона

Fig. 1. Lateral impact of the rolling stock on the outer rail thread:

h – elevation of the outer rail; S – width of the track; α – inclination angle of the railway track; H – the height of the center of mass of the wagon; $F_{\text{ц}}$ – the centrifugal force; G – the weight of the crew; $F_{\text{Т}}$ – the gravity of the crew with the trolley of the wagon; $M_{\text{ц}}$ – the momentum caused by centrifugal force; $E_{\text{в}}$ – the vertical reaction of the support of the inner rail; $E_{\text{н}}$ – the vertical reaction of the support of the outer rail; $l_{\text{в}}$ and $l_{\text{н}}$ – the shoulders from the reaction of the supports of the inner rail and the outer rail relative to the projection of the center of mass of the wagon

вагона); m – масса вагона с экипажем взята 25 000 кг на ось; S – 1,58 м; h – 0,15 м; H – 2,5 м; R – 300 м.

При скорости 0 км/ч сила давления на внутреннюю нить $F = 158$ кН, на наружный рельс – 85 кН.

При скорости 15 км/ч сила давления на внутренний рельс 156 кН, на наружный рельс – 87 кН.

При скорости 25 км/ч сила давления на внутренний рельс 152 кН, на наружный рельс 81 кН.

При скорости 40 км/ч сила давления на внутренний рельс 142 кН, на наружный рельс – 101 кН.

При $V_{\text{опт}}$ 60 км/ч сила давления на внутренний и наружный рельс $E_e = E_n$ 121 кН, что соответствует равносному движению подвижного состава, при котором горизонтальные и вертикальные усилия, действующие на подвижной состав, скомпенсированы.

Принимая во внимание расчет вертикального усилия на внутреннюю рельсовую нить, можно сделать вывод, что при ограничении скорости или следовании с низкой скоростью подвижной состав оказывает усилие на внутреннюю рельсовую нить, превышающее усилие на наружный рельс в 1,8 раза при 15 км/ч, в 1,7 раза при 25 км/ч, в 1,4 раза при 40 км/ч, в 1,2 раза при 50 км/ч. Стоит учитывать, что невыполнение скорости равновесного движения подвижного состава (следование с более медленной скоростью) создает перекос экипажа и зажатие скользуна вагона, тем самым повышая усилие для поворота тележки и бокового давления на рельсовую нить. Поэтому следование с медленной скоростью 15–40 км/ч в кривых участках пути малого радиуса значительно усугубит параметр неисправности по уширению рельсовой колеи и может привести к более негативным последствиям. Также важно определить, по какой рельсовой нити возникло уширение рельсовой колеи, для следующих случаев:

1. Если это наружная упорная рельсовая нить, то для обеспечения безопасности можно применить ограничение скорости, при котором центробежная сила будет полностью компенсироваться возвышением (непогашенное ускорение $A_{\text{нп}} = 0$, при этом трение на скользуне практически не будет препятствовать повороту тележки.

2. Если уширение пути возникло по состоянию внутренней рельсовой нити, то устанавливать ограничение скорости и следование со скоростью отрицательного непогашенного ускорения должно быть запрещено системой ведения поезда (для случая, когда причиной ограничения скорости не является другая неисправность пути, либо есть внешние причины, требующие снижения скорости).

Способы продления ресурса эксплуатации железнодорожного пути

В результате анализа воздействия сил на рельсовую нить предлагаются способы, которые позволят эффективнее принимать меры безопасности, связанные с ограничением скорости движения подвижного состава, и повысить ресурс эксплуатации железнодорожного пути:

1. В кривых участках пути необходимо рассчитывать ограничение скорости без превышения скорости равновесного движения и не менее 5 км/ч, т. е. устанавливать скорость, при которой непогашенное ускорение $A_{\text{нп}} = 0$ м/с².

2. В кривых участках пути должны быть ограничены режимы движения локомотивов со скоростями менее 5 км/ч относительно равновесной скорости, но при условии отсутствия иных ограничений скорости или внешних обстоятельств.

3. В границах нестабильного участка железнодорожного пути, при наличии действующих допустимых для движения неисправностей в плане, запретить торможения подвижного состава, так как это критически усугубит параметр неисправности и может привести к резкому росту величины неисправности.

Предлагаемый расчет рациональной скорости необходимо производить по фактическому состоянию возвышения наружной нити в кривой (не по проекту), а также учитывать индивидуальное состояние наружной и внутренней рельсовых нитей пути, где важно исключить боковое воздействие на ослабленную рельсовую нить и выдержать оптимальный скоростной режим, обеспечивающий не только безопасный пропуск поездов с минимальным износом рельсов, но и рационально высокую скорость движения подвижного состава [14].

Таким образом, необходима разработка информационной системы управления рациональной скоростью (СУРС), в которой можно будет производить расчеты с рекомендациями по

принятию решений об ограничении скорости движения подвижного состава и передаче информации в корпоративные автоматизированные системы в режиме онлайн.

Об ограничении скорости по величине растянутого стыкового зазора железнодорожного пути

Наряду со сложным планом пути и расчетом оптимального скоростного режима в СУРС не менее актуальным моментом является и другой фактор: необходимо также решить задачу моделирования воздействия скоростного режима в случае наличия растянутых зазоров и установленных нормативными документами мер безопасности для принятия рациональных решений содержания рельсового стыка в части улучшения безопасности движения и продления жизненного ресурса системы «колесо – рельс». Изучение системы «колесо – рельс» проводится с учетом различных условий, но все равно требуются дополнительные исследования [15].

В частности, предлагается провести расчет импульса ударной силы и мощности колеса железнодорожного состава в рельсовом стыке при учете различных скоростей движения (рис. 2).

Произведем расчет t – время касания колеса в стыке от нижней части колеса и края отдающего рельса (А) к точке касания колесом,

принимающего рельса (Е).

Для определения фазы полета колеса используем дифференциальные уравнения плоскопараллельного движения:

– координаты центра колеса определим по формуле (2):

$$x = V \cdot t; h = gt^2/2; \quad (2)$$

– скорости движения по проекциям движения колеса, ω – угловая скорость – определим по (3):

$$V_x = V; V_y = gt; \omega = V/R. \quad (3)$$

Рассчитаем траекторию точки касания колеса с принимающим рельсом по формуле (4):

$$\begin{aligned} CEa &\geq a^2 + aE^2 = CE^2 = R^2; \\ aE &= \Delta - Vt; \\ Ca &= R - \frac{gt^2}{2}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$R^2 = (\Delta - Vt)^2 + \left(R - \frac{gt^2}{2}\right)^2.$$

Из полученной математической зависимости решаем уравнение четвертой степени, где находим время касания окружности колеса в точке Е принимающего рельса т.

Далее определим проекции точки С до удара на оси центроиды касания принимающего рельса и ее перпендикуляра по формуле (5):

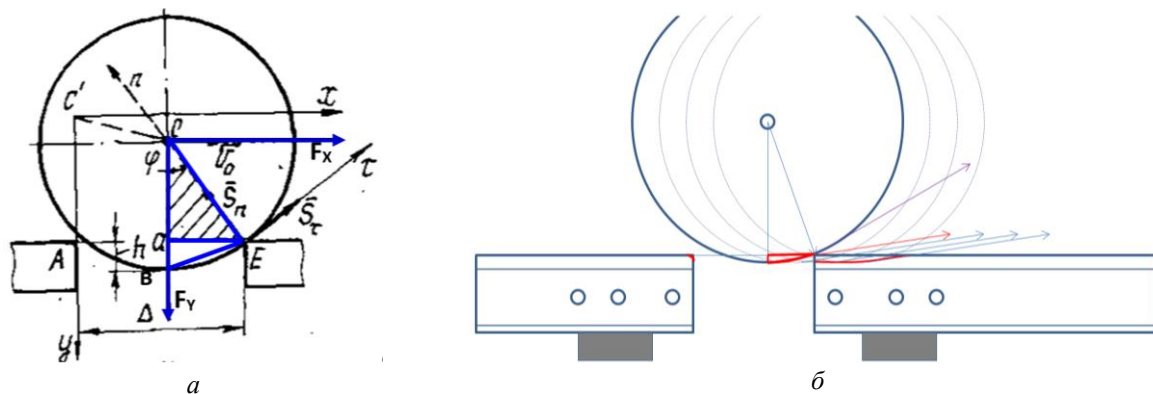


Рис. 2. Схема соударения колеса и рельса:

a – схема жесткого соударения колеса о принимающий рельс в стыке;

б – моделирование деформации поверхности принимающего рельса при одинаковой скорости качения колеса (Δ – стыковой зазор AE ; v – скорость центра колеса (точки C); v_0 – угловая скорость качения колеса; h – высота свободного падения; R – радиус колеса; CE – центроида импульса удара колеса о принимающий рельс (траектория точки касания колеса с принимающим рельсом))

Fig. 2. Wheel and rail collision diagram:

a – the scheme of the hard collision of the wheel on the receiving rail at the junction;

b – modeling of deformation of the surface of the receiving rail at the same rolling speed of the wheel (Δ – butt gap AE ; v – wheel center velocity (point C); v_0 – angular rolling velocity of the wheel; h – free fall height; R – wheel radius; CE – centroid of the wheel impact pulse on the receiving rail (trajectory of the point of contact of the wheel with the receiving rail-with a rail))

$$\begin{aligned} V_n &= V_x \sin \varphi + V_y \cos \varphi; \\ V_T &= V_x \cos \varphi - V_y \sin \varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Вычислим, при каких скоростях существует свободное падение колеса, по формуле (6):

$$\Delta - aE < \Delta/2. \quad (6)$$

При указанной зависимости колесо будет иметь свободное падение. Необходимо определить скорость, при которой начинается свободное падение.

Для более точного расчета силы воздействия на принимающий рельс в точке E произведем расчет усилия, необходимого для преодоления колесом уступа, возникшего в результате свободного падения в период проезда стыкового зазора $\Delta(AE)$. Для этого построим схему преодоления колесом вертикального уступа в точке E и произведем дополнительный расчет проекции скорости V_{BE} , и проекций силы F_x , F_y , из треугольника BaE (рис. 3).

Для дальнейших расчетов составим уравнение моментов сил (7) для преодоления уступа высотой h с плечами Ea и aB :

$$\begin{aligned} F_x \cdot d_1 - F_y d_2 &= 0; \\ d_1 &= Ca \text{ (момент } F_x \text{)}; \\ d_2 &= aE \text{ (момент } F_y = m \cdot g \text{)}; \\ d_1 &= R - h; \\ d_2 &= \Delta - V \cdot t; \\ d_2^2 &= R^2 - d_1^2; \\ V_{BE} &= \sqrt{(2Rh - h^2)}; \\ F_x &= \frac{mg \sqrt{(2Rh - h^2)}}{R - h}. \end{aligned} \quad (7)$$

Далее определим мощность горизонтального силового воздействия колеса в точке E как импульс скорости подвижного состава по (8):

$$N_x = V_{BE} \cdot \frac{mg \sqrt{(2Rh - h^2)}}{R - h}. \quad (8)$$

Определим мощность вертикального силового воздействия в точке E по формуле (9):

$$N_y = V_{AB} \cdot F_T = g \cdot t \cdot m \cdot g = m \cdot g^2 \cdot t. \quad (9)$$

Дополнительно вычислим максимальную высоту падения колеса h_{\max} при полном погружении колеса в рельсовый стык (рис. 4):

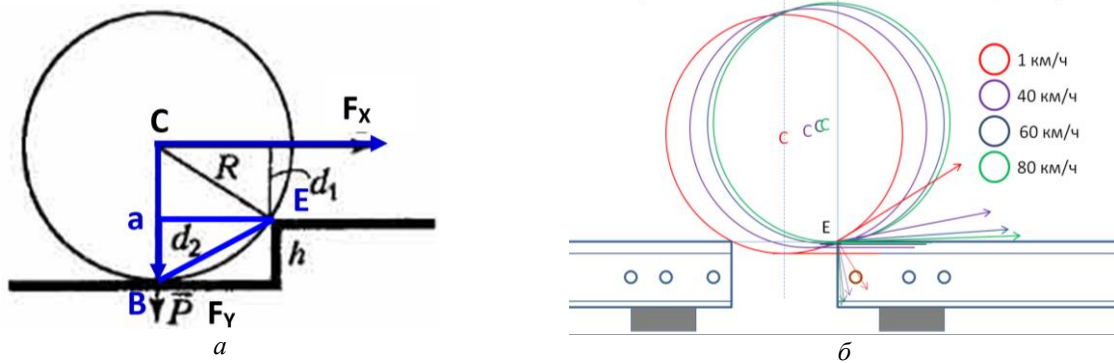


Рис. 3. Схема преодоления колесом вертикального уступа в точке E :

a – схема жесткого соударения колеса о принимающий рельс в стыке при наличии вертикального уступа; b – моделирование расчетного положения поверхности колеса в рельсовом стыке в зависимости от скорости (h – величина вертикального уступа; v – скорость центра колеса (точки C); F_x – момент силы колеса для преодоления вертикального уступа горизонтальной силой тяги; F_y – момент от вертикальной силы тяжести колеса (с учетом массы экипажа), препятствующий преодолению колесом вертикального уступа; R – радиус колеса; d_1 – плечо ($R-h$) от приложения силы тяги; d_2 – плечо (aE) от приложения силы тяжести колеса, тележки с экипажем; CE – центр тяжести импульса удара колеса о принимающий рельс, имеющий вертикальный уступ)

Fig. 3. Diagram of the wheel overcoming the vertical ledge at point E :

a – the scheme of the hard collision of the wheel on the receiving rail at the junction with a vertical ledge present; b – simulation of the calculated position of the wheel surface in the rail joint depending on the speed (h – magnitude of the vertical ledge; v – speed of the wheel center (point C); F_x – moment of wheel force to overcome the vertical ledge by horizontal traction; F_y – moment from the vertical gravity of the wheel (taking into account the mass of the crew) preventing the wheel from overcoming the vertical ledge; R – is the radius of the wheel; d_1 – shoulder ($R-h$) from the application of traction force; d_2 – shoulder (aE) from the application of gravity of the wheel, trolley with crew; CE – the centroid of the impulse of the wheel impact on the receiving rail having a vertical ledge)

$$h_{\max} = R - 0,5 * \sqrt{(4R^2 - \Delta^2)}.$$

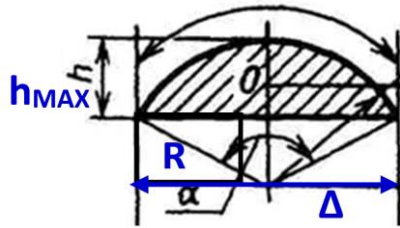


Рис. 4. Схема определения максимальной высоты опускания колеса в стыке h_{\max} (свободного падения нет)

Fig. 4. Scheme for determining the maximum height of the wheel lowering at the joint h_{\max} (with no free fall)

Для анализа вычислим высоту h_{Δ} , на которую может опуститься колесо за время полного перелета стыка (без учета качания точки E), по формуле (10):

$$h_{\Delta} = 9,81 \cdot (\Delta/V_x)^2/2. \quad (10)$$

Для расчета принимается условие, что колесо неподрессоренной конструкции, масса колеса с экипажем из учета 25 т на ось будет равна $M = 12\,500$ кг.

Расчетные параметры приведены в табл. 1. Для визуального анализа построим графики (рис. 5).

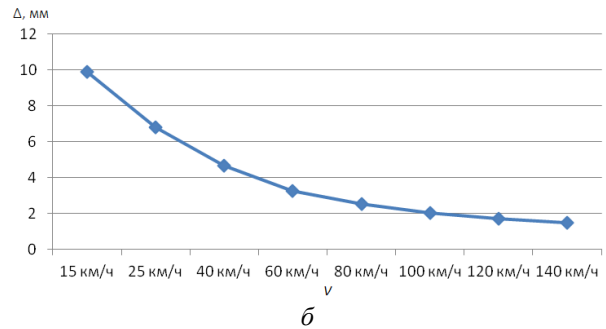
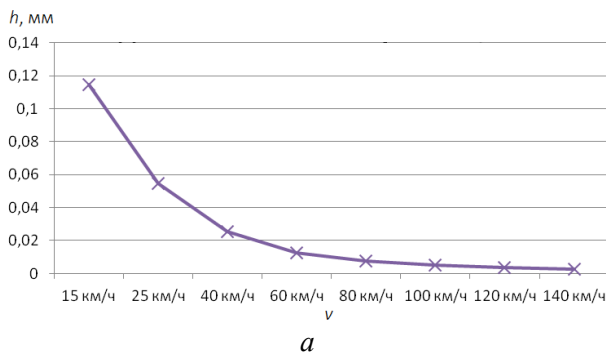


Рис. 5. Графики зависимостей рассчитываемых параметров от скорости:

a – высоты свободного падения колеса h ;

b – расстояния оси C до точки касания рельса окружностью колеса в точке E (aE)

Fig. 5. Graphs of the dependencies of the calculated parameters on the speed:

a – the height of the free fall of the wheel h ;

b – the distance of the axis C to the rail contact point E with the surface of the wheel

В результате визуального анализа можно сказать, что при скорости движения колеса 60 км/ч и более, величина свободного падения в растянутом стыке равна 30 мм и меняется незначительно, чем при скоростях 15, 25, 40 км/ч. Также это заметно и на графике расстояния касания точки E , которое от скорости становится все меньше, это свидетельствует о том, что колесо практически полностью перелетает растянутый стык 30 мм (рис. 6).

Анализ показывает, что при увеличении скорости подвижного состава происходит рост мощности горизонтального импульса колеса на принимающий рельс стыка, даже при незначительном свободном падении. При этом сила преодоления уступа от свободного падения снижается, так как уменьшается и сам уступ при возрастании скорости (рис. 7).

Таблица 1. Параметры воздействия колеса в стыке

Table 1. Wheel impact parameters at the joint

Скорость, км/ч	Δ , мм	t , сек	t_{Δ} , сек	h , мм	h_{Δ} , мм	$V_{Г}$, м/с	N_x , Дж	N_y , Дж	$F_{сдв}$, Н
15	9,866	0,0048	0,0072	0,1145	0,25	4,0544	375 201	5 812	90 042
25	6,8164	0,0033	0,0043	0,0547	0,09	6,7583	431 962	4 015	62 201
40	4,6571	0,0023	0,0027	0,0255	0,035	10,814	472 166	2 743	42 494
60	3,274	0,0016	0,0018	0,0126	0,015	16,222	497 919	1 928	29 875
80	2,524	0,0012	0,0014	0,0075	0,0089	21,63	511 881	1 487	23 034
100	2,054	0,00101	0,00108	0,00496	0,0057	27,0385	520 641	1 210	18 746
120	1,73	0,00085	0,0009	0,00353	0,0039	32,447	526 651	1 020	15 799
140	1,49	0,00073	0,00077	0,00264	0,0029	37,845	531 028	882	13 655

График зависимости мощности вертикального импульса от силы тяжести демонстрирует, что воздействие на рельс колеса снижается при увеличении скорости. Это является следствием снижения высоты свободного падения.

Дальнейшие исследования показали, что мощность от горизонтального воздействия на принимающий рельс превосходит в 75 раз мощность вертикального воздействия при скорости 15 км/ч икратно увеличивает данную

разницу от повышения скорости. Именно горизонтальное воздействие на стык является наиболее разрушительным фактором (рис. 8).

Данное явление относится к особенно опасным при наличии вертикального уступа в рельсе, принимающем удар. В частности, при скорости 60 км/ч сила при уступе в 1 мм превосходит усилие проезда стыка относительно расчетного понижения свободного падения в 9,5 раз, и стремительно возрастает при увели-

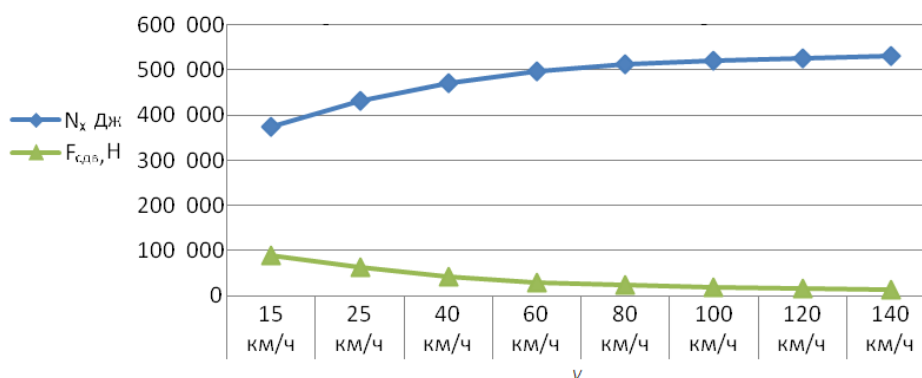


Рис. 6. Графики зависимостей сдвигающей силы и горизонтального импульса от скорости
Fig. 6. Graphs of the dependence of the shear force and horizontal momentum on velocity

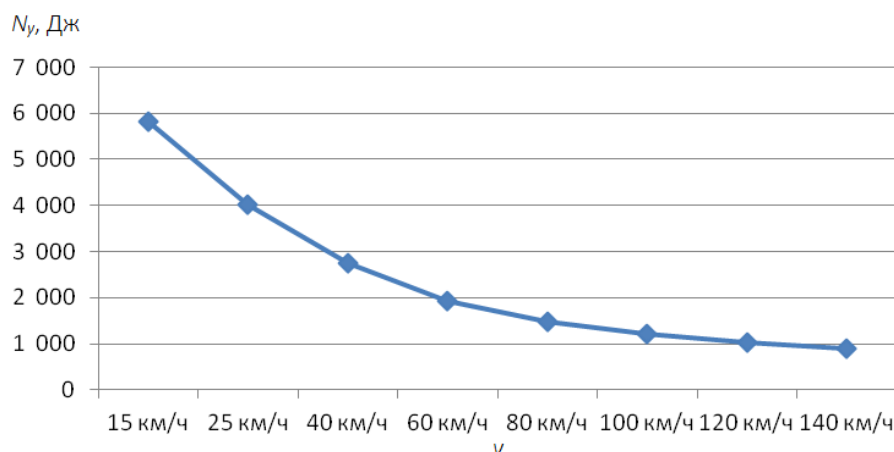


Рис. 7. График зависимости мощности вертикального импульса от скорости
Fig. 7. Graph of the dependence of the vertical pulse power on the speed



Рис. 8. Результат от горизонтального импульса в рельсовом стыке
Fig. 8. The result of the horizontal pulse in the rail joint

чений скорости подвижного состава (табл. 2). Последствия вертикального уступа приведены на рис. 9.

Основываясь на данных произведенного расчета для принятия рационального решения, важно обратить внимание на график максимального понижения колеса в стыке в зависимости от скорости (рис. 10).

Рассматривая величину h_{Δ} , на которую может погрузиться колесо за время полного перелета центра колеса «С» стыкового зазора Δ , можно предложить вариант производства шли-

фовки поверхности принимающего рельса на величину 0,2 мм с плавным переходом на поверхность катания, исключая ударную составляющую, либо создание переходной накладки, которая будет обеспечивать разницу в 0,2 мм для принимающего рельса. Рассмотрим классический пример минимального вертикального уступа пошерстного движения подвижного состава (рис. 11, 12), где на горизонтальную составляющую импульса будет влиять только сила трения и сила потери крутящего момента за время свободного падения колеса.



Рис. 9. Последствия вертикального уступа
Fig. 9. Consequences of vertical ledge

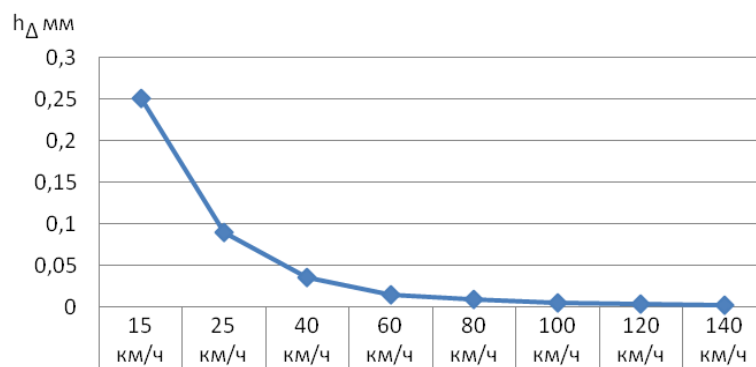


Рис. 10. График зависимости величины падения колеса при пролете стыка от скорости
Fig. 10. Graph of the dependence of the magnitude of the wheel drop during the passage of the joint on the speed



Рис. 11. Место перелета колеса
Fig. 11. The place of the wheel flight



Рис. 12. Место перелета колеса при минимальном вертикальном уступе
Fig. 12. The place of the wheel flight with a minimal vertical ledge

Визуальный анализ состояния мест перелета колеса (см. рис. 11 и 12) показывает фактическое наличие свободного полета колеса и подтверждает верное направление исследования.

Предложения по результатам исследования

В результате проведенных теоретических исследований и расчетов предлагаются следующие мероприятия:

1. Если предположить, что пружинный комплект колесной пары усиливает падение колеса h_{Δ} в 2–4 раза, то данный метод будет эффективнее, чем применяемые в настоящее время методы и инструменты исследований [16–18]. Необходимо учитывать, что подпружиненный механизм предназначен для компенсации дисбаланса груза, а также демпфирования усилия перевозимого груза на боковую раму и железнодорожный путь. Немаловажным фактором является наличие сухого трения пружинного механизма и его отдаленное расположение от осей тележки, что тоже является тормозящим фактором для сверхбыстрого опускания колеса при свободном падении. Для более точных результатов необходимы дополнительные расчеты и исследования.

2. Предлагаемый метод шлифовки поверхности принимающего рельса особенно актуален в изолирующих стыках как в конструктивно слабых местах железнодорожного пути.

Предлагается также рассмотреть использование этой технологии в местах сопряжения заднего стыка крестовины на стрелочных переводах, где системно выявляются дефекты.

Выявлено, что ограничение скорости до 40 км/ч не является эффективным действием для обеспечения безопасности перевозочного процесса и системе взаимодействия «колесо – рельс».

Для стабильного пути (при учете четырехкратного динамического воздействия от удельного веса грузового состава), не имеющего уступов и профильных просадок в зоне стыка (отрясённость шпалы), установленная скорость движения при вертикальной шлифовке принимающего рельса на величину 0,5 мм будет наиболее безопасной.

Для более эффективной эксплуатации рельсового стыка в комплексе со шлифовкой предлагается использовать смазку поверхности катания в зоне стыков, что даст возможность минимизировать горизонтальное воздействие силы трения на рельсовую колею и повысит восстановление потерь окружной скорости колеса.

3. Разработка и внедрение системы СУРС позволит регулировать скорость движения подвижного состава с учетом реального состояния рельсовой колеи.

Следовательно, предлагаемые мероприятия направлены на продление ресурсного срока эксплуатации железнодорожного пути, опережение появления дефектов, особенно для растянутых стыковых зазоров, и являются необходимыми технологическими мерами.

С целью повышения точности разработанных рекомендаций и для дальнейших исследований необходимо продолжить расчеты в предлагаемых направлениях, где следует учесть влияние подрессоренной части вагона на ускорение опускания колеса при проезде стыкового зазора и упругий прогиб верхнего строения пути.

Заключение

В соответствии с проведенным анализом и расчетами можно сказать, что просматривается прямая зависимость снижения силового воздействия на железнодорожную инфраструктуру за счет использования рациональных скоростных режимов ведения поездов, тем самым увеличивая ресурс железнодорожного пути в условиях нарастания грузопотока по дорогам Восточного полигона.

Назрела необходимость в разработке и внедрении СУРС в холдинге, тем самым появится возможность автоматически управлять параметрами скоростного режима на основе постоянных и системных расчетов, что не только положительно повлияет на пропускную способность железнодорожного транспорта, но и повысит безопасность движения с одновременным продлением ресурса эксплуатации элементов пути при улучшении системы взаимодействия «колесо – рельс».

Список литературы

1. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
2. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2023-02-01 с правом досрочного применения. М. : Рос. ин-т стандартизации, 2021. 31 с.

3. Об утверждении правил назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021 (ред. 03.02.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
4. Об утверждении методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : распоряжение ОАО «РЖД» № 2706р от 22.12.2017. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
5. Об утверждении положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.11.2019 № 2675/р (ред. 06.10.2020). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
6. Величко Д.В., Севостьянов А.А., Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 1 (48). С. 5–11.
7. Туманов Д.О., Ковенькин Д.А., Подвербный В.А. Принятие решений при эксплуатации железнодорожного пути с учетом стоимости жизненного цикла // Наукосфера. 2023. № 5-2. С. 335–343.
8. Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р (ред. 24.06.2023). Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс в локал. сети.
9. Севостьянов А.А. Планирование и организация работ по содержанию геометрии рельсовой колеи в зимний период эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 95–102.
10. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 16.11.2016 № 2288р (ред. 26.05.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
11. Правила и технология выполнения основных работ при текущем содержании пути : утв. Центральной дирекцией инфраструктуры 30.11.2018 № ЦДИ-1511. URL: <http://scbist.com/put-putevoe-hozyaistvo/52430-cpt-52-pravila-i-tehnologiya-vypolneniya-osnovnyh-rabot-pri-tekuschem-soderzhanii-puti.html> (Дата обращения 18.02.2024).
12. Гридасова Е.А., Локтев А.А., Локтев Д.А. Математическая модель динамического поведения рельса при различных условиях // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 15. № 15 (15). С. 28–32.
13. Морозов С.И. Методика решения задачи удара колеса о рельс в стыках // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1994. № 2. С. 35–41.
14. Чижов А.А. Оценка отказов элементов верхнего строения пути, влияющих на скорости движения поездов на участках К. дистанции // Молодежная наука : тр. XXVI Всерос. студен. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. Т. 1. С. 285–289.
15. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А. Анализ дефектности рельсов к дистанции пути // Интеллектуальный потенциал Сибири : 29-я регион. науч. студен. конф., посвящ. году науки и технологии в России. Новосибирск, 2021. Ч. 4. С. 142–145.
16. Пат. 2784392 Рос. Федерация. Способ контроля поверхности катания железнодорожных колес в движении / С.А. Бехер, В.С. Выплавень, А.О. Коломеец и др. № 2021139001 ; заявл. 24.12.2021 ; опубл. 24.11.2022, Бюл. № 33. 12 с.
17. Галлямов Д.И., Овчинников Д.В. Изменение параметров пятна контакта системы «колесо – рельс» в процессе совершенствования профиля рельса // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 212–217.
18. Манашкин Л.А., Мямлин С.В., Приходько В.И. Оценка силы ударного воздействия колеса и рельса на стыке двух рельсов // Вісн. Дніпропетров. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2008. № 22. С. 36–39.

References

1. Prikaz Mintransa Rossii № 250 от 23.06.2022 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].
2. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021. Railway rolling stock. Standards of permissible impact on the railway track and test methods]. Moscow: Ros-siiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 31 p.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» № 2888/р от 17.12.2021 «Ob utverzhdenii pravil naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti» (red. 03.02.2023) [Order of JSC «Russian Railways» no 2888/r dated December 17, 2021 «On approval of the rules for the appointment of railway track repairs» (ed. February 3, 2023)].
4. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» № 2706р от 22.12.2017 «Ob utverzhdenii metodiki otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti» [Order of JSC «Russian Railways» No 2706r dated December 22, 2017 «On approval of the methodology for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability»].
5. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 29.11.2019 № 2675/р «Ob utverzhdenii polozheniya ob organizatsii kompleksnogo obsluzhivaniya ob'ektov infrastruktury khozyaistva puti i sooruzhenii» (red. 06.10.2020) [Order of JSC «Russian Railways» dated November 29, 2019 no 2675/r «On approval of the regulations on the organization of comprehensive maintenance of infrastructure facilities of the track and structures» (ed. October 6, 2020)].
6. Velichko D.V., Sevost'yanov A.A., Antereikin E.S. Otsenka nadezhnosti rel'sov na uchastkakh Transsibirskoi magistrali [Evaluation of the reliability of rails on sections of the Trans-Siberian Railway]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2019, no. 1 (48), pp. 5–11.
7. Tumanov D.O., Koven'kin D.A., Podverbnyi V.A. Prinyatie reshenii pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti s uchetom stoimosti zhiznennogo tsikla [Decision-making during the operation of a railway track taking into account the cost of the life cycle]. *Naukosfera* [Science sphere], 2023, no. 5-2, pp. 335–343.
8. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii от 30.09.2018 г. № 2101-р «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i ras-shireniya magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda» (red. 24.06.2023) [Decree of the Government

of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024» (ed. June 24, 2023)].

9. Sevost'yanov A.A. Planirovanie i organizatsiya rabot po sodержaniyu geometrii rel'sovoi kolei v zimnii period ekspluatatsii [Planning and organization of works on maintenance of rail track geometry in winter period of operation]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta* [Fundamental and Applied Problems of Transport], 2022, no. 4 (7), pp. 95–102.

10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.11.2016 g. № 2288r (red. 26.05.2023) «Ob utverzhdenii i vvedenii v deistvie instruksii po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» dated November 14, 2016 No 2288r «On the approval and implementation of the instructions for the current maintenance of the railway track» (ed. May 26, 2023)].

11. Pravila i tekhnologiya vypolneniya osnovnykh rabot pri tekushchem sodержanii puti: utv. Tsentral'noi direktsiei infrastruktury 30.11.2018 № TsDI-1511 [Rules and technology for performing basic work with the current content of the track: approved by the Central Directorate of Infrastructure no TsDI-1511 dated November 30, 2018].

12. Gridasova E.A., Loktev A.A., Loktev D.A. Matematicheskaya model' dinamicheskogo povedeniya rel'sa pri razlichnykh usloviyakh [Mathematical model of dynamic behavior of a rail under various conditions]. *Vnedrenie sovremennykh konstruksii i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo* [Introduction of modern structures and advanced technologies in track management], 2019, vol. 15, no. 15 (15), pp. 28–32.

13. Morozov S.I. Metodika resheniya zadachi udara koleasa o rel's v stykakh [Methodology for solving the problem of a wheel hitting a rail at the joints]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal* [Bulletins of higher educational organizations. Forest Magazine], 1994, no. 2, pp. 35–41.

14. Chizhov A.A. Otsenka otkazov elementov verkhnego stroeniya puti, vliyayushchikh na skorosti dvizheniya poezdov na uchastkakh K. distantsii [Evaluation of failures of elements of the upper structure of the track affecting the speed of trains on sections of the railway distance K]. *Trudy XXVI Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodezhnaya nauka»* [Proceedings of the XXVI All-Russian Student Scientific and Practical Conference «Youth Science»]. Krasnoyarsk, 2022, vol. 1, pp. 285–289.

15. Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Analiz defektnosti rel'sov k distantsii puti [Analysis of rail defects to track distance]. *29-ya regional'naya nauchnaya studencheskaya konferentsiya, posvyashchennaya godu nauki i tekhnologii v Rossii «Intel'ktual'nyi potentsial Sibiri»* [The 29th Regional Scientific Student Conference dedicated to the Year of Science and Technology in Russia «Intellectual potential of Siberia»]. Novosibirsk, 2021, part 4, pp. 142–145.

16. Becher S.A., Vyplaven V.S., Kolomeets A.O., Kochetkov A.S., Popkov A.A. Patent RU 2784392 C1, 24. 11.2022.

17. Gallamov D.I., Ovchinnikov D.V. Izmenenie parametrov pyatna kontakta sistemy «koleso – rel's» v protsesse sovershenstvovaniya profilya rel'sa [Changing the parameters of the contact patch of the «wheel – rail» system in the process of improving the rail profile]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and Education for Transport], 2021, no. 2, pp. 212–217.

18. Manashkin L.A., Myamlin S.V., Prikhod'ko V.I. Otsenka sily udarnogo vozdeistviya koleasa i rel'sa na styke dvukh rel'sov [Assessment of the impact force of a wheel and rail at the junction of two rails]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, no. 22, pp. 36–39.

Информация об авторах

Осколков Андрей Александрович, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения; начальник сектора информатизации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Асальханова Татьяна Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Information about the authors

Andrei A. Oskolkov, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University; Head of the Informatization Sector, the East Siberian Infrastructure Directorate – Structural Subdivision of the Central Directorate of Infrastructure – Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Tat'yana N. Asalkhanova, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.