

УДК 625.041.2

Собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию

В. А. Черняева, Е. И. Шехтман, Е. В. Черняев, А. И. Иванов

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

Для цитирования: Черняева В. А., Шехтман Е. И., Черняев Е. В., Иванов А. И. Собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 440–448. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-440-448

Аннотация

Цель: в процессе эксплуатации железнодорожного пути в его элементах происходит накопление остаточных деформаций. В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным. При переходе рельса от прямолинейного равновесного состояния к криволинейному (при просадках, перекосах, пучинах) в нем возникают собственные напряжения, которые изменяют работу пути под подвижной нагрузкой. Предлагается в практических расчетах железнодорожного пути рассматривать критическую силу, при которой происходит потеря устойчивости рельса (переход к криволинейному равновесному состоянию) в вертикальной плоскости, в качестве дополнительного критерия допустимой нагрузки. В статье рассмотрены собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию. **Методы:** статистический анализ накопления остаточных деформаций участка железнодорожного пути, обзор существующих методик оценки воздействия подвижного состава на путь, имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния рельса. **Результаты:** проведены анализ накопления остаточных деформаций участка железнодорожного пути, обзор существующих методик оценки воздействия подвижного состава на путь, моделирование напряженно-деформированного состояния рельса под нагрузкой в двух состояниях (прямолинейная балка, криволинейная балка). **Практическая значимость:** результаты могут быть применены при решении задачи о взаимодействии подвижного состава и железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, верхнее строение пути, рельс, расчет железнодорожного пути, собственные напряжения, просадки железнодорожного пути.

Введение

Подходы к системе технического обслуживания железнодорожного пути в межремонтном цикле, величины допустимых отклонений и отступлений от нормативов геометрических параметров рельсовой колеи существенно влияют на напряженно-деформированное состояние всей конструкции

и отдельных ее элементов и, как следствие, являются важным фактором управления долговечностью элементов верхнего и нижнего строения пути.

В процессе эксплуатации железнодорожного пути в его элементах происходит накопление остаточных деформаций,

интенсивность которого зависит от свойств материалов отдельного элемента (масса, жесткость, демпфирующая способность), взаимного расположения элементов в конструкции (плавность изменения механических свойств), среднеисполненной массы обращающегося подвижного состава, среднеисполненной скорости, степени соответствия геометрии рельсовой колеи нормативам. Эксплуатация железнодорожного пути в условиях наличия остаточных деформаций (в статье рассматриваются отклонения рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, просадки, перекосы) влечет за собой появление собственных напряжений в рельсах.

Дополнение существующих в настоящее время методик расчета железнодорожного пути [1–10] в части учета влияния собственных напряжений в рельсах, возникающих вследствие эксплуатации пути в условиях наличия отклонения рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, сроков их устранения, на деформируемость и долговечность как отдельных элементов, так и конструкции железнодорожного пути в целом, в том числе в различных эксплуатационных условиях, является актуальной задачей.

Учет остаточной деформации пути при решении задачи взаимодействия экипажа и пути

В конструкции железнодорожного пути в процессе эксплуатации, кроме упругих деформаций, происходит накопление остаточных деформаций (просадки, перекосы, отклонения по уровню). Как следствие, подрельсовое основание становится все более неравноупругим.

Актуальный алгоритм расчетов железнодорожного пути на прочность учитыва-

ет отклонение рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, только как фактор возникновения дополнительной динамической составляющей сил, возникающих при взаимодействии колеса и рельса.

В своих исследованиях А. В. Гречаник [11] предлагает учитывать зоны люфтов, которые образуются вследствие отклонения рельса от прямолинейного положения из-за накопления остаточных деформаций в балластном слое и (или) земляном полотне (просадки, перекосы, пучинные впадины). Величина упругой осадки рельса складывается из величины люфта и упругой осадки подрельсового основания, что в свою очередь влияет на величину упругого отпора и жесткость подрельсового основания. На рис. 1 приведен фрагмент ленты нагрузочного диагностического комплекса СМ-460, иллюстрирующий изменение величин упругих осадок рельсов, шпал и промежуточных креплений. Можно предположить, что неравномерность упругих осадок связана в том числе с наличием люфтов и особенностью упругой работы промежуточных креплений (для случаев, когда в узле происходит размыкание упругой системы и сопротивляемость крепления определяется только упругими свойствами прокладок).

Собственные напряжения в пути

В развитие вопроса о необходимости учета остаточной деформации пути, отступлений по геометрии рельсовой колеи в профиле, в настоящей статье рассмотрим собственные напряжения в пути, не находящиеся под воздействием какой-либо нагрузки, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с учетом допусков и отступлений по его содержанию.

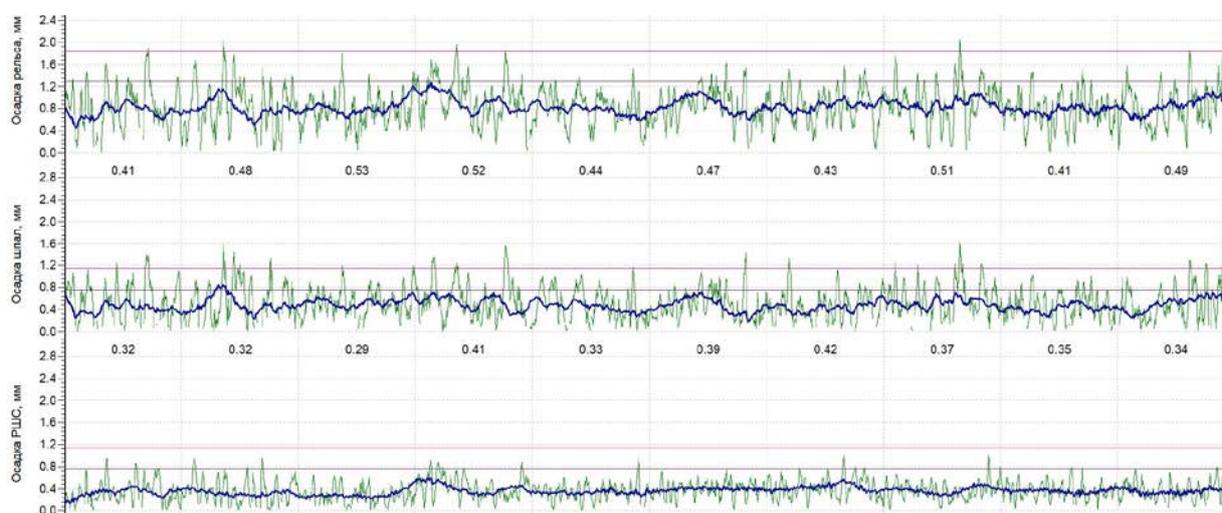


Рис. 1. Фрагмент ленты нагрузочного диагностического комплекса СМ-460

Существующий подход к текущему содержанию железнодорожного пути предусматривает, что обнаруженные просадки или перекосы первой степени устраняются при плановых видах ремонта, второй степени — в плановом порядке в рамках текущего содержания, третьей — в течение трех суток и четвертой — незамедлительно. В зависимости от допускаемой скорости движения поездов величины отклонений по уровню, перекосы и просадки второй степеней варьируется от 12 (для скорости 250 км/ч) до 25 мм (для скорости 60 км/ч).

В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным.

Рассмотрим неровность глубиной $f = 0,02$ м и $f = 0,01$ м и длиной $l = 4$ м. Кривизна рельса посередине неровности соответствует кривизне дуги круговой кривой, имеющей хорду и стрелу изгиба $f = 0,02$ м и $f = 0,01$ м.

Напряжения изгиба (σ) в рельсах типа Р65:

$$\text{при } f = 0,02 \text{ м: } \sigma = 1707 \text{ кг/см}^2$$

$$\text{при } f = 0,01 \text{ м: } \sigma = 854 \text{ кг/см}^2$$

Необходимо учитывать, что если изогнутый книзу в вертикальной плоскости рельс, лежащий в пути, выпрямляется подъемкой в этом месте шпала на балласт с соответствующим уплотнением последнего, то выпрямленный рельс, стремясь вернуться в свое первоначально-изогнутое положение, давит на шпалы и балласт, дополнительно сжимая последний. Этого может оказаться достаточно, чтобы в совокупности с давлением от поездной нагрузки выдавливать балласт из-под шпал и дать возможность рельсу постепенно восстанавливать свою искривленную форму.

Авторами статьи проведен анализ накопления остаточных деформаций (просадки, перекосы) участка железнодорожного пути за 20 месяцев. Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что просадки и другие местные нарушения геометрии пути неоднократно и достаточно быстро появляются после их устранения в тех же местах.

При повышении погонной массы рельсов величина собственных напряжений от вертикальных неровностей также увеличивается. Первоначально при появлении вертикальной неровности вследствие осадки балластного слоя или земляного полотна рельсы находятся в напряженном состоянии в результате изгиба, то есть стремятся распрямиться. С течением времени происходит релаксация этих постоянно действующих напряжений, тем меньшая и тем медленнее, чем больше содержания углерода в рельсовой стали [13]. Указанную информацию необходимо учитывать при сохраняющейся тенденции повышения твердости рельсовой стали.

Следует отметить, что учет собственных напряжений в рельсах, возникающих при эксплуатации пути с отступлениями, необходим при нормировании допустимой деформации равномерного морозного пучения, определении сроков устранения отступлений второй и третьей степеней, в особенности при применении бесстыковой конструкции железнодорожного пути, в рельсовых плетях которой возникают значительные продольные температурные силы.

Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса

При эксплуатации железнодорожного пути в условиях наличия отступлений рельсовой колеи по уровню вначале рельсы находятся в напряженном состоянии, то есть стремятся распрямиться, далее происходит релаксация напряжений.

С точки зрения теории устойчивости стержней переход рельса из устойчивого прямолинейного состояния в устойчивое криволинейное можно назвать потерей устойчивости. Величину нагрузки, при ко-

торой происходит потеря устойчивости, предлагается называть критической.

Потеря устойчивости рельса в случае наличия просадки, перекоса, пучины (остаточные деформации балластного слоя, земляного полотна) повлечет за собой перераспределение усилий во всей конструкции железнодорожного пути и изменение напряжений от подвижной нагрузки в самих рельсах, в узлах промежуточных скреплений, балластной призме и т. д. Под воздействием нагрузки от подвижного состава в сечениях рельсовой нити возникают три внутренних силовых фактора: продольная сила N , поперечная сила Q и изгибающий момент M .

Моделирование просадки рельса глубиной 16 мм на длине 6 м показывает, что максимальные напряжения, возникающие в криволинейном рельсе, на 37 % больше, чем при воздействии нагрузки на прямолинейный рельс (рис. 2).

При потере устойчивости, то есть изменении геометрического очертания рельсовой нити, в том числе изменяются характеристики сопротивляемости рельсовой стали под воздействием циклических контактных нагрузок, что снижает долговечность рельса в процессе его эксплуатации.

Поэтому с точки зрения практических расчетов критическая сила должна рассматриваться как разрушающая нагрузка. Сохранение исходного (расчетного прямолинейного) равновесного состояния рельса является важной задачей при определении подходов к текущему содержанию железнодорожного пути, сроков устранения выявленных отступлений в геометрии рельсовой колеи, в расчетах железнодорожного пути на прочность и устойчивость при установлении допустимых действующих напряжений.

ТАБЛИЦА 1. Количество выявленных отступлений от нормативов по геометрии рельсовой колеи (перекосы, просадки)

Расстояние, м	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
220–230					1	1							1							
230–240					1	1														
240–250																	1		1	
250–260			1	2	2	1	1	1		1		1	2	1	1	1	1	2		1
260–270	1	1			1	2	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1		2	1
270–280				1																
280–290	1		1	2		1	1	2	1				2	1						
290–300						1														
300–310					1					1			2							
310–320						1								2	1		1			
320–330				1									1		1					1
330–340																				
340–350															1					
350–360																				
360–370															1					

Для определения критической нагрузки, при которой произойдет потеря устойчивости рельса в вертикальной плоскости, можно применить известные теоретические методы: энергетический, интегральных уравнений, дифференциальных уравнений.

Основной задачей теории устойчивости применительно к расчету вертикальных неровностей железнодорожного пути может являться определение критического значения внешних сил и ограничение их величин таким образом, чтобы исключить возможность потери прямолинейной устойчивости рельса в различных условиях эксплуатации.

Как указывалось выше, потеря устойчивости рельса повлечет за собой перераспределение усилий во всей конструкции железнодорожного пути и может увеличить

напряжение в узлах промежуточных скреплений, балластной призме и т. д. Анализ данных видеоаналитики и лент вагонов-путеизмерителей показывает, что неудовлетворительное состояние геометрии рельсовой колеи в вертикальной плоскости интенсифицирует образование дефектов рельсов. На рис. 3 изображен фрагмент ленты вагона-путеизмерителя, явно иллюстрирующий наличие дефектов рельсов на участках с отступлениями от норм содержания рельсовой колеи:

— просадка рельсовой нити (правая), три отступления (2-я степень), 13–16 мм на длине 3–6 м;

— перекося, одно отступление (3-я степень), 20 мм на длине 20 м, три отступления (2 степени) 11–12 мм на длине 9–18 м.

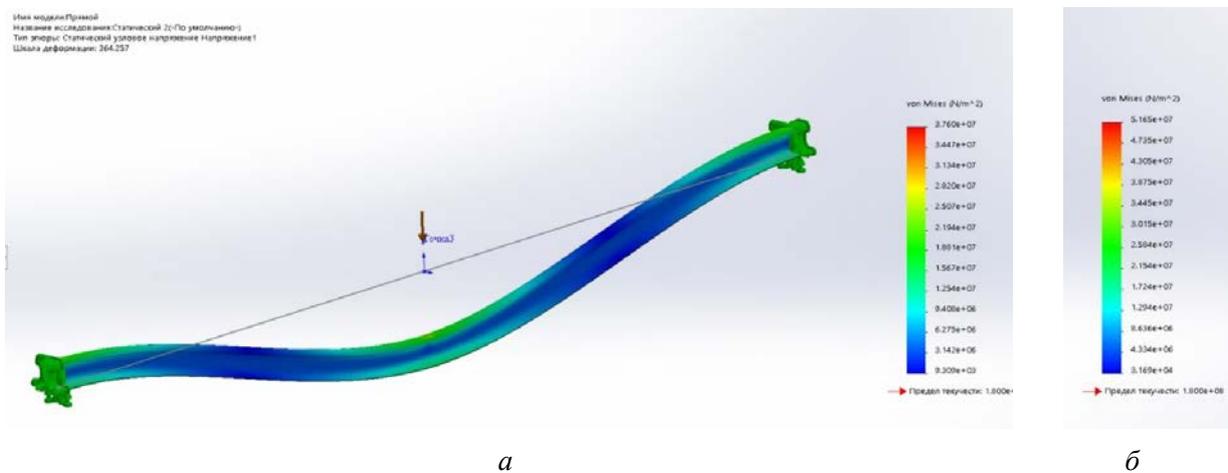


Рис. 2. Напряжения в рельсе при нагружении (отсутствие отклонений от уровня (а), отклонение от уровня (б) вследствие образования просадки глубиной 16 мм на длине 6 м

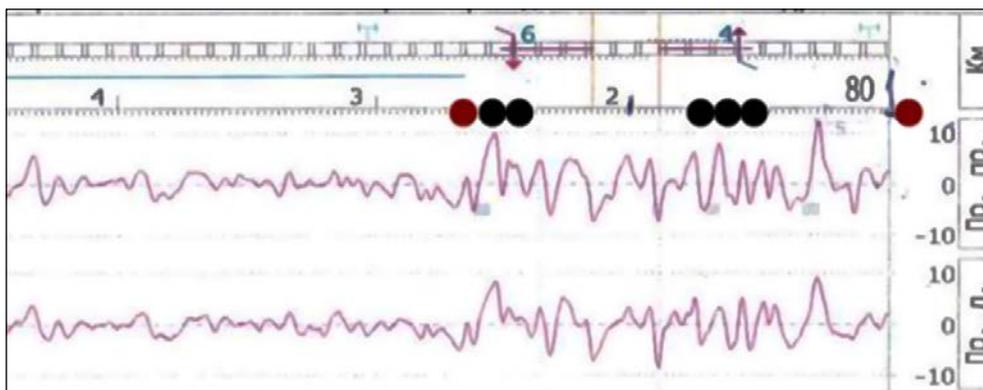


Рис. 3. Дефекты и деформации железнодорожного пути на участках с отступлениями от норм содержания по геометрии рельсовой колеи
 ● — превышение конструктивной величины стыковых зазоров;
 ● — поверхностный дефект рельса

Заключение

На взаимодействие пути и подвижного состава оказывают немалое влияние подходы к содержанию железнодорожного пути. В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают собственные напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным.

Собственные напряжения существенно изменяют работу железнодорожного пути под циклической нагрузкой. Одна и та же нагрузка от воздействия подвижного состава в таких случаях вызывает различные деформации пути в зависимости от предварительного его напряжения.

При эксплуатации железнодорожного пути в условиях наличия отступлений рельсовой колеи по уровню вначале рельсы

находятся в напряженном состоянии, то есть стремятся распрямиться, далее происходит релаксация напряжений. С точки зрения теории устойчивости стержней данный переход можно назвать потерей устойчивости. Величину нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости, предлагается называть критической.

Основной задачей теории устойчивости применительно к расчету вертикальных неровностей железнодорожного пути может являться определение критического значения внешних сил и ограничение их величин таким образом, чтобы исключить возможность потери устойчивости рельсовой нити в различных эксплуатационных режимах.

Библиографический список

1. Правила производства расчетов железнодорожного пути на прочность // Литограф, издательство МПС, 1954.
2. Вериго М. Ф. Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность // Труды ВНИИЖТ (выпуск № 466). М.: Транспорт, 1972. 192 с.
3. Гасанов А. И. О приведенной массе пути // Вестник ЦНИИ МПС (выпуск № 6). 1968. С. 52–53.
4. Медель В. Б. Взаимодействие электровоза и пути // М.: Трансжелдориздат, 1956. 335 с.
5. Попов А. А. К вопросу о динамическом воздействии колеса на рельс при прохождении неровности пути // Труды ЦНИИ МПС (выпуск № 33). 1949.
6. Шмидт К. М. Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом: сб. НИИ пути и путевого хозяйства. М.: Трансжелдориздат, 1941. С. 87–109.
7. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. МПС РФ № ЦПТ–52/14 от 16.06.2000 г. Москва, 2000. 40 с.
8. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.
9. Данилов В. Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом // М.: Трансжелдориздат, 1961. 70 с.
10. Данилов В. Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка // Труды ВНИИЖТ (выпуск 70). 1973. С. 43–59.
11. Гречаник А.В. Оценка влияния жесткости пути и рессорного подвешивания тележек на развитие остаточных деформаций пути: автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2011.
12. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р.
13. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Трансжелдориздат, 1961. 615 с.

Дата поступления: 05.04.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна — канд. техн.

наук, доцент; chernyaeva@pgups.ru

ШЕХТМАН Евгений Иосифович —

докт. воен. наук, профессор;

director@sptgt.ru

ЧЕРНЯЕВ Евгений Владимирович — канд. техн.

наук, доцент; chernyaev@pgups.ru

ИВАНОВ Андрей Игоревич — студент;

andrey.ivanov.pgups@mail.ru

Self-stresses in the rails arising as a result of the operation of the railway track with deviations in its content

V. A. Chernyaeva, E. I. Shehtman, E. V. Cherniaev, A. I. Ivanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Chernyaeva V. A., Shehtman E. I., Cherniaev E. V., Ivanov A. I. Self-stresses in the rails arising as a result of the operation of the railway track with deviations in its content // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 440–448 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-440-448

Abstract

Purpose: approaches to the maintenance of the railway track play a significant role in the interaction between the track and the rolling stock. The analysis [1–10] shows that existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track have not completely resolved the issues of taking into account the residual deformation of the track, which does not allow us to have the most complete understanding of the ongoing interactions and processes between the railway track and the rolling stock in real operating conditions. In developing the issue of the need to take into account the residual deformation of the track, deviations in the geometry of the rail track in the profile, the article considers the “intrinsic” stresses in the track that are not under the influence of any load, arising as a result of the operation of a railway track with deviations in its contents. **Methods:** statistical analysis of the accumulation of residual deformations of a section of the railway track, review of existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track, simulation modeling of the stress-strain state of the rail. **Results:** an analysis of the accumulation of residual deformations of a section of the railway track, a review of existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track, modeling of the stress-strain state of a rail under load in two states (straight beam, curved beam) were carried out. **Practical significance:** the results can be applied when solving the problem of interaction between rolling stock and the railway track.

Keywords: railway track, superstructure of the track, rail, calculation of the railway track, own stresses, subsidence of the railway track.

References

1. Pravila proizvodstva raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' // Litograf, izdatel'stvo MPS, 1954. (In Russian)
2. Verigo M. F. Dinamicheskie issledovaniya puti i korektirovka pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' // Trudy VNIIZHT (vypusk № 466). M.: Transport, 1972. 192 s. (In Russian)
3. Gasanov A. I. O privedennoj masse puti // Vestnik CNII MPS (vypusk № 6). 1968. S. 52–53. (In Russian)
4. Medel' V. B. Vzaimodejstvie elektrovoza i puti // M.: Transzheldorizdat, 1956. 335 s. (In Russian)
5. Popov A. A. K voprosu o dinamicheskom vozdejstvii kolea na rel's pri prohozhdenii nerovnosti puti // Trudy CNII MPS (vypusk № 33). 1949. (In Russian)
6. Shmidt K. M. Vliyanie massy puti na deformatsiyu ego pri udare kolea s podressorennym gruzom: sb. NII puti i putevogo hozyajstva. M.: Transzheldorizdat, 1941. S. 87–109. (In Russian)
7. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. MPS RF № CPT–52/14 ot 16.06.2000 g. Moskva, 2000. 40 s. (In Russian)

8. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 22.12.2017 № 2706r. (In Russian)

9. Danilov V. N. Zheleznodorozhnyj put' i ego vzaimodejstvie s podvizhnym sostavom // M.: Transzheldorizdat, 1961. 70 s. (In Russian)

10. Danilov V. N. Raschet rel'sovoj niti v zone styka // Trudy VNIIZHT (vypusk 70). 1973. S. 43–59. (In Russian)

11. Grechanik A.V. Ocenka vliyaniya zhestkosti puti i resornogo podveshivaniya telezhek na razvitie ostatochnyh deformacij puti: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk, 2011. (In Russian)

12. Instrukciya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti, utverzhennaya rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 14.11.2016 № 2288r. (In Russian)

13. Shahunyanc G. M. Zheleznodorozhnyj put'. M.: Transzheldorizdat, 1961. 615 s. (In Russian)

Received: 05.04.2024

Accepted: 13.05.2024

Author's information:

Victoria A. CHERNYAEVA — PhD in Engineering, Associate Professor;

chernyaeva@pgups.ru

Evgenii I. SHEHTMAN — Dr. Sci. of Military, Professor; director@sptgt.ru

Evgenii V. CHERNYAEV — PhD in Engineering, Associate Professor;

chernyaev@pgups.ru

Andrei I. IVANOV — student;

andrey.ivanov.pgups@mail.ru