

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.033:625.143.482

EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>

Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург

А. В. Романов, А. А. Киселев✉

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка проекта первой в нашей стране высокоскоростной железнодорожной магистрали со скоростями движения поездов до 400 км/ч сопряжена с острой проблемой недостаточности нормативно-технической базы, регламентирующей методики расчета конструкции железнодорожного пути, в том числе на устойчивость от воздействия экстремальной температуры и прочность при совместном действии экстремальной температуры и подвижного состава. Целью настоящей статьи является разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на безбалластной конструкции верхнего строения пути по условию прочности и устойчивости, а также оценка рисков температурного выброса и потери прочности рельсовой плети бесстыкового пути.

Материалы и методы. Для расчета бесстыкового пути на устойчивость использовался метод, который предусматривает учет начальной ненапряженной неровности рельсовых плетей самой неблагоприятной формы. Для расчета бесстыкового пути на прочность использовался метод конечных элементов.

Результаты. Расчеты показали, что допускаемое повышение температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию устойчивости можно принять равным 111 °С. Допускаемое понижение температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию прочности составляет 98 °С, что сравнимо с традиционной конструкцией пути на балласте.

Обсуждение и заключение. Предусмотренная проектной документацией безбалластная конструкция верхнего строения пути имеет большой запас устойчивости, по сравнению с традиционной конструкцией на балласте. Технические решения безбалластной конструкции верхнего строения пути на бесстрелочных участках, расположенных на земляном полотне, практически исключают риски нарушения механической безопасности как по условию прочности, так и по условию устойчивости. В рамках опытной подконтрольной эксплуатации безбалластной конструкции на перегоне Саблино – Тосно и участке Алабушево – Новая Тверь рассчитанная аналитическим методом величина повышения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию устойчивости и рассчитанная методом конечно-элементного моделирования величина понижения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию прочности должны быть подтверждены экспериментально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный бесстыковой путь, безбалластная конструкция верхнего строения пути, высокоскоростная железнодорожная магистраль, прочность, устойчивость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Романов А. В., Киселев А. А. Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 262–272. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 625.033:625.143.482
EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line

Andrei V. Romanov, Artyom A. Kiselev✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of high-speed main line with the speed up to 400 km/h is strictly connected with the major problem of insufficient normative technical documentation which regulates methodology of railway design calculation, including stability from extreme temperature and strength under its combined action with rolling stock. The aim of the article is to develop methodology for assessing the stress-strain state of a continuous welded rail track on a ballastless track based on strength and stability, as well as to assess temperature release risks and loss of rail string strength.

Materials and methods. In order to calculate continuous welded rail track for stability the authors employed method which involves accounting for rail string initial unstressed unevenness of the most unfavorable shape. Finite element method was used to estimate continuous welded rail track strength.

Results. The calculations show that the permissible temperature increase of rail string in comparison with fixing temperature under the terms of stability may be equivalent to 111 °C, and permissible temperature decrease of the rail string is 98 °C, which is comparable to the traditional track design on a ballast.

Discussion and conclusion. Ballastless design of the superstructure, required by documentation, has greater stability capacity in comparison with traditional design on a ballast. Technical solutions of ballastless track design of superstructure on pointless sections placed on roadbed nearly eliminate risks of mechanical safety violation both in terms of strength and stability. As a part of experimental operation of high-speed railway line on Sablino – Tosno space interval and Alabushevo – Novaya Tver section, analytically calculated temperature increase value of rail string in terms of fixing temperature under the terms of stability and temperature decrease value of rail string in comparison with the fixing temperature under the terms of strength using finite element modelling should be proven experimentally.

KEYWORDS: continuous welded rail track, ballastless design of track superstructure, high-speed main line, strength, stability

FOR CITATION: Romanov A.V., Kiselev A.A. Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):262–272. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>.

Введение. В настоящее время продолжается реализация проекта первой высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (далее — ВСЖМ-1) со скоростями движения поездов до 400 км/ч. В соответствии с положениями статьи 16 Федерального закона № 384-ФЗ¹ при разработке проектной документации требования механической безопасности железнодорожного пути должны быть подтверждены различными способами, в том числе расчетами, испытаниями, моделированием сценариев возникновения опасных природных явлений и/или техногенных воздействий.

Применительно к безбалластной конструкции бесстыкового железнодорожного пути ВСЖМ-1 следует рассмотреть две ситуации:

1. Нарушение прочности рельсовой плети (излом) вследствие одновременного воздействия экстремально низких температур и максимального воздействия железнодорожного подвижного состава.

2. Потеря устойчивости формы и положения, реализующаяся в виде температурного выброса пути из-за воздействия экстремально высоких температур воздуха совместно с нагревом солнцем.

Расчетам железнодорожного пути на прочность посвящено множество работ. Для традиционной балластной конструкции верхнего строения пути существуют как сложные методы, основанные на решении дифференциальных уравнений колебаний рельса — однослойной балки на модифицированном (имеющем присоединенную массу и демпфирование) упругом основании [1], так и более простые практические методы расчета². Расчеты безбалластной конструкции верхнего строения пути (далее — БВСП) на прочность подробно изложены в работе³. Методика расчета основана на решении дифференциальных уравнений колебаний многослойной балки, лежащей на модифицированном упругом основании.

Большинство исследований устойчивости бесстыкового пути основано на энергетическом методе [2]. Также большое количество исследований устойчивости опирается на метод решения дифференциальных уравнений равновесия со множеством допущений [3, 4]. В работе [5] применены интегральные уравнения для определения критической продольной силы в плетях бесстыкового пути. Все методы основаны на задании возможной формы искривления рельсовой колеи и определении критической температурной продольной силы, при достижении которой путь теряет устойчи-

вость. Под руководством Е. М. Бромберга испытательная лаборатория ЦНИИ (ныне — АО «ВНИИЖТ») [6] провела объемные экспериментальные работы по исследованию устойчивости бесстыкового пути против выброса.

В работе [7] рассмотрена вероятность выброса бесстыкового пути, основанная на анализе надежности конструкции бесстыкового пути в целом. Были выделены основные параметры, влияющие на устойчивость, и предложена стратегия мониторинга и текущего содержания бесстыкового пути [8, 9].

Действующая Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути⁴, основанная на вышеприведенных методических разработках ученых ЦНИИ, МИИТ, ЛИИЖТ (АО «ВНИИЖТ», РУТ (МИИТ), ПГУПС соответственно) и апробированная в ходе многочисленных экспериментов, распространяется только на традиционную балластную конструкцию верхнего строения пути.

В зарубежной практике широкое распространение для исследования устойчивости и прочности железнодорожного пути получил метод конечных элементов [10, 11]. Данный метод позволяет рассматривать сложные процессы, такие как взаимодействие рельсовых плетей бесстыкового пути с пролетными строениями мостов, нелинейную работу балластного слоя, а также работу плетей бесстыкового пути на БВСП.

Стоит отметить, что ни одна из отечественных методических разработок в настоящее время не удовлетворяет требованиям расчета бесстыкового пути на БВСП по условию прочности и устойчивости. Целью работы является предложение такой методики с расчетом напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на БВСП в условиях ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург и оценкой рисков температурного выброса и излома плети.

Материалы и методы. Описание принятой конструкции безбалластного верхнего строения пути ВСЖМ-1. В общем случае, БВСП состоит из рельсовых плетей типа Р65 специального назначения для высокоскоростного движения, упругих промежуточных рельсовых скреплений, подрельсовой опоры (рис. 1), сборной рельсовой плиты из предварительно напряженного железобетона заводского изготовления, промежуточного упругого слоя, слоя самоуплотняющегося бетона (далее — СУБ), железобетонной плиты фундамента. Конструкция БВСП может укладываться на основную площадку земляного полотна с верхним защитным

¹ Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». «Российская газета» от 31 декабря 2009 г. Ст. 16.

² Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. расп. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. Доступ из АСПИЖТ (дата обращения: 09.09.2025).

³ Савин А. В. Условия применения безбалластного пути: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 444 с.

⁴ Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. расп. ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544/р.

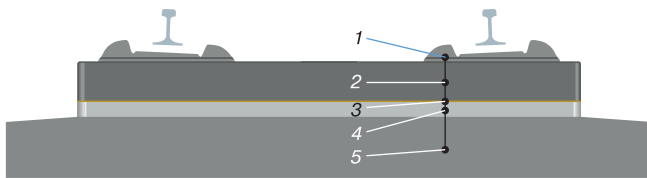


Рис. 1. Принципиальная схема безбалластного верхнего строения пути*:

1 — подрельсовая опора; 2 — рельсовая плита; 3 — упругий слой; 4 — слой самоуплотняющегося бетона; 5 — фундаментная плита

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Ballastless track superstructure schematic diagram*:

1 — underrail footing; 2 — rail plate; 3 — elastic layer; 4 — layer of self-consolidating concrete; 5 — base plate

* Source: authors' data

слоем из асфальтобетона, имеющего фрезеровку поверхности для лучшего сцепления с плитой фундамента. На пролетных строениях искусственных сооружений предусматривается устройство арматурных выпусков.

С точки зрения прочности и устойчивости бесстыкового пути элементы БВСП имеют следующие характеристики, согласно специальным техническим условиям (далее — СТУ)⁵:

- рельсы типа Р65 категории ДТ350ВС400 с пределом текучести, равным 800 МПа;
- упругие рельсовые скрепления с усилием прижатия рельсов клеммами к опорам не менее 20 кН, сопротивлением перемещению рельсов в продольном направлении не менее 14 кН в одном узле промежуточного скрепления, вертикальной жесткостью узла скрепления 50 кН/мм, поперечной жесткостью скрепления 30 кН/мм;
- рельсовые плиты с эпюрой подрельсовых опор не менее 1820 шт./км.

Масса одного погонного метра безбалластной конструкции верхнего строения пути ВСЖМ-1 составляет 4,279 т, что в 1,14 раза тяжелее балластной конструкции. Конструкция БВСП имеет более жесткие связи (рельсовой плиты и фундаментной плиты через слой СУБ, фундаментной плиты и пролетного строения), чем в традиционной балластной конструкции. Таким образом, конструкция БВСП создает значительно большее сопротивление поперечным смещениям рельсовых плетей по сравнению с традиционной балластной конструкцией.

Расчет бесстыкового пути на устойчивость. Имеющиеся в нормативных документах величины допускаемых повышений температуры по условию устойчивости и соответствующие им критические температурные силы установлены на основе экспериментальных

данных АО «ВНИИЖТ» для конструкции бесстыкового пути на балласте. Подобные подтвержденные опытом значения критических температурных сил и величин допускаемого повышения температуры рельсовой плиты, по сравнению с температурой закрепления по условию устойчивости для бесстыкового пути, уложенного на БВСП в настоящее время, к сожалению, отсутствуют. Таким образом, весьма остро стоит вопрос о количественной оценке устойчивости бесстыкового пути на БВСП.

Существуют способы аналитической оценки критической температурной силы, однако, как было заявлено выше, они также были разработаны для конструкции бесстыкового пути на балласте. За основу расчета бесстыкового пути на БВСП авторами предлагается использовать методику, предложенную А.Я. Коганом в работе [12].

Возможность применения данной методики, по мнению авторов статьи, основана на гипотезе о том, что монолитная конструкция БВСП не имеет возможности перемещения в поперечном направлении, а поперечные деформации рельсов происходят исключительно за счет промежуточных рельсовых скреплений, которые можно описать функцией:

$$f_1(y) = B \arctg \frac{y}{b}, \quad (1)$$

где y — поперечная деформация рельса, мм;

B и b — коэффициенты, определяемые по результатам аппроксимации экспериментальных зависимостей сопротивления пути поперечному сдвигу от величины этого сдвига.

Ввиду отсутствия экспериментальных зависимостей сопротивления пути поперечному сдвигу от величины этого сдвига для БВСП, определим параметры B и b в представленном выше выражении, исходя из следующих соображений.

Согласно СТУ⁶, поперечная жесткость промежуточного рельсового скрепления принята равной 30 кН/мм, удерживающая способность узла рельсового скрепления в горизонтальной плоскости — 50 кН, а максимальное поперечное перемещение рельса — 3 мм. Исходя из этих исходных положений выдвинута следующая гипотеза. На начальном участке сопротивление рельсовой плиты поперечным деформациям возрастает линейно, в соответствии с удерживающей способностью узла промежуточного рельсового скрепления, т.е. 30 кН/мм. При достижении предельного значения сопротивления $Q_{\max} = 50$ кН дальнейший рост прекращается и сопротивление становится постоянным. Эти условия обозначены синей линией на графике,

⁵ Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). Изменение 1. ФГБОУ ВО ПГУПС. 2023. 278 с.

⁶ Там же.

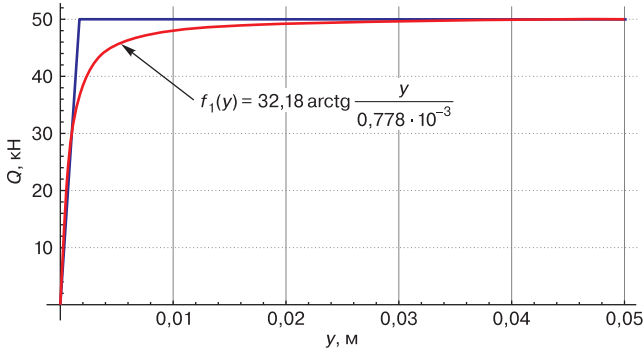


Рис. 2. Зависимость сопротивления рельсовой плети поперечным деформациям Q от величины деформации y^*
* Источник: данные авторов

Fig. 2. Dependence of the rail string resistance to lateral deformations Q on the deformation magnitude y^*
* Source: authors' data

приведенном на рис. 2. Красной линией представлена подобранная к этим условиям функция арктангенса с параметрами $B = 32,18$ кН/м, $b = 0,778 \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, исходную и аппроксимированную функцией арктангенса зависимости можно выразить следующими выражениями:

- исходная:

$$Q = \begin{cases} 30 \cdot 10^3 y, & \text{если } y \in \left[0, \frac{5}{3} \cdot 10^{-3}\right], \\ 50, & \text{если } y > \frac{5}{3} \cdot 10^{-3}; \end{cases} \quad (2)$$

- аппроксимированная функцией арктангенса:

$$Q_2 = 32,18 \arctg \frac{y}{0,778 \cdot 10^{-3}}. \quad (3)$$

Для количественной оценки соответствия двух функций используем следующие метрики⁷:

- среднеквадратическая ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_1(y_i) - Q_2(y_i)]^2 = 1,644 \text{ кН}, \quad (4)$$

где N — количество точек для расчета среднеквадратической ошибки;

y_i — поперечная деформация рельса, принадлежащая множеству (2) мм;

- средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_1(y_i) - Q_2(y_i)| = 0,560 \text{ кН}; \quad (5)$$

- максимальная абсолютная ошибка (MaxError):

$$\text{MaxError} = \max_{1 \leq i \leq N} |Q_1(y_i) - Q_2(y_i)| = 12,587 \text{ кН}; \quad (6)$$

- интегральная ошибка:

$$\varepsilon_{\text{int}} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} |Q_1(y) - Q_2(y)| dy = 0,112 \text{ кН} \cdot \text{мм}. \quad (7)$$

Значения метрик вычислены для диапазона значений $y \in [0; 0,2]$ м с шагом дискретизации $\Delta y = 2 \cdot 10^{-4}$ м.

Из всех значений метрик максимальная абсолютная ошибка, характеризующая максимальное расхождение между функциями, имеет величину 12,587 кН в зоне сопряжения линейного нарастания и установившегося сопротивления поперечному сдвигу. По мнению авторов, такое несоответствие в указанной зоне следует признать допустимым ввиду невозможности иначе описать зависимость функцией арктангенса.

Также при расчете вводятся следующие предположения и допущения:

1. Расчет ведется на две рельсовые нити, в которых действуют равные и постоянные температурные продольные силы $N = \text{const}$.
2. Неровности обеих рельсовых нитей имеют одинаковый радиус кривизны.
3. Расчет ведется в квазистатической постановке задачи. Демпфирование и другие параметры вязкости не учитываются.

Критические параметры бесстыкового пути связаны следующей системой трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} B^* = B - \frac{2N_k}{\pi R}; \\ b^* = b \left(1 - \frac{2N_k}{\pi BR}\right) \sec^2\left(\frac{N_k}{BR}\right); \\ N_k = 2 \sqrt{\frac{2b^* B^* EI_z^0 \sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*}{C^2 \sqrt{b^{*2} + C^2}}}; \\ \omega = \sqrt[4]{\frac{2b^* B^* (\sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*)}{C^2 EI_z^0 \sqrt{b^{*2} + C^2}}}; \\ C_6 = \frac{2B^* (\sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*) + C^2 EI_z^0 \omega^4 + C^2 r \omega^2}{CN_k \omega^2}, \end{cases} \quad (8)$$

где N_k — критическая температурная продольная сила, кН;

R — радиус кривой, м;

E — модуль упругости рельсовой стали, $E = 2,1 \times 10^5$ МПа;

I_z^0 — момент инерции рельса относительно главной оси, $I_z^0 = 0,564 \cdot 10^{-5}$ м⁴;

C — амплитуда напряженной неровности, м;

⁷ Оценка качества в задачах классификации и регрессии // Вики-портал «ALGOWIKI» ИТМО. URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка_качества_в_задачах_классификации_и_регрессии&mobileaction=toggle_view_desktop (дата обращения: 16.09.2025).

C_6 — амплитуда бытовой ненапряженной неровности, м;

ω — частота ненапряженной неровности, м^{-1} ;

r — тангенс угла наклона первой производной кривой $f_1(y)$, $r = 711 \text{ кН}$.

Длина волны неблагоприятной неровности l , м, соответствующая частоте ω , определяется по формуле

$$l = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (9)$$

Допускаемое повышение температуры рельсовой плети по условию устойчивости $[\Delta t_y]$, $^{\circ}\text{C}$, определяется по формуле

$$[\Delta t_y] = \frac{[N_k]}{2\alpha EF}, \quad (10)$$

где α — коэффициент линейного расширения рельсовой стали, $\alpha = 0,0000118 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

F — площадь поперечного сечения рельса, $F = 0,82 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Допускаемая критическая температурная продольная сила $[N_k]$ принимается с коэффициентом безопасности, равным 1,5. Результаты многовариантных расчетов при различных значениях радиусов кривых

и амплитуды напряженной неровности приведены в таблице.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать следующий вывод. В связи с тем, что на ВСЖМ-1 применяются пологие кривые, радиус не оказывает существенного влияния на величину критической температурной силы. В большей степени критическая температурная сила зависит от величины начальной неровности. Дальнейшие расчеты выполнены для железнодорожного пути в кривом участке радиусом $R = 10\,000 \text{ м}$. Зависимость критической продольной температурной силы, длины волны неблагоприятной неровности и допускаемого повышения температуры по условию устойчивости от величины амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути представлена на рис. 3.

Выполним оценку величины критической температурной силы и соответствующего ей допускаемого повышения температуры рельса по условию устойчивости для условий эксплуатации ВСЖМ-1.

На основании результатов расчетов, представленных на рис. 3, амплитуде бытовой ненапряженной неровности поставлена в соответствие длина волны неблагоприятной неровности согласно схеме (рис. 4).

Таблица

Результаты расчета критической температурной продольной силы, длины волны неблагоприятной неровности и амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути*

Table

Calculation results for critical longitudinal thermal force, wavelength of the unfavorable irregularity, amplitude of the initial unstressed irregularity on the track*

Амплитуда напряженной неровности C , мм	Радиус кривой R , м	Критическая температурная продольная сила N_k , кН	Длина волны неблагоприятной неровности l , м	Амплитуда бытовой ненапряженной неровности C_6 , мм
2,0	1 000	6785	4,10	3,51
	5 000	7449	3,94	3,28
	10 000	7555	3,92	3,24
	15 000	7592	3,92	3,23
3,0	1 000	4691	4,77	7,42
	5 000	5017	4,63	7,04
	10 000	5066	4,61	6,98
	15 000	5083	4,60	6,96
4,0	1 000	3589	5,36	12,71
	5 000	3783	5,23	12,17
	10 000	3811	5,22	12,09
	15 000	3820	5,21	12,06
5,0	1 000	2908	5,90	19,39
	5 000	3036	5,78	18,68
	10 000	3054	5,76	18,58
	15 000	3060	5,76	18,55

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

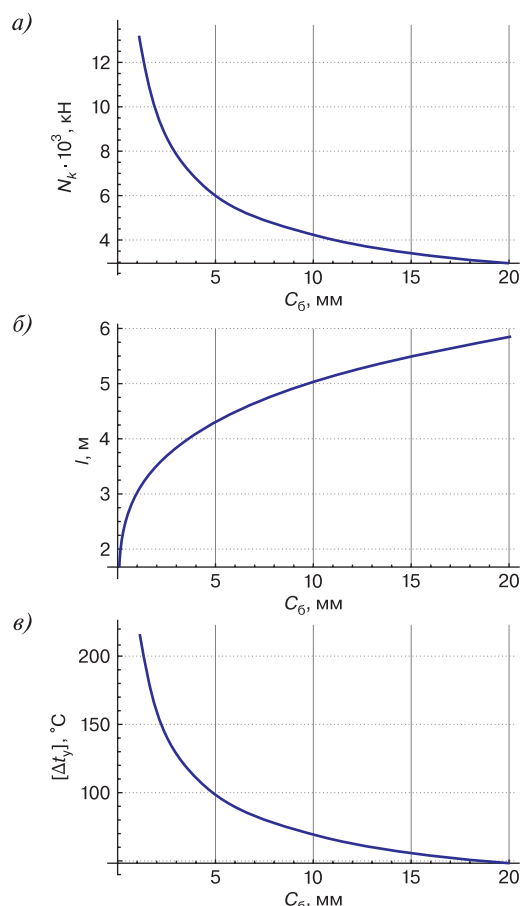


Рис. 3. Зависимость критической продольной температурной силы (а), длины волны неблагоприятной неровности (б), допускаемого повышения температуры по условию устойчивости (в) от величины амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути в кривом участке пути радиусом $R = 10\,000$ м*
* Источник: данные авторов

Fig. 3. Dependence of critical longitudinal thermal force (a), wavelength of the unfavorable irregularity (б), permissible temperature rise based on stability conditions (в) on the amplitude of the initial unstressed irregularity on a curved track section with radius $R = 10\,000$ м*
* Source: authors' data

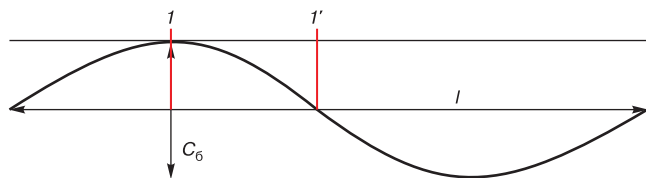


Рис. 4. Длина волны неблагоприятной неровности*: $I-I'$ — участок длины волны; l — длина волны; C_6 — амплитуда волны
* Источник: данные авторов

Fig. 4. Wavelength of the unfavorable irregularity*: $I-I'$ — wavelength section; l — wavelength; C_6 — wave amplitude
* Source: authors' data

В соответствии с представленной схемой на участке $I-I'$, длина которого $l/4$, а амплитуда $C_6/2$, средний уклон горизонтальной неровности i , ‰, определим по формуле

$$i = \frac{C_6/2}{l/4}. \quad (11)$$

В настоящее время нормы содержания рельсовой колеи в процессе эксплуатации отсутствуют. Согласно СТУ⁸ допускаемое отклонение в плане на длине хорды 30 м составляет 2 мм для точек, находящихся на расстоянии 5 м. Таким образом, в рамках расчета примем максимальный уклон горизонтальной неровности на пути равным 2 ‰. Критическая длина волны, рассчитанная по формуле (9) для данного отклонения, составляет 4,09 м. Этот уклон соответствует бытовой неровности C_6 , равной 4 мм. В соответствии с результатами расчетов, приведенных на рис. 3, данной неровности соответствует критическая температурная сила N_k величиной 6771 кН и допускаемое повышение температуры по условию устойчивости $[\Delta t_y]$ 111 °C.

Из этого следует, что расчеты бесстыкового пути на БВСП подтверждают гипотезу о весьма значительном запасе его устойчивости, которая должна быть также проверена в результате натурных испытаний.

Расчет бесстыкового пути на прочность. Апробированные методики расчета бесстыкового пути на БВСП с определением допускаемого понижения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления также отсутствуют. В связи с этим расчет бесстыкового пути на прочность выполнен методом конечных элементов.

В расчетную схему вводятся следующие предпосылки и допущения:

1. Выполняется статический расчет, в котором от расчетного колеса на рельс принимается максимальная динамическая вертикальная сила, равная 160 кН (согласно СТУ⁹), а от соседнего колеса — 88,26 кН.
2. Напряжения в рельсах определяются только от действия изгибающего момента.
3. Характеристики БВСП (модуль упругости, жесткости промежуточных рельсовых скреплений, коэффициент постели упругого основания и др.) принимаются детерминированными.
4. Расчет прочности выполнен с учетом действия только вертикальной силы, приложенной к поверхности катания по оси симметрии рельса. Эксцентриситет приложения нагрузки, подуклонка и горизонтальные поперечные силы учитываются коэффициентом f .
5. Рельсы Р65 представлены одномерным конечным элементом типа «стержень», работающим на изгиб

⁸ Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). Изменение 1.

⁹ Там же.

относительно вертикальной и горизонтальной поперечной оси и с кручением относительно горизонтальной продольной оси.

6. Подрельсовое основание (БВСП) представлено плоскими конечными элементами типа «оболочка», имеющими четыре узла. Между смежными узлами рельсовой плиты и СУБ, СУБ и фундаментной плитой заданы двухузловые упругие связи с вертикальной жесткостью $S_z = 422,43$ МН/м, вычисленной по результатам расчетов трехмерной конструкции БВСП. Горизонтальная жесткость связей между узлами рельсовой плиты и СУБ, СУБ и фундаментной плитой задана $S_x = S_y = 0,75$ МН/м.

7. Двухузловые связи между рельсом и рельсовой плитой заданы со следующими жесткостями: вертикальная — 50 МН/м, горизонтальная вдоль плиты — 0,0258 МН/м, горизонтальная поперек плиты — 35 МН/м. Данные связи моделируют реальную жесткость рельсового скрепления.

8. Узлы фундаментной плиты лежат на упругом основании с заданным коэффициентом постели $C_z = 6,84$ кгс/см³, горизонтальная жесткость связей упругого основания принята равной $S_x = S_y = 0,75$ МН/м.

Расчетная схема, приведенная на рис. 5, представляет собой 3 секции БВСП длиной 16,27 м с расстоянием 20 мм между смежными секциями.

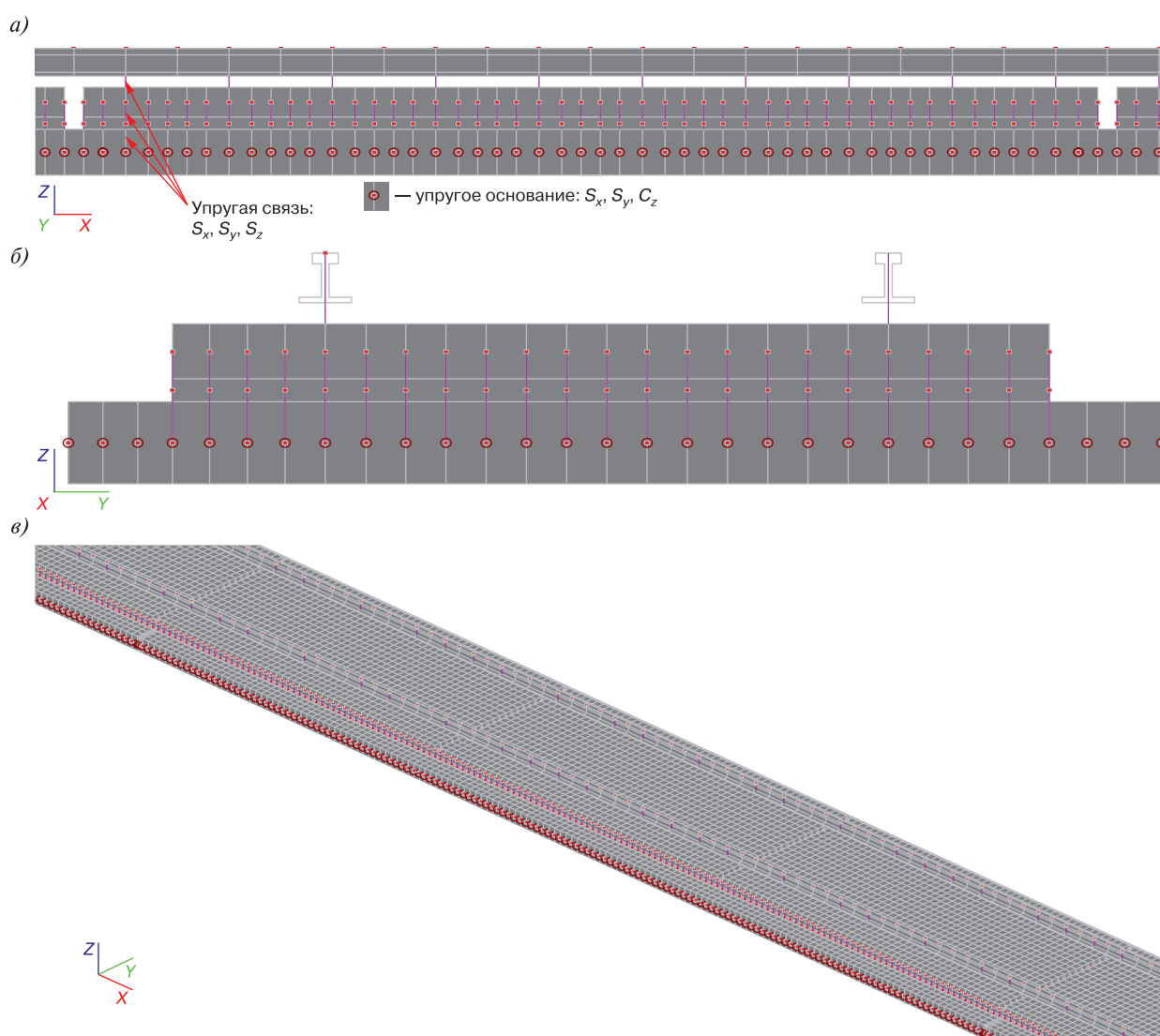


Рис. 5. Расчетная схема для определения напряжений в рельсовых плетях*:
 а — продольное сечение; б — поперечное сечение; в — фрагмент конструкции БВСП длиной 16,27 м
 * Источник: данные авторов

Fig. 5. Calculation model for determining stresses in rail strings*:
 а — longitudinal section; б — cross-section; в — 16.27 m fragment of ballastless track superstructure
 * Source: authors' data

На рис. 6, а представлена форма рельсов, деформированная от воздействия сочетания нагрузок, при котором от расчетного колеса на рельс принимается максимальная динамическая вертикальная сила, равная 160 кН, а от соседнего колеса — 88,26 кН. Полученная форма совпадает с деформированной формой рельсов при расчете традиционной конструкции пути на балласте на прочность. Результаты расчета изгибающих моментов в рельсах приведены на рис. 6, б. Максимальное значение изгибающего момента в рельсах под расчетным колесом составило 3,35 тм, или 32,83 кНм.

Осевые напряжения изгиба и кручения в подошве рельса σ_o , МПа, определяются по формуле¹⁰:

$$\sigma_o = \frac{M}{W}, \quad (12)$$

где M — изгибающий момент в рельсах, кНм;

W — момент сопротивления рельса относительно наибольшего удаленного волокна от подошвы, принят равным $0,000435 \text{ м}^3$.

Напряжения в кромках подошвы рельса определяются путем умножения на коэффициент перехода от осевых напряжений к кромочным, f :

$$\sigma_{\text{кп}} = \sigma_o f. \quad (13)$$

Коэффициент f , согласно методике¹¹, для прямых участков составляет 1,25 для электровоза ЭП20, а для электропоезда ЭС2Г — 1,22. Допускаемые динамические напряжения растяжения в кромках подошвы рельсов в прямых и кривых участках, согласно ГОСТ 34759–2021¹², составляют 240 МПа. Ввиду отсутствия коэффициента f для высокоскоростных поездов, с целью обеспечения большего запаса прочности в расчетах коэффициент f принят равным 1,6.

Допускаемое понижение температуры рельсовых плетей $[\Delta t_p]$, °С, определяют расчетом прочности рельсов, основанным на условии, что сумма растягивающих напряжений, возникающих от воздействия подвижного состава и изменений температуры, не должна превышать допускаемое напряжение материала рельсов согласно [10]:

$$[\Delta t_p] = \frac{[\sigma] - k_{\text{п}} \sigma_{\text{кп}}}{\alpha E}, \quad (14)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение в рельсах от совместного действия подвижного состава и температурной силы (для термоупрочненных рельсов $[\sigma] = 400 \text{ МПа}$);

$k_{\text{п}}$ — коэффициент запаса прочности, принятый в расчетах равным 1,3.

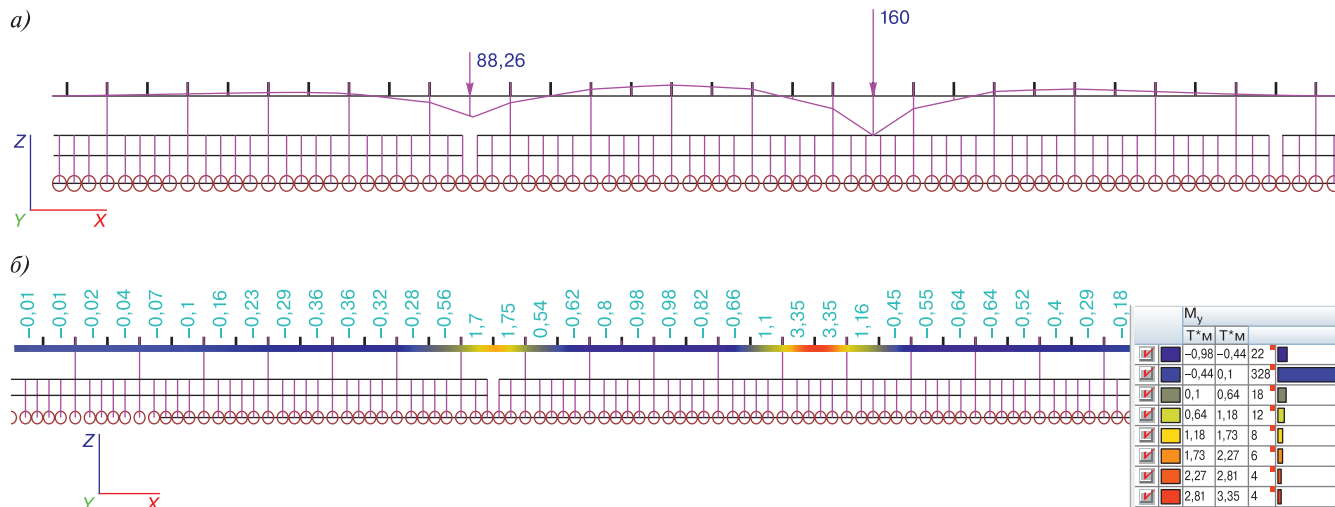


Рис. 6. Изгибающие моменты в рельсах*:
а — деформированная форма; б — результаты расчета изгибающих моментов в рельсах
* Источник: данные авторов

Fig. 6. Bending moments in rails*:
а — deformed shape; б — calculation results of rail bending moments
* Source: authors' data

¹⁰ Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. расп. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р.

¹¹ Там же.

¹² ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2021 г. № 1068-ст. М.: Российский институт стандартизации. 2021. С. 4.

Результаты. По приведенным выше формулам, напряжения изгиба и кручения в кромках подошвы рельса составляют 120,75 МПа, а допускаемое понижение температуры рельсовых плетей по условию прочности относительно температуры закрепления составляет 98 °С.

Расчетная максимальная и минимальная температуры рельсов приняты, например, для станции Тверь, согласно методике¹³, и составляют +66 °С и –50 °С соответственно.

Таким образом, условия укладки бесстыкового пути на БВСП следующие:

- расчетный интервал температуры закрепления рельсовых плетей составляет 93 °С;
- минимальная температура закрепления рельсовых плетей составляет –45 °С;
- максимальная температура закрепления рельсовых плетей составляет +48 °С.

Обсуждение и заключение. Предусмотренная проектной документацией конструкция БВСП имеет большой запас устойчивости по сравнению с традиционной конструкцией на балласте. Расчеты показали, что допускаемое повышение температуры по условию устойчивости $[\Delta t_y]$, рассчитанное по методике А. Я. Когана, можно принять равным 111 °С. Следовательно, риски нарушения устойчивости бесстыкового пути БВСП в природно-климатических условиях трассы Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1) практически отсутствуют. Однако выдвинутая авторами гипотеза о функции сопротивления рельсовой плети поперечным деформациям должна быть проверена и подтверждена экспериментально.

Выполненные расчеты бесстыкового пути по условию прочности с учетом требуемого нормативными документами неблагоприятного сочетания нагрузок показали, что допускаемое понижение температуры $[\Delta t_p]$ составляет 98 °С, что сравнимо с традиционной конструкцией пути на балласте.

Таким образом, технические решения конструкции БВСП на бесстрелочных участках, расположенных на земляном полотне, практически исключают риски нарушения механической безопасности как по условию прочности, так и по условию устойчивости.

За счет большей устойчивости бесстыкового пути на БВСП оптимальный интервал температуры закрепления возможно сместить в более низкий диапазон. Однако это может повлечь за собой сложности с техническим обслуживанием бесстыкового пути, связанные с увеличением разницы температуры закрепления и фактической температуры рельсовой плети. Рассчитанная аналитическим методом величина $[\Delta t_y]$ и путем моделирования величина $[\Delta t_p]$ должны быть

подтверждены натурными испытаниями в рамках опытной подконтрольной эксплуатации безбалластной конструкции на перегоне Саблино – Тосно и участке Алабушево – Новая Тверь.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют в финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Сер. «Труды АО «ВНИИЖТ»». М.: КУНА, 2023. 280 с. EDN: <https://elibrary.ru/mdkaov>.
2. Коган А. Я. *Railway track dynamics and its interaction with rolling stock*. Proceedings of JSC VNIIZHT Series. Moscow: KUNA, 2023. 280 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mdkaov>.
3. Першин С. П. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути // Труды МИИТ. Вып. 147: Путь и путевое хозяйство. М., 1962. С. 28–97.
4. Pershin S. P. Methods for calculating the stability of continuous welded rail (CWR) track. *Proceedings of MIIT. Railway Track and Facilities*. Moscow. 1962;(147):28–97. (In Russ.).
5. Коган А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути. Труды ВНИИЖТ. Вып. 332. М.: Транспорт, 1967. 168 с.
6. Коган А. Я. *Longitudinal forces in the railway track*. Proceedings of VNIIZHT. Issue 332. Moscow: Transport, 1967. 168 p. (In Russ.).
7. Крейнис З. Л. О динамической устойчивости рельсового пути // Вестник ЦНИИ МПС. 1963. № 8. С. 58–61.
8. Kreynis Z. L. On the dynamic stability of the railway track. *Herald of TsNI of the Ministry of Railways of the USSR*. 1963;(8):58–61. (In Russ.).
9. Кривобородов А. А. Устойчивость железнодорожного пути при температурном воздействии на рельсы // Труды ЛИИЖТ. Вып. 144. Л., 1952. С. 120–154.
10. Krivobodorov A. A. Stability of the railway track under thermal forces in rails. *Proceedings of LIIZT*. Leningrad. 1952;(144):120–154. (In Russ.).
11. Бромберг Е. М. Устойчивость бесстыкового пути. Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1966. 67 с.
12. Bromberg E. M. *Stability of continuous welded rail track*. Proceedings of VNIIZHT. Moscow: Transport, 1966. 67 p. (In Russ.).
13. Суслов О. А. Определение вероятности выброса бесстыкового пути температурно-напряженного типа // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 50–56. EDN: <https://elibrary.ru/swjhpх>.
14. Suslov O. A. Estimation of probable distortion of a continuous welded track of temperature-strained type. *Volga Region Transport Herald*. 2014;4(46):50–56. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/swjhpх>.
15. Суслов О. А. Стратегия мониторинга и текущего содержания бесстыкового пути на сети ОАО «РЖД» // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 69–73. EDN: <https://elibrary.ru/swjhrl>.
16. Suslov O. A. Strategy of monitoring and routine maintenance of continuous welded rails on the network of JSC «Russian Railways». *Volga Region Transport Herald*. 2014;4(46):69–73. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/swjhrl>.

¹³ Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544/п. С. 167.

9. Суслов О. А., Седелкин Ю. А., Атапин В. В. Анализ устойчивости бесстыкового пути по данным современных средств диагностики // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 22–28. EDN: <https://elibrary.ru/vbckzp>.

Suslov O. A., Sedelkin Yu. A., Atapin V. V. Analysis of continuous welded rail track stability based on data from modern diagnostic tools. *Railway Track and Facilities*. 2015;(11):22–28. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vbckzp>.

10. Strauss A., Šomodíková M., Lehký D., Novák D., Bergmeister K. Nonlinear finite element analysis of continuous welded rail–bridge interaction: monitoring-based calibration. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018;24(4):344–354. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.3050>.

11. N.-H. Lim, N.-H. Park, Yo.-J. Kang. Stability of continuous welded rail track. *Computers & Structures*. 2003;81(22–23):2219–2236. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00287-6).

12. Альбрехт В. Г., Коган А. Я. и др. Бесстыковой путь. М.: Транспорт, 2000. 408 с.

Albrecht V. G., Kogan A. Ya. et al. *Welded rail track*. Moscow: Transport, 2000. 408 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Валерьевич РОМАНОВ,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Железнодорожный путь», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 6385-3293, <https://orcid.org/0000-0002-8071-8594>

Артём Александрович КИСЕЛЕВ,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 8734-4325, <https://orcid.org/0000-0001-7088-8824>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrei V. ROMANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Railway Track Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 6385-3293, <https://orcid.org/0000-0002-8071-8594>

Artyom A. KISELEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Railway Track Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 8734-4325, <https://orcid.org/0000-0001-7088-8824>

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Валерьевич РОМАНОВ. Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса, расчет бесстыкового пути на устойчивость, оценка результатов исследования, формулирование выводов, написание текста статьи (50 %).

Артём Александрович КИСЕЛЕВ. Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса, расчет бесстыкового пути на прочность, оценка результатов исследования, формулирование выводов, написание текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrei V. ROMANOV. Research aims and objectives formulation, analysis of research state, stability analysis of continuous welded rail track, evaluation of research results, conclusion formulation, article text writing (50 %).

Artyom A. KISELEV. Research aims and objectives formulation, analysis of research state, strength analysis of continuous welded rail track, evaluation of research results, conclusion formulation, article text writing (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 09.09.2025, рецензия от первого рецензента получена 19.09.2025, рецензия от второго рецензента получена 24.09.2025, рецензия от третьего рецензента получена 07.10.2025, принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 09.09.2025, first review received 19.09.2025, second review received 24.09.2025, third review received 07.10.2025, accepted for publication 09.10.2025.