

Динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции пути RHEDA 2000

К. И. Иванова, А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Иванова К. И., Колос А. Ф. Динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции пути RHEDA 2000 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-197-205

Аннотация

Цель: Экспериментальное определение вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения железнодорожного пути RHEDA 2000 с последующим анализом полученных данных; определение основных факторов, влияющих на величину вертикальной динамической силы; выявление зависимости изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава; расчет коэффициентов вертикальной динамики при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 и их сравнение с коэффициентами вертикальной динамики балластного пути. **Методы:** Измерение вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс осуществлялось тензометрическим методом (методом Шлюмпфа). Численные значения величин, полученных в ходе эксперимента, обрабатывались методом математической статистики, в свою очередь, уровень вероятности принимался равным 0,994. **Результаты:** Определены величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс для безбалластной конструкции типа RHEDA 2000 при различных типах подвижного состава и различных диапазонах их скорости движения. Графически построена зависимость изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава. Выполнено сравнение коэффициентов вертикальной динамики безбалластной конструкции верхнего строения железнодорожного пути RHEDA 2000 с конструкцией пути на балласте. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, строительстве, реконструкции и ремонте железнодорожного пути, где предусматривается устройство безбалластного верхнего строения пути.

Ключевые слова: Безбалластный путь, вертикальные динамические силы, метод Шлюмпфа, безбалластная конструкция RHEDA 2000, тензометрический метод, коэффициент вертикальной динамики.

Введение

В настоящее время стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации нацелена на решение ряда существенных задач. Одной из наиболее актуальных является масштабное расширение сети скоростных и строительство новых высокоскоростных магистралей. Увеличение скоростей движения влечет за собой рост динамических нагрузок на используемую конструкцию верхнего строения пути. Для решения данной проблемы предлагается внедрение

новых конструкций верхнего строения пути. Опираясь на мировой опыт проектирования скоростных (140–200 км/ч) и высокоскоростных (200–400 км/ч) железных дорог, можно сделать вывод, что все большее предпочтение отдается применению безбалластных конструкций верхнего строения пути [1]. Несмотря на значительные капитальные вложения на этапе строительства, безбалластные конструкции имеют ряд существенных преимуществ по отношению к балластным конструкциям верхнего строения пути. Срок службы безбалластных конструкций в среднем составляет 50–60 лет, при значительном сокращении эксплуатационных расходов. Работа пути характеризуется фиксированным положением в плане, продольном и поперечном профиле, способствует повышению плавности хода подвижного состава, что обеспечивает комфортные условия для пассажиров и ведет к меньшему выходу из строя деталей подвижного состава [2].

Для выбора предпочтительной конструкции верхнего строения пути при конкретных условиях эксплуатации необходимо знать особенности динамического воздействия колеса на рельс. И если для пути на балласте величины вертикальных динамических сил, их зависимости от скорости движения и типа подвижного состава хорошо изучены, то для безбалластных конструкций, эксплуатируемых на территории Российской Федерации, такие исследования отсутствуют [3]. Таким образом, существует необходимость в экспериментальном измерении вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс для безбалластной конструкции, с последующим определением основных факторов, влияющих на их изменение.

Методы исследования

Натурные испытания по определению вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс проходили на линии Москва — Санкт-Петербург, экспериментальный участок располагался на II главном пути (пикет ПК 45 + 65,00) перегона Саблино — Тосно. Земляное полотно отсыпано из песка средней крупности, высотой 2,2 м. В основании расположены суглинки легкие пылеватые от твердых до пластичных. В качестве верхнего строения пути используется безбалластная конструкция RHEDA 2000 [4], армированная несущая бетонная плита которой опирается на фундаментную плиту, представленную гидравлически связанным бетонным слоем (ГСБС) толщиной 300 мм. Под ГСБС уложен защитный слой толщиной 400 мм из щебеночно-песчано-гравийной смеси специально подобранного гранулометрического состава (рис. 1) [5].

В ходе проведения испытаний на участке обращались пассажирские поезда с локомотивом ЭП2К, пригородные электропоезда типа ЭР, а также региональные скоростные электропоезда ЭС1 «Ласточка». Скорость движения подвижных составов варьировалась от 60 до 100 км/ч.

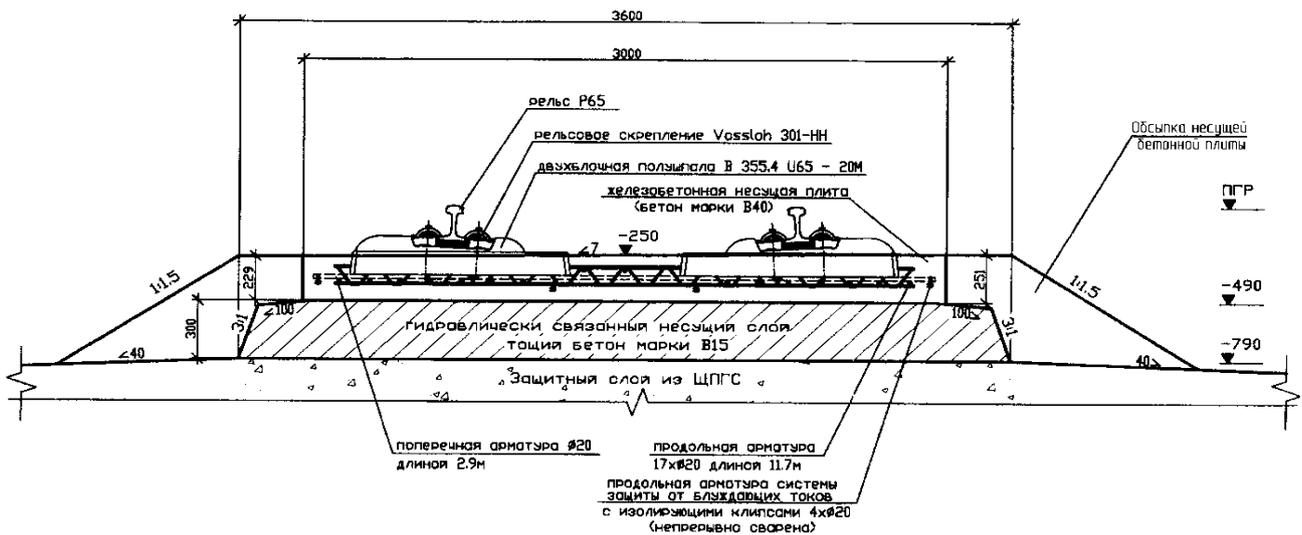


Рис. 1. Безбалластная конструкция RHEDA 2000, расположенная на экспериментальном участке

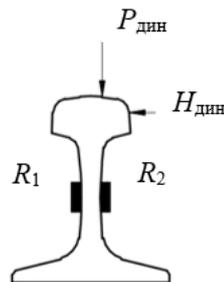


Рис. 2. Схема установки датчиков для измерения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс:

$P_{\text{дин}}$ — вертикальная динамическая сила воздействия колеса на рельс;
 $H_{\text{дин}}$ — горизонтальная динамическая сила воздействия колеса на рельс;
 R_1 и R_2 — тензорезисторы

Наиболее апробированным и эффективным подходом, позволяющим решить задачу по определению вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс, является метод Шлюмпфа [6], суть которого заключается в том, что в измерительной схеме тензодатчики R_1 и R_2 [7] расположены на нейтральной оси шейки рельса с наружной и внутренней стороны так, что их продольные оси перпендикулярны нейтральной оси рельса. Тензодатчики были включены в схему моста таким образом, чтобы ток по диагонали моста был пропорционален абсолютному значению суммы деформаций рельса (рис. 2). Следовательно, можно утверждать, что при такой схеме подключения текущее значение силы тока пропорционально значению вертикальной динамической силы, действующей на рельс [8].

Учитывая, что число расчетных сечений на рельсе составило 8 и запись показаний всех тензорезисторов проводилась одновременно, появилась возможность определять значения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при различном положении осей подвижного состава относительно расчетных сечений в интересующий момент времени.

При камеральной обработке полученных данных учитывались следующие факторы:

1. Отдельный статистический ряд формировался из экспериментальных значений вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при движении различных типов подвижного состава в заданном диапазоне скоростей.

2. От каждого типа подвижного состава при скорости движения, входящей в заданный диапазон скоростей, в статистический ряд включалась максимальная величина вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс.

3. В случае если скорость движения поезда отличалась более чем на 10 км/ч, полученные данные формировались в отдельный статистический ряд, соответствующий другому диапазону скоростей движения.

4. С помощью методов, основанных на теории математической статистики, определялся ряд интересующих показателей, таких как: максимально вероятное и среднее значение вертикальных динамических сил, действующих на рельс, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации. Уровень вероятности принимался равным 0,994.

Результаты исследования

В результате натурных испытаний были определены значения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс, представленные в таблице. Кроме того, для доказательства экспериментальных данных был проведен расчет вертикальных динамических сил по «Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» [9], где значения модуля упругости подрельсового основания U и коэффициента относительной жесткости подрельсового основания и рельса k принимались на основе ранее проведенных испытаний [10].

Исходя из полученных экспериментальных данных, на рис. 3 отображена полученная зависимость изменения значения вертикальных динамических сил от скорости движения и типа подвижного состава.

Анализ экспериментальных данных показывает, что вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс изменяются в достаточно узком диапазоне при различных скоростях движения, но существенно изменяются для разных типов подвижного состава, что вызвано различной нагрузкой на ось. Это свидетельствует о том, что при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 основное влияние оказывает только нагрузка от подвижного состава, а изменение скорости движения от 60 до 100 км/ч не приводит к росту вертикальных динамических сил более чем на 5 %.

Вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000

Тип подвижного состава	Вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции RHEDA 2000, $P_{дин}$, кН*, в диапазоне скоростей движения поездов, км/ч (в числителе приведены значения, рассчитанные по «Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности», в знаменателе — полученные экспериментально)							
	60–70	Разница, %	71–80	Разница, %	81–90	Разница, %	91–100	Разница, %
Локомотив ЭП2К	131,36 130,74	0,47	133,1 131	1,58	134,85 131,34	2,60	136,61 131,63	3,65
Пассажирский вагон	95,36 96,21	0,89	96,64 96,31	0,34	97,92 96,31	1,64	99,21 96,44	2,79
Электропоезд ЭР	95,36 96,29	0,98	96,65 96,55	0,10	97,94 96,7	1,27	99,25 97,35	1,91
Электропоезд	120,42 119,44	0,81	123,28 119,66	2,94	126,15 119,95	4,91	126,05 120,73	4,22

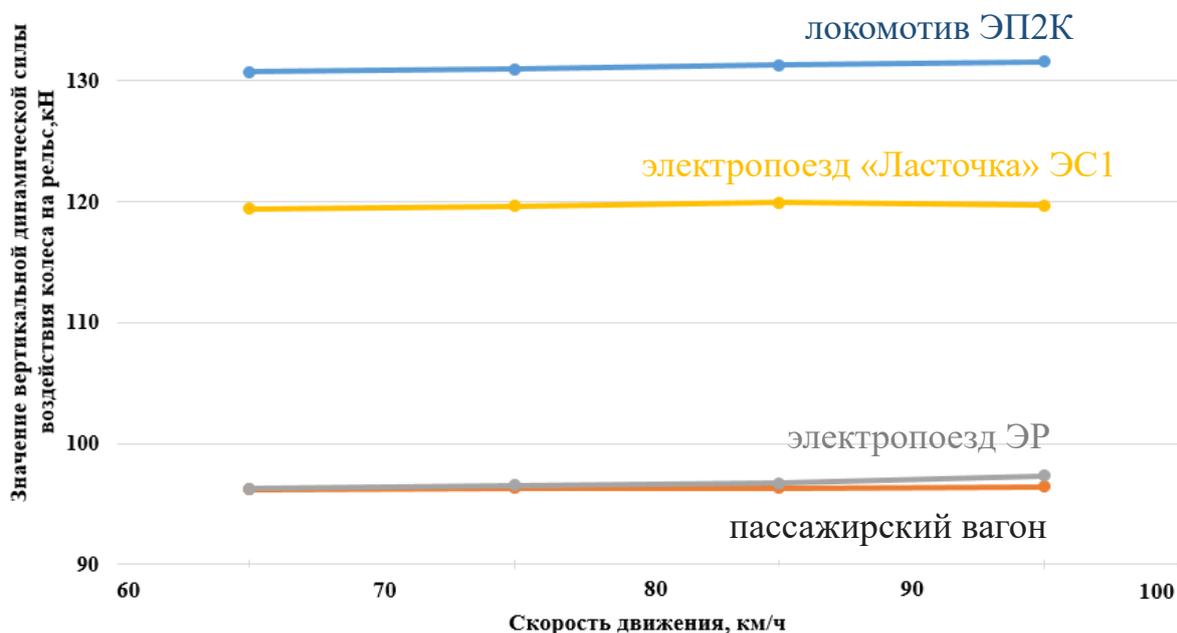


Рис. 3. Зависимости изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава

Помимо значений вертикальных динамических сил были рассчитаны коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000, которые были сопоставлены с коэффициентами вертикальной динамики пути на балласте [11] при аналогичных скоростях движения и типах подвижного состава. Полученные зависимости приведены на рис. 4.

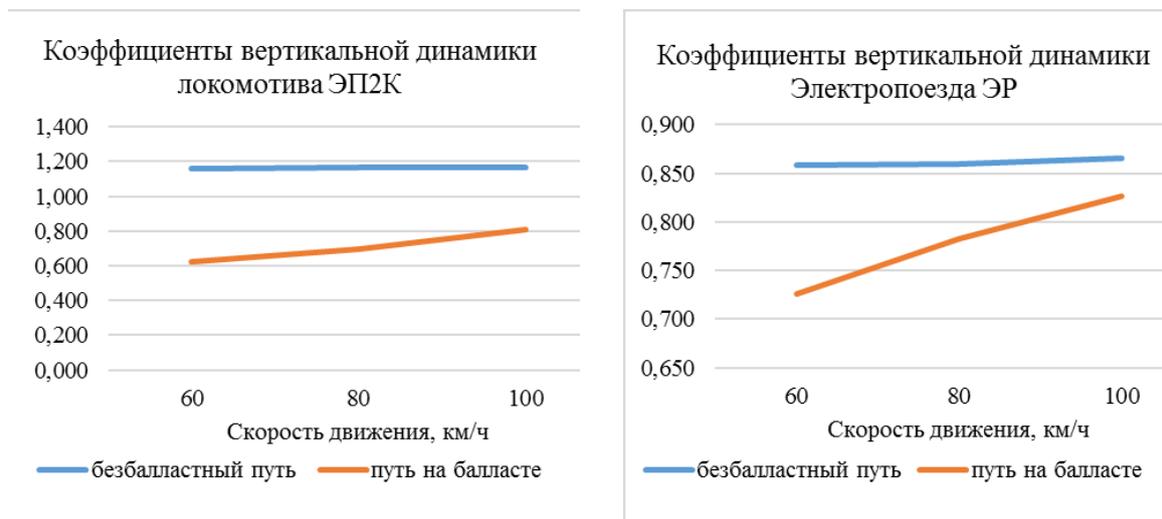


Рис. 4. Изменение величины коэффициентов вертикальной динамики в зависимости от скорости движения различных типов подвижного состава по безбалластному пути и пути на балласте

Исходя из графиков, приведенных на рис. 4, можно утверждать, что коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 практически постоянны и не зависят от изменения скорости движения подвижного состава, в свою очередь, на балластной конструкции железнодорожного пути наблюдается рост значений коэффициента вертикальной динамики при увеличении скорости на каждые 10 км/ч.

В целом полученные результаты вертикальных динамических сил от скорости движения и типа подвижного состава, как видно из таблицы, обладают схожимостью, расхождение результатов, полученных экспериментальным путем, от расчетных значений не превышает 5 %. Следовательно, можно сделать вывод, что при безбалластной конструкции верхнего строения пути в исследуемом диапазоне скоростей можно использовать модель рельса как балки, лежащей на сплошном упругом основании, и для определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс можно использовать существующую методику [9] при известных значениях модуля упругости подрельсового основания U и коэффициента относительной жесткости подрельсового основания и рельса k , которые должны быть определены для каждой конструкции безбалластного верхнего строения пути.

Заключение

По полученным результатам экспериментального определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000, приведенным в данной статье, можно сделать следующие основные выводы:

1. Скорость движения подвижного состава не оказывает существенного влияния на изменение величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс.

2. Коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 практически постоянны и не зависят от изменения скорости движения подвижного состава.

3. Значения, определенные экспериментально и путем расчета по известной методике, изменяются в пределах статистической погрешности, следовательно, для определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс можно использовать существующую «Методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» при известных U и k .

Библиографический список

1. Новые типы безбалластного пути // Железные дороги мира. — 1999. — № 12.
2. Путь на плитном основании в Германии // Железные дороги мира. — М., 2006. — № 4. — С. 64–67.
3. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути // Железные дороги мира. — 2005. — № 1. — С. 68–71.
4. Колос А. Ф. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали / А. Ф. Колос, Т. М. Петрова, А. А. Сидоренко // Техника железных дорог. — 2013. — № 2. — С. 42–47.
5. Третьяков В. В. Безбалластная конструкция RHEDA. Использование безбалластных конструкций на железных дорогах России / В. В. Третьяков, О. Ю. Белоцветова, И. Б. Петропавловская // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог. Конференция МГУПС (МИИТ). — М., 2011. — С. 65–69.
6. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь: учеб. пособие / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. — М.: Транспорт, 1999. — 213 с.
7. ГОСТ 21616-9. Тензорезисторы. Общие технические условия. 01.01.1992.
8. ГОСТ Р 55050—2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. ОАО «ВНИИЖТ», 01.07.2013.
9. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. — М.: ОАО «РЖД», 2017. — 97 с.
10. Колос А. Ф. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути / А. Ф. Колос, К. И. Иванова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 469–479.
11. Ромен Ю. С. Установление условий обращения вагонов с увеличенной осевой нагрузкой / Ю. С. Ромен, А. М. Орлова, М. С. Тихов и др. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2013. — № 3(46).

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 25.02.2023

Контактная информация:

ИВАНОВА Ксения Игоревна — ассистент; kivanova@pgups.ru

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

Dynamic Forces of Wheel Impact on Rail at Ballastless Track Structure RHEDA 2000

K. I. Ivanova, A. F. Kolos

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Ivanova K. I., Kolos A. F. Dynamic Forces of Wheel Impact on Rail at Ballastless Track Structure RHEDA 2000. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 197–205. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-197-205

Summary

Purpose: Experimental determination of vertical dynamic forces of wheel impact on a rail at ballastless construction of railway track RHEDA2000 upper structure with subsequent analysis of obtained data; definition of main factors affecting vertical dynamic force value; identification of dependence of change in the value of wheel vertical dynamic force impact on a rail from motion speed and rolling stock type; calculation of coefficients of vertical dynamics at ballastless construction of rail upper structure. **Methods:** Measurement of wheel vertical dynamic force impact on a rail was carried out by strain-gauge method (Schlumpf method). Numerical values of those, obtained in the course of experiment, were processed by mathematical statistics method, in its turn, probability level was taken equal to 0.994. **Results:** The values of vertical dynamic forces of wheel impact on a rail for ballastless structure of RHEDA2000 type at rolling stock different types and various ranges of motion speed have been determined. The dependence of change in the value of wheel vertical dynamic force impact on a rail from motion speed and rolling stock type has been graphically built. Comparison of vertical dynamics coefficients of ballastless construction of railway RHEDA2000 upper structure with the construction of a track on a ballast has been carried out. **Practical significance:** The obtained results can be used in projection, construction, reconstruction and repair of railway track where track ballastless upper composition is provided.

Keywords: Ballastless track, vertical dynamic forces, Schlumpf method, RHEDA2000 ballastless structure, strain gauge method, vertical dynamics coefficient.

References

1. Novye tipy bezballastnogo puti [New types of ballastless track]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 1999, Iss. 12. (In Russian)

2. Put' na plitnom osnovanii v Germanii [Path on a slab base in Germany]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. Moscow, 2006, Iss. 4, pp. 64–67. (In Russian)
3. Opyt razrabotki i ekspluatatsii bezballastnogo puti [Experience in the development and operation of a ballastless track]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2005, Iss. 1, pp. 68–71. (In Russian)
4. Kolos A. F., Petrova T. M., Sidorenko A. A. Problemy ekspluatatsii bezballastnoy konstrukt-sii verkhnego stroeniya puti RHEDA 2000 na zheleznodorozhnoy magistrali [Problems of operation of the ballastless structure of the RHEDA 2000 track superstructure on the railway line]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway engineering]. 2013, Iss. 2, pp. 42–47. (In Russian)
5. Tret'yakov V. V., Belotsvetova O. Yu., Petropavlovskaya I. B. *Bezballastnaya konstruktsiya RHEDA. Ispol'zovanie bezballastnykh konstrukt-siy na zheleznykh dorogakh Rossii. Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zemlyanogo polotna zheleznykh dorog. Konferentsiya MGUPS (MIIT)* [The use of non-ballast structures on Russian railways. Modern problems of design, construction and operation of railway subgrade. Conference MGUPS (MIIT)]. Moscow, 2011, pp. 65–69. (In Russian)
6. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I. et al. *Zheleznodorozhnyy put': ucheb. posobie* [Railway way: tutorial]. Moscow: Transport Publ., 1999, 213 p. (In Russian)
7. *GOST 21616-9. Tenzorezistory. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 21616-9. Strain gauges. General specifications]. 01.01.1992. (In Russian)
8. *GOST R 55050—2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy* [GOST R 55050—2012. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. OAO “VNIIZhT”, 01.07.2013. (In Russian)
9. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 22 dekabrya 2017 g. № 2706/r* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track in terms of ensuring its reliability. Order of Russian Railways OJSC dated December 22, 2017 № 2706/r]. Moscow: OAO “RZhD” Publ., 2017, 97 p. (In Russian)
10. Kolos A. F., Ivanova K. I. Uprugie kharakteristiki podrel'sovogo osnovaniya bezballastnogo zheleznodorozhnogo puti [Elastic characteristics of the under-rail foundation of a ballast-free railway track]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 469–479. (In Russian)
11. Romen Yu. S., Orlova A. M., Tikhov M. S. et al. Ustanovlenie usloviy obrashcheniya vagonov s uvelichennoy osevoy nagruzkoy [Establishment of conditions for the circulation of wagons with increased axial load]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics]. 2013, Iss. 3(46). (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 25, 2023

Author's information:

Ksenia I. IVANOVA — Assistant; kivanova@pgups.ru

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru