

Научная статья
УДК 691.328:539.37
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_102

Исследование усилий взаимодействия рельсов и шпал при неравномерной осадке железнодорожного пути

Виктор Михайлович Тихомиров¹, Сергей Иванович Герасимов^{2✉},
Анатолий Михайлович Попов³

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ twm@stu.ru

² gerasimov@stu.ru✉

³ termech@stu.ru

Аннотация. В работе исследовано взаимодействие рельса со шпалами при неравномерной осадке железнодорожного пути. Наличие зазоров между элементами верхнего строения пути, различие их механических характеристик, а также изменение жесткости грунтового основания приводит к осадкам, неравномерно распределенным вдоль направления рельсовой колеи. В процессе эксплуатации при повышении осевых нагрузок и грузонапряженности влияние этих факторов увеличивается. В конечном итоге на шпалы приходится большая нагрузка по сравнению с расчетным состоянием пути.

Аналитическое решение задачи об определении усилий взаимодействия рельсов со шпалами при неравномерной осадке представляется затруднительным и громоздким. В данной работе был использован метод численного моделирования – метод конечных элементов. Деформирование рельса было описано решением для балки, опирающейся на упругое основание, давление на которое пропорционально прогибам рельса. На основании такого представления в программном комплексе COSMOS была построена конечно-элементная схема рельса под воздействием динамической нагрузки. Осадка пути моделировалась с помощью специальных контактных конечных элементов. Для решения поставленной задачи были использованы четыре различные схемы осадки пути и проведен конечно-элементный расчет по определению давления рельса на шпалы. Анализ результатов позволил определить наиболее неблагоприятные условия осадки подрельсового основания. Было получено, что осадка пути, при которой одна шпала выключается из работы его верхнего строения, приводит к увеличению давления на 25 %. При осадке четырех соседних шпал максимальное давление со стороны рельса увеличивается в 2,16 раза по сравнению с расчетным состоянием пути. Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке прочности железнодорожных шпал.

Ключевые слова: неравномерная осадка железнодорожного пути, взаимодействие рельсов и шпал, балка на упругом основании, метод конечных элементов

Для цитирования: Тихомиров В. М., Герасимов С. И., Попов А. М. Исследование усилий взаимодействия рельсов и шпал при неравномерной осадке железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 102–108. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_102.

Original article

Study of the interaction forces between rails and sleepers in case of uneven track settlement

Victor M. Tikhomirov¹, Sergey I. Gerasimov^{2✉}, Anatoly M. Popov³

^{1, 2, 3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ twm@stu.ru

² gerasimov@stu.ru✉

³ termech@stu.ru

Abstract. The study examines the effect of uneven track settlement on the force interaction between rails and sleepers when affecting the track of a freight train. Due to the presence of gaps between the elements of the track superstructure, the difference in the mechanical characteristics of the elastic gaskets and the soil base in the longitudinal direction, the settlement of the sleepers may be uneven. The importance of this factor increases with increasing axial loads and load stress. In the end, individual sleepers have a greater load than others compared to the calculated normative state of the track.

The analytical solution to the problem of determining the interaction forces between rails and sleepers under uneven settlement proves to be difficult and cumbersome. In this work, the numerical modeling method was used – the finite element method. For the rail, a mathematical model of the beam was used, resting on an elastic base, the pressure on which linearly depends on the movements of the rail, and its rigidity on a combination of deformation characteristics of rail and napkin rubber pads and soil. Based on this model, a finite element scheme for calculating rails supported by sleepers under the influence of a standard load was built. Track settlement was modeled by changing the parameters of special contact finite elements. When varying the parameters of these elements, the maximum rail pressure on a single sleeper was calculated. From the analysis of the results, the most unfavorable cases of base settlement unevenness were identified. It was found that the settlement of the track, in which one sleeper is turned off from the operation of the topsides, leads to an increase in maximum pressure by 25%. The shutdown of four adjacent sleepers increases the maximum pressure by 2.16 times compared to the standard condition of the railway track. This circumstance should be taken into account when calculating the strength of railway ties.

Keywords: uneven track settlement, interaction of rails and sleepers, beam on linearly elastic base, finite element method

For citation: Tikhomirov V. M., Gerasimov S. I., Popov A. M. Study of the interaction forces between rails and sleepers in case of uneven track settlement. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):102–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_102.

Введение

При проведении нормативного расчета давления рельса на шпалу предполагается, что значение жесткости подрельсового основания в продольном направлении не изменяется, а зазоры между грунтом и шпалами отсутствуют. В результате при движении состава рельс на все шпалы оказывает одинаковое давление. При наличии зазоров между элементами верхнего строения пути, различии механических характеристик упругих прокладок и грунтового основания в продольном направлении реальная осадка пути оказывается неравномерной [1, 2]. Неравномерность осадки возрастает по мере увеличения осевых нагрузок и грузонапряженности пути. На этот процесс также влияет воздействие жестких климатических условий. В конечном итоге на некоторые шпалы приходится бóльшая поездная нагрузка, чем на другие [3, 4]. В свою очередь, это приводит к повышенному выходу шпал из строя.

В данной работе проведено исследование взаимодействия элементов верхнего строения пути при наличии неравномерной осадки подрельсового основания. Решение задачи об определении усилий взаимодействия элементов конструкций при неравномерной осадке оснований представляется затруднительным и громоздким [5–7]. Поэтому для моделирования деформирования рельсовой плети, опирающейся на упругое основание при его неравномерной осадке, был использован метод конечных элементов (МКЭ) [8]. МКЭ реализован во многих программных комплексах и адаптирован для решения различного рода задач механики. В данной работе конечно-элементные модели рельсовой плети были построены в среде программного комплекса COSMOS [9].

Методы исследования

Рельс опирается на основание, которое включает комбинацию разнородных элементов: резиновых и стальных подкладок, железобетонной шпалы, земляного полотна. Поэтому взаимодействие данных элементов представляет собой сложный процесс, на который влияет множество факторов. Реальные условия контактного рельса и смоделировать достаточно сложно. Поэтому будем использовать упрощенную модель, которая применяется в методике расчета верхнего строения пути на прочность, – модель рельса на упругом основании Винклера. При такой постановке задачи интенсивность отпора силового взаимодействия рельса и основания q прямо пропорциональна прогибу y [10, 11]:

$$q = Uy, \quad (1)$$

где U – модуль упругости подрельсового основания, учитывающий жесткость всех элементов, на которые опирается рельсовая плеть, и задаваемый по нормативам.

Для верификации предложенной модели сначала рассмотрим опирание рельса на сплошное упругое основание. Конечно-элементную модель рельса построим с помощью двухузловых линейных конечных элементов (КЭ), которые воспринимают плоский прямой изгиб от поездной нагрузки. В библиотеке программного комплекса COSMOS это балочный элемент BEAM2D (рис. 1). Реальные константы данного КЭ соответствуют механическим и геометрическим характеристикам рельса Р65 [12]: модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; плотность стали 7 800 кг/м³; площадь поперечного сечения рельса 82,65 см²; момент инерции сечения 3 540 см⁴; высота рельса 180 мм.

Основание моделировалось с помощью опорных контактных элементов, которые уста-

навливались под каждый узел балочных КЭ (см. рис. 1). В программном комплексе COSMOS/M это линейные двухузловые гар-элементы, которые передают давление балки на контактный элемент только при условии закрытия условного зазора Δ . Для контактных элементов задавались значения жесткости c и зазора Δ , который для нашей задачи моделировал осадку основания или в реальности – зазор между шпалами и грунтом.

Сравнивая вертикальное перемещение рельса y и деформацию опорного элемента, получим $y = \frac{F}{c}$. Усилие F , действующее в опорном элементе, выразим через давление основания на рельс q :

$$F = q \frac{L}{n}, \quad (2)$$

где n – количество балочных КЭ по длине модели L (см. рис. 1).

Следовательно, жесткость элемента связана с параметрами модели следующим образом:

$$c = \frac{q L}{y n}. \quad (3)$$

Учитывая соотношения (1), (2) и (3), получим расчетную формулу для определения жесткости контактного элемента:

$$c = \frac{UL}{n}. \quad (4)$$

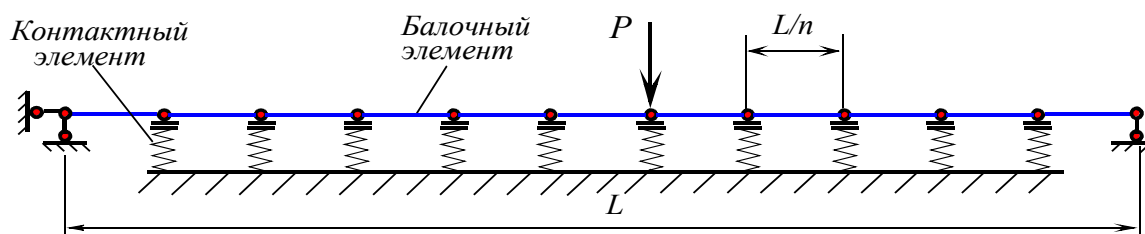


Рис. 1. Конечно-элементная модель рельса на упругом основании

Чтобы определить размер балочных КЭ, при котором численный расчет дает достаточно точный результат, были проведены численные эксперименты при разном соотношении L/n . На рис. 2 представлен график зависимости погрешности конечно-элементного расчета $\eta = \frac{y_a - y_{МКЭ}}{y_a} \cdot 100\%$ от значения L/n .

Здесь $y_{МКЭ}$ – перемещения рельса, определенные по результатам численного расчета; y_a – прогибы, определенные с помощью аналитического решения [11]:

$$y_a = \frac{Pk}{2U}, \quad k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ_z}}. \quad (5)$$

В результате видно, что при $L/n > 1\,000$ погрешность численного расчета практически равна нулю. Это условие было использовано при дальнейшем численном анализе.

В пути рельс опирается на шпалы, а точнее, на стальную подкладку шириной $b_n = 140$ мм. Для учета этого обстоятельства опорные элементы устанавливались не под каждый узел балочных КЭ, а периодически, на участках, которые соответствовали ширине подкладки (рис. 3).

Сравнивая суммарную жесткость опорных элементов и жесткость подрельсового основания, получим формулу для расчета жесткости опорных элементов

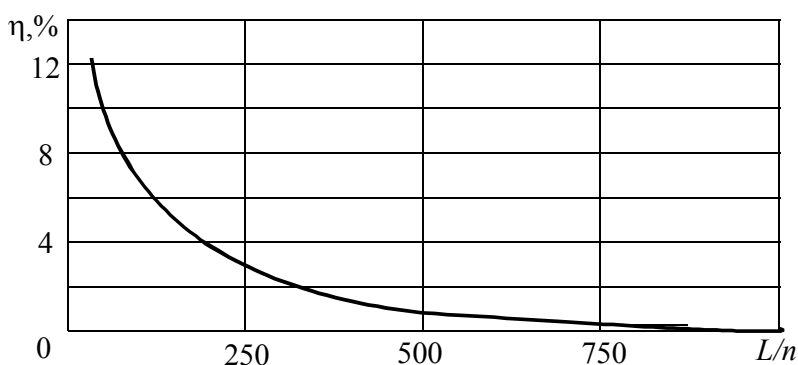


Рис. 2. Погрешность конечно-элементного расчета

$$c = \frac{ULl_{ш}}{nb_{п}} = Ul \frac{l_{ш}}{b_{п}}, \quad (6)$$

где $l_{ш}$ – расстояние между шпалами; l – размер балочного КЭ.

Нагрузки, которые передаются от колесной пары грузового вагона на рельс, определим по методике расчета пути на прочность [11], учитывая параметры движения и характеристики подрельсового основания, представленные в табл. 1.

В результате максимальная динамическая нагрузка $P_{\max} = 199\,000$ Н, среднее динамическое усилие $P_{\text{ср}} = 167\,000$ Н. На рис. 4 приведена расчетная схема участка пути.

Для исследования влияния сил тяжести на деформирование рельсовой плети были проведены расчеты МКЭ с учетом и без учета веса. Для учета веса рельсошпальной решетки увеличим плотность материала балочного элемента. Для этого к весу 1 м стандартного рельса Р65

(65 кг) добавим вес одной шпалы (297 кг). Таким образом, плотность модельного материала была увеличена по сравнению с плотностью стали в $(65 + 297)/65 = 5,57$ раза. При расчете длина расчетного участка $L = 12$ м, размер балочного КЭ $l = 10$ мм. На рис. 5 представлены результаты определения перемещений рельса. Здесь сплошной линией показан деформированный вид рельсовой плети без учета веса, пунктирной – с учетом действия сил тяжести.

На шпалу, расположенную под нагрузкой $P_{\max}$ (см. рис. 5), рельс оказывает максимальное давление, которое составило 69,3 кН.

На рис. 6 показана схема моделирования неравномерной осадки пути. Здесь, задавая различные значения параметров $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$, получали различную степень неравномерности осадки расчетного участка пути. При этом было использовано четыре схемы: первая – изменяется зазор Δ_1 , а $\Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = 0$ и остаются

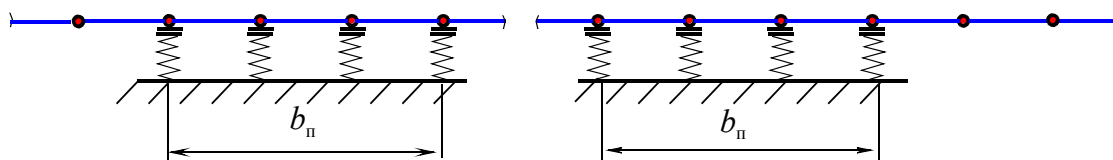


Рис. 3. Конечно-элементная схема при опирании рельса на шпалы

Таблица 1

Исходные данные для расчета динамических нагрузок на рельс

Параметр	Значение
Расстояние между осями шпал $l_{ш}$, м	0,5
Расстояние между осями колесных пар, м:	
l_1	1,85
l_2	6,75
Статическая нагрузка на ось $P_{ос}$, кН	250
Скорость движения состава V , км/ч	80
Модуль подрельсового основания U , МПа	105

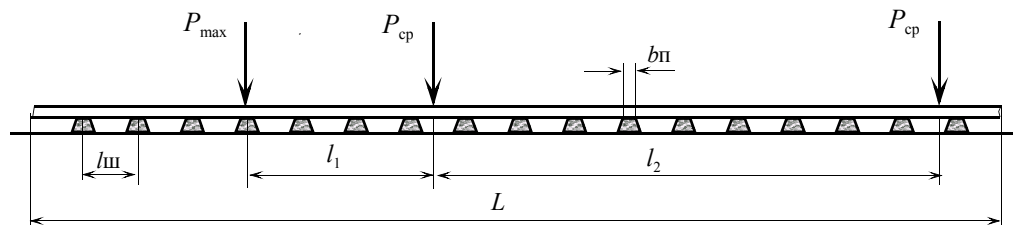


Рис. 4. Расчетная схема участка рельсовой плети

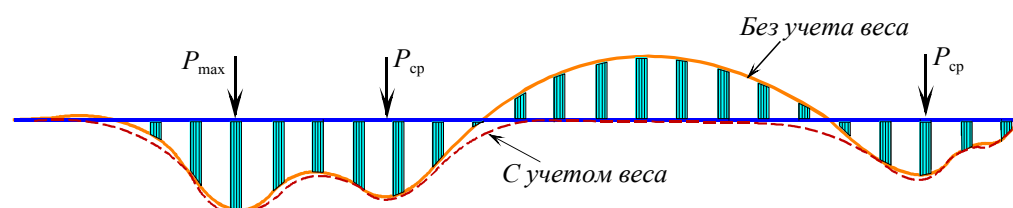


Рис. 5. Деформированный вид рельса

постоянными; вторая – варьируются зазоры Δ_1 и Δ_2 , а $\Delta_3 = \Delta_4 = 0$; третья – изменяется зазор Δ_3 , $\Delta_1 = 2,5$ мм, $\Delta_2 = 2,0$ мм, $\Delta_4 = 0$; четвертая – варьируется зазор Δ_4 , а $\Delta_1 = 2,5$ мм, $\Delta_2 = 2,0$ мм, $\Delta_3 = 2,5$ мм.

Результаты конечно-элементного расчета по первой схеме осадки представлены в табл. 2. Видно, что при осадке 1-й шпалы на 1,3 мм она перестает взаимодействовать с рельсом. Максимальное давление на расчетную шпалу при этом возрастает на 25 %.

Результаты определения максимального давления по второй схеме осадки основания

представлены в табл. 3. При осадке 1-й и 2-й шпал более 1,7 мм они выключаются из работы основания, а максимальное давление на шпалу, по сравнению с первоначальным значением $Q_{\max} = 69,3$ кН, возрастает на 44 %.

Результаты расчета по третьей схеме осадки основания представлены в табл. 4. При осадке 1, 2 и 3-й шпал на величину более 2 мм рельс перестает на них опираться, а максимальное давление возрастает на 82 %.

Результаты расчета по четвертой схеме представлены в табл. 5. При осадке четырех соседних шпал на величину более 2,5 мм они

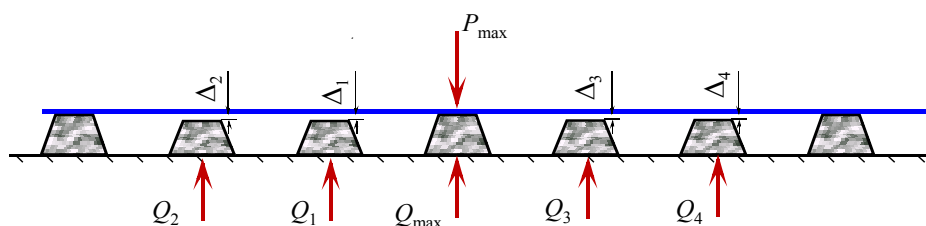


Рис. 6. Схема моделирования неравномерности осадки пути

Таблица 2

Максимальное давление на шпалу при варьировании зазора Δ_1

Δ_1 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_1 , кН
0,0	69,3	45,5
1,1	84,6	2,3
1,2	86,0	0,5
1,3	86,7	0,0

Таблица 3

Влияние величины осадки второй шпалы на максимальное давление

Δ_1 , мм	Δ_2 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_1 , кН	Q_2 , кН
1,3	0,5	90,6	1,93	16,5
1,5	0,5	92,5	0,0	18,4
1,5	1,0	96,5	1,5	0,1
1,5	1,5	97,0	2,7	0,0
1,7	1,5	100,0	0,0	0,0

Таблица 4

Влияние величины осадки третьей шпалы на максимальное давление

Δ_3 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_3 , кН
1,2	124,7	15,9
1,6	124,7	0,3
2,0	126,0	0,0

Таблица 5

Влияние величины осадки четвертой шпалы на максимальное давление

Δ_4 , мм	Δ_4 , мм	$Q_{\max}$, кН	Q_3 , кН	Q_4 , кН
2,0	1,0	136,5	1,0	30,2
2,0	1,5	139,4	7,0	10,7
2,0	2,0	141,5	12,4	0,0
2,5	2,0	149,6	0,0	0,0

выключаются из работы основания, а максимальное давление на шпалу, по сравнению с первоначальной величиной, возрастает на 116 %.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Построена математическая модель взаимодействия рельса и шпал, которая позволила учесть реальные граничные условия опирания рельса на основание и неравномерность его осадки. Модель реализована в конечно-элементной среде программного комплекса COSMOS.

2. При анализе результатов расчета по четырем вариантам неравномерности осадки грунтового основания установлены наиболее неблаго-

приятные условия осадки и определены максимальные значения давления на шпалы.

3. Получено, что осадка пути, при которой одна шпала выключается из работы его верхнего строения, приводит к увеличению давления на 25 %. При осадке четырех соседних шпал максимальное давление со стороны рельса увеличивается в 2,16 раза по сравнению с расчетным состоянием пути. Результаты исследования позволят более точно оценивать прочность железнодорожных шпал при изменении режимов эксплуатации железнодорожного пути – повышении нагрузок на ось и грузонапряженности пути, использовании шпал новых конструкций.

Список источников

1. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов / В. О. Певзнер, С. С. Надеждин, А. В. Анисин, И. В. Третьяков // Вестник ВНИИЖТа. 2013. № 4. С. 44–48.

2. Shenton M. J. Ballast deformation and track deterioration track technol // Proc. Conf. Nottingham, 11–13 July 1981, London. 1985. P. 253–265.

3. Сахарчук С. И., Федорова В. А. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций в однородных средах и двухслойных системах // Вестник РГРТУ. 2009. № 3, вып. 29. С. 60–65.

4. Щепотин К. И. О перераспределении давления на шпалы при наличии неравноупругости пути // Вопросы устройства и содержания пути : сборник научных трудов / Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта. Новосибирск, 1969. Вып. 74. С. 42–47.

5. Соловьев В. П. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта : сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». Москва : Интекст, 2013. С. 185–192.

6. Брандль Х., Паульмичл А. Взаимодействие оснований и сооружений высокоскоростных железных дорог : лекция, прочитанная на XIII Дунайско-Европейской конференции по геотехнике в г. Любляне, Словения (29–31 мая 2006 г.) // Развитие городов и геотехническое строительство. 2007. № 11. С. 157–164.

7. Моделирование неравномерной осадки оснований каркасных сооружений / С. И. Герасимов, В. М. Тихомиров, А. М. Попов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28, № 1. С. 288–297.

8. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. Москва : Недра, 1974. 239 с.

9. COSMOSM User Guide. Vol. 4. Advanced Modules. Santa Monica (CA) : Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 328 p.

10. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : утверждена Распоряжением МПС России 16 июня 2000 г. Москва, 2000. 38 с.

11. Железнодорожный путь / под ред. Т. Г. Яковлевой. Москва : Трансжелдориздат, 2001. 404 с.

12. ГОСТ Р 51685–2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 декабря 2022 г. № 1509-ст. Москва : Российский институт стандартизации, 2023. 125 с.

Reference

1. Pevzner V. O., Nadezhdin S. S., Anisin A. V., Tretyakov I. V. Assessment of track deformability in areas of disturbances and possible changes in alignment times with an increase in the axle load of freight. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*. 2013;(4):44–48. (In Russ.).

2. Shenton M. J. Ballast deformation and track deterioration track technol. *Proc. Conf. Nottingham, 11–13, July, 1981, London*. 1985. P. 253–265, 267– 279. Express information “The Route and Construction of Railways”. 1986. No. 43.

3. Sakharchuk S. I., Fedorova V. A. Modeling the accumulation process of residual deformations in homogeneous media and two-layer systems. *Vestnik of RSREU*. 2009;3(29):60–65. (In Russ.).
4. Shchepotin K. I. On the redistribution of pressure on sleepers in the presence of unequal elasticity of the track. *Issues of Track Design and Maintenance. Proceedings*. Novosibirsk Institute of Railway Engineers. Novosibirsk; 1969. Issue 74. P. 42–47. (In Russ.).
5. Soloviev V. P. Modeling the process of accumulation of residual deformations of the track using a supercomputer. *Fundamental Research for the Long-term Development of Railway Transport. Proceedings of Papers of Members and Scientific Partners of the United Academic Council of Russian Railways*. Moscow: Intekst; 2013. P. 185–192. (In Russ.).
6. Brandl H., Paulmichl A. Interaction of foundations and structures of high-speed railways. Materials of the International XIII Danube-European Conference on Geotechnics, Ljubljana, Slovenia, 29–31 May 2006. *Urban Development and Geotechnical Engineering*. 2007;(11):157–164. (In Russ.).
7. Gerasimov S. I., Tikhomirov V. M., Popov A. M. [et al.]. Modeling of uneven settlement of foundations of frame structures. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2026;28(1):288–297. (In Russ.).
8. Zenkevich O., Chang I. Finite element method in the theory of structures and in continuum mechanics. Moscow: Nedra; 1974. 239 p. (In Russ.).
9. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. Santa Monica (CA): Structural Research and Analysis Corporation; 2007. 328 p.
10. Methodology for assessing rolling stock on a track based on reliability conditions: approved by Order of the Ministry of Railways of Russia dated 16.06.2000. Moscow; 2000. 38 p. (In Russ.).
11. Railway track. Edited by T. G. Yakovleva. Moscow: Transzheldorizdat; 2001. 404 p. (In Russ.).
12. GOST R 51685–2022. Railway Rails. General Specifications: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1509-st dated 14.12.2022. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. 125 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. М. Тихомиров – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

С. И. Герасимов – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. М. Попов – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. M. Tikhomirov – Doctor of Engineering, Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

S. I. Gerasimov – Doctor of Engineering, Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University.

A. M. Popov – Doctor of Engineering, Professor of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 02.06.2026; одобрена после рецензирования 06.08.2026; принята к публикации 31.08.2026.

The article was submitted 02.06.2026; approved after reviewing 06.08.2026; accepted for publication 31.08.2026.