

Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути

М. М. ЖЕЛЕЗНОВ¹, В. О. ПЕВЗНЕР², В. П. СОЛОВЬЕВ³, А. В. АНИСИН³, И. М. АНИСИНА³,
С. С. НАДЕЖИН³, И. В. ТРЕТЬЯКОВ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

³ Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»), Саров, 607188, Россия

Аннотация. Проведенные в 2014–2016 гг. испытания по воздействию на путь поездов массой от 2000 до 8000 т при осевых нагрузках вагонов 230,5, 245,3, 264,9 кН и движении с различными скоростями позволили установить зависимость роста вертикальных сил, действующих на рельс, от длительности и частоты приложения нагрузки. На базе полученных результатов была разработана математическая модель, описывающая эффект усиления воздействия вагонов на путь при увеличении длительности приложения нагрузки, позволяющая проводить расчеты для различных характеристик основания.

Ключевые слова: воздействие на путь; вертикальные силы; длительность, частота приложения нагрузки

Введение. При испытаниях по воздействию на путь вагонов существующих и новых конструкций обычно ограничиваются вычислением средних значений вертикальных сил, действующих на рельс, их среднеквадратических отклонений и максимальных величин [1, 2]. В середине 70-х гг. прошлого века предпринимались попытки оценить влияние интенсивности движения поездов на расстройство пути [3]. В то же время, как показывает опыт зарубежных исследований по оценке влияния увеличения массы поездов на показатели воздействия этих составов на путь, рост массы и длины составов приводит к повышению интенсивности расстройств пути, а в ряде случаев — к необходимости ограничения скорости движения [4, 5, 6].

В 2014–2016 гг. на участке Ковдор — Пинозеро Октябрьской железной дороги были проведены испытания по воздействию на путь вагонов с осевыми нагрузками 245,3 и 264,9 кН в сравнении со стандартными вагонами с осевой нагрузкой 230,5 кН. Программа испытаний предусматривала поездки по пяти опытным участкам пути с одинаковой конструкцией верхнего строения, но различными параметрами земляного полотна. Составы для экспериментальных поездов были сформированы из типовых полувагонов

на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230,5 кН и из вагонов 12-9828 на тележках 18-9800 с осевыми нагрузками 245,3 и 264,9 кН. Последовательное увеличение массы поездов от 2000 до 8000 т (по 2000 т) и различные скорости движения позволили оценить влияние длительности и частоты приложения нагрузки на силы, действующие на путь в вертикальной плоскости.

Результаты исследований. Результаты испытаний по воздействию на путь всех осей каждого поезда при обработке были сгруппированы по блокам в соответствии с массой поезда, по которым определялись средние значения искомых зависимостей.

Для примера на рис. 1 представлена зависимость средних значений вертикальных сил, действующих на рельс на одном из опытных участков, от массы поезда с учетом формирования состава из вагонов с осевыми нагрузками 230,5, 245,3, 264,9 кН. (Работу по регистрации вертикальных сил проводили специалисты отделения «Путь и путевое хозяйство» АО «ВНИИЖТ».)

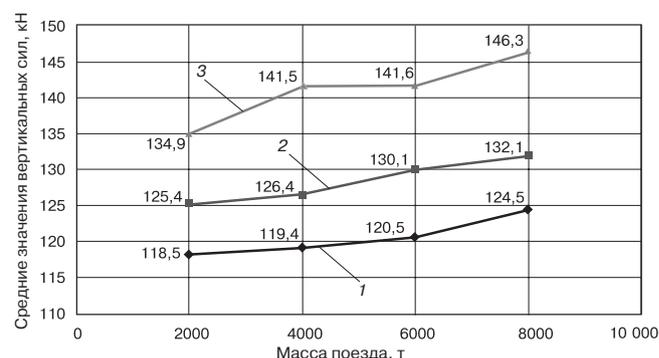


Рис. 1. Зависимость средних значений вертикальных сил, действующих на рельс, от массы поезда на одном из опытных участков при осевой нагрузке: 1 — 230,5 кН; 2 — 245,3 кН; 3 — 264,9 кН

Fig. 1. Dependence of average values of the vertical forces acting on the rail, on the mass of the train at one of the experimental sites with axial load: 1 — 230.5 kN; 2 — 245.3 kN; 3 — 264.9 kN

■ E-mail: vpevzner@list.ru (В. О. Певзнер)

Таблица 1

Оценка влияния длительности приложения нагрузки
 $P_{oc} = 245,3$ кН на одном из опытных участков

Table 1

Evaluation of the influence of duration
of the load application $P_{oc} = 245.3$ kN on one of the experimental sites

Масса поезда, т	Длина поезда, м	Скорость, м/с	Длительность нагрузки, с	Средние значения вертикальных сил, кН
2000	240	13,32	18	123,01
4000	480	13,68	35,1	123,99
6000	720	13,2	54,5	127,63
8000	960	12,51	76,6	129,59

Таблица 2

Зависимость роста средних значений вертикальных сил (%)

Table 2

Dependence of the growth of the average values of the vertical forces (%)

Осевая нагрузка, кН	Рост сил при массе поездов, т		
	4000	6000	8000
230,5	1–2%	2–3%	5–7%
245,3	1–2%	4–6%	6–8%

В табл. 1 представлены средние значения вертикальных сил от всех осей каждого поезда в зависимости от длительности действия нагрузки для состава из вагонов с осевой нагрузкой 245,3 кН.

Данные по увеличению средних значений вертикальных сил, действующих на путь, относительно поезда массой 2000 т по всем пяти опытным участкам при осевой нагрузке 245,3 кН представлены в табл. 2.

По исследованиям ряда авторов [7, 8, 9, 10] накопление расстройств пути пропорционально росту средних значений вертикальных сил, действующих на путь, в степени с показателями 2–4.

В табл. 3 представлен прогноз расстройств пути в зависимости от массы поезда (длительности приложения нагрузки) по данным о росте сил из табл. 2 при использовании степеней зависимости с показателями 2–4.

Экспериментальные данные о величинах вертикальных сил под движущимися с различными скоростями составами разной массы позволили определить влияние частоты приложения нагрузки на уровень сил. На графике (рис. 2) для примера приведены средние значения вертикальных сил (кН) в зависимости от частоты приложения нагрузки для составов массой 6000 т с осевой нагрузкой вагонов 245,3 кН. На этот же график нанесена точка по данным, полученным в ходе испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» при движении поезда со скоростью 70 км/ч (7,4 цикла/с).

Таблица 3

Рост расстройств пути в зависимости от увеличения массы поезда
(длительности приложения нагрузки)

Table 3

Growth of track failures, depending on the increase in train mass
(duration of load application)

Осевая нагрузка, кН	Рост расстройств пути в зависимости от массы поезда (длительности нагрузки), % (числитель — степень 2, знаменатель — степень 4)		
	4000	6000	8000
230,5	3/6	5/10	12/26
245,3	3/6	10/21	14/31
264,9	9/13	11/24	16/34

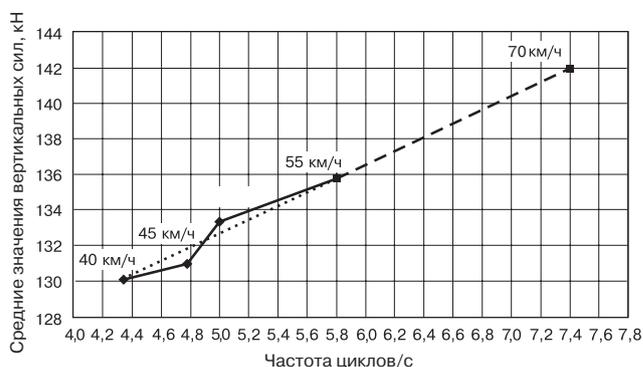


Рис. 2. Зависимость средних значений вертикальных сил от частоты приложения нагрузки для составов массой 6000 т с осевой нагрузкой 245,3 кН

Fig. 2. Dependence of average values of vertical forces on the frequency of load application for trains weighing 6000 tons with an axial load of 245.3 kN

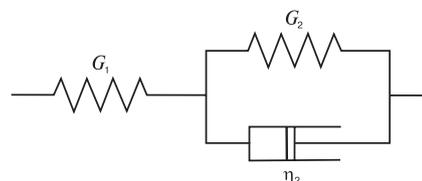


Рис. 3. Модель стандартного твердого тела: G_1 и G_2 — модули упругости, МПа; η_2 — коэффициент вязкости, МПа·с

Fig. 3. Standard solid model: G_1 and G_2 — modulus of elasticity, MPa; η_2 — viscosity coefficient, MPa·s

Для возможности обобщения результатов проведенных испытаний и их применения к другим условиям эксплуатации была разработана и верифицирована математическая модель [11], описывающая эффект усиления воздействия вагонов на путь при увеличении длительности приложения нагрузок. Модель соответствует реологической модели стандартного твердого тела с последовательно соединенными упругими и вязкоупругими элементами (рис. 3). Определены параметры этой реологической модели для данного участка: $G_1 = 41$ МПа, $G_2 = 17$ МПа, $\eta_2 = 5670$ МПа·с.

Для случая циклического нагружения получено аналитическое выражение, описывающее динамику деформирования и релаксации пути:

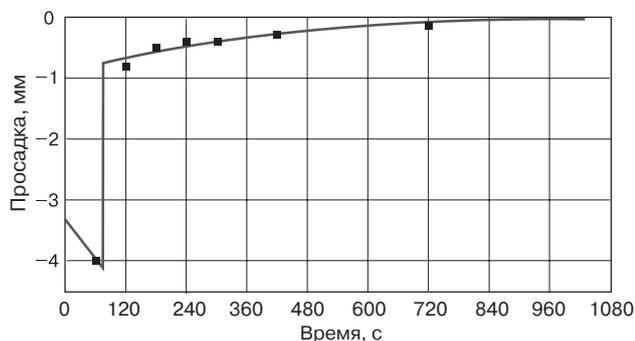


Рис. 4. Аналитическое решение по модели стандартного твердого тела (линия) и экспериментальные данные (квадраты)
 Fig. 4. Analytical solution using standard solid model (line) and experimental data (squares)

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{G_1 + G_2}{G_1 \eta_2} - \frac{\tau_2}{G_1} \right) \left[\frac{1}{\tau_2} (1 - \exp(-\tau_2 t)) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\tau_2^2 + (2\pi N / T)^2} \left(\tau_2 \cos\left(\frac{2\pi N t}{T}\right) + \frac{2\pi N}{T} \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \sin\left(\frac{2\pi N t}{T}\right) - \tau_2 \exp(-\tau_2 t) \right) \right] + \frac{1}{G_1} (\sigma(t) - \sigma(0)) \exp(-\tau_2 t); \\ \varepsilon_r(t) &= \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{G_1 + G_2}{G_1 \eta_2} - \frac{\tau_2}{G_1} \right) \left[\frac{1}{\tau_2} - \frac{\tau_2}{\tau_2^2 + (2\pi N / T)^2} \right] \times \\ &\quad \times (1 - \exp(-\tau_2 T)) \exp(\tau_2 (T - t)), \end{aligned}$$

где $\tau_2 = G_2 / \eta_2$ — характерное время релаксации напряжений, (1/с); σ_0 — нагрузка на грунтовое основание от одной оси; N — число пропущенных осей; T — время прохождения поезда; t — время от начала прохода поезда, т. е. от того момента, когда нагрузка на данную шпалу стала ненулевой; $\varepsilon(t)$ — деформация подбалластного основания пути при прохождении поезда ($t < T$); $\varepsilon_r(t)$ — релаксация пути после прохождения поезда ($t > T$); $\sigma(t)$ — синусоидальное по времени задание поезда, определяется по выражению

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi N t}{T}\right) \right), & 0 < t < T \\ 0, & t \notin [0, T] \end{cases}$$

На рис. 4 приведено сравнение аналитического решения об осадке пути по уровню головки рельса с экспериментальными данными. Как видно из представленных данных, наблюдается удовлетворительное согласие расчетного решения с результатами экспериментов.

В дальнейшем планируется использовать эту модель для оценки накопления деформаций пути при различных характеристиках основания и вариантах поезда нагрузки.

Заключение. Полученные результаты позволяют констатировать, что накопление расстройств пути зави-

сит не только от уровня осевой нагрузки и массы поезда, но и от длительности приложения и частоты нагрузки.

Данная работа выполнена в рамках проекта ориентированных фундаментальных исследований Российского фонда фундаментальных исследований по актуальным междисциплинарным темам в интересах ОАО «РЖД» (конкурс офи-м-РЖД № 17-20-01152 «Научное обоснование методов определения физико-математических закономерностей развития деформаций пути в зависимости от частотного состава и длительности приложения нагрузки применительно к пропуску тяжеловесных поездов различной длины и с различными скоростями, сформированных из вагонов с повышенными осевыми нагрузками»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытания по определению взаимодействия на путь инновационных вагонов с осевой нагрузкой 25 тс в условиях Западно-Сибирской железной дороги / О. А. Суслов [и др.] // Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах: сб. тр. ученых АО «ВНИИЖТ» / под ред. А. Ю. Абдурашитова. М., 2017. С. 87–100.
2. Грачёва Л. О., Певзнер В. О., Анисимов П. С. Показатели динамики и воздействие на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта. 1976. Вып. 549. С. 4–25.
3. Кистанов А. И. Особенности работы железнодорожного земляного полотна в условиях повышенной интенсивности движения поездов // Труды / Уральский электромеханический ин-т инженеров ж.-д. транспорта. 1977. Вып. 56. С. 36–40.
4. Hongyan Zh. Dynamic Interact Heavy Haul Railways on Track Structures. Chinese Railways. 2005. No. 1. P. 38–42.
5. Маковский Г. Анализ математической модели земляного полотна железнодорожного пути // Железные дороги мира. 1981. № 2. С. 59–78.
6. Smith K. Meeting China's burning desire for coal // International Railway Journal. 2013. No. 8. P. 24–28.
7. Eisenmann J. Zuverlässigkeit des Oberbaues als Voraussetzung für hohe Betriebsqualität. Eisenbahntechnische Rundschau. 1989. No. 7/8. S. 495–497.
8. Чирков Н. С., Кустов Ф. К. Учитывать осевые нагрузки // Путь и путевое хозяйство. 1991. № 1. С. 44.
9. Лысюк В. С. Методика расчета эквивалентных поезда нагрузки на путь // Вестник ВНИИЖТ. 1973. № 5. С. 17–21.
10. Лысюк В. С. Накопление остаточных деформаций в пути // Путь и путевое хозяйство. 1973. № 10. С. 44.
11. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред: учеб. пособие. М.: Мир, 1974. 319 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖЕЛЕЗНОВ Максим Максимович,

д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника управления научно-исследовательской работы, ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

ПЕВЗНЕР Виктор Ошеревич,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

СОЛОВЬЕВ Вячеслав Петрович,

д-р физ.-мат. наук, научный руководитель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», директор Института теоретической и математической физики (ИТМФ)

АНИСИН Андрей Владимирович,

канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»

АНИСИНА Инга Михайловна,
научный сотрудник, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»

НАДЕЖИН Сергей Станиславович,
старший научный сотрудник, начальник лаборатории,
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»

ТРЕТЬЯКОВ Иван Владимирович,
научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 27.08.2018 г., принята к публикации
09.11.2018 г.

Influence of duration and frequency of load application on the stress-strain state of the track

M. M. ZHELEZNOV¹, V. O. PEVZNER², V. P. SOLOV'EV³, A. V. ANISIN³, I. M. ANISINA³, S. S. NADEZHIN³, I. V. TRET'YAKOV²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

² Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

³ Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – Russian Research Institute of Experimental Physics" (FSUE "RFNC – VNIIEF"), Sarov, 607188, Russia

Abstract. In 2014–2016 on the Kovdor–Pinozero section of Oktyabrskaya Railway tests were carried out on the impact of cars with axial loads of 245.3 and 264.9 kN on the track in comparison with standard cars with an axial load of 230.5 kN. Test program included trips to five experimental sections of the track with the same construction of the track superstructure, but different parameters of the road bed. Tests carried out on the impact on the track of trains weighing from 2000 to 8000 tons at different axial loads of cars and moving at different speeds made it possible to estimate the dependence of the growth of vertical forces acting on the rail on the duration and frequency of load application. Work on the registration of vertical forces was carried out by the specialists of the Department "Tracks and track facility" of the JSC "VNIIZhT". On the basis of the results obtained, a mathematical model was developed that describes the effect of increasing the impact of railcars on the track as the load application increases, allowing calculations for various characteristics of the base. In the future, it is planned to use this model to estimate the accumulation of deformations of the track with different characteristics of the base and variants of train load. Obtained results allow stating that the accumulation of track failures depends not only on the level of the axial load and the mass of the train, but also on the duration and frequency of the load application.

The work was carried out within the framework of the project of oriented fundamental research of the Russian Foundation for Basic Research on current interdisciplinary topics in the interests of JSC "Russian Railways" (ofi-m-RZhD competition No. 17-20-01152 "Scientific substantiation of methods for determining physical and mathematical patterns of track deformation development in dependence on the frequency composition and duration of load application in relation to the passage of heavy haul trains of various lengths and at different speeds, formed from cars with increased axial loads").

Keywords: impact on track; vertical forces; duration and frequency of load application

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-364-367>

REFERENCES

1. Suslov O. A. et al. *Ispytaniya po opredeleniyu vzaimodeystviya na put' innovatsionnykh vagonov s osevoy nagruzkoy 25 ts v usloviyakh Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi* [Tests to determine the interaction on the track of innovative cars with an axial load of 25 tons in the conditions of the West-Siberian railway]. Osobennosti sistemy vedeniya rel'sovogo khozyaystva na rossiyskikh zheleznykh dorogakh. Sb. tr. uchenykh AO "VNIIZhT" [Features of the system of rail management on the Russian railways. Coll. of works of scientists of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, 2017, pp. 87–100.

2. Gracheva L. O., Pevzner V. O., Anisimov P. S. *Pokazateli dinamiki i vozdeystvie na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhok i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti* [Indicators of the dynamics

and impact on the track of four-axle freight cars with different wear of bogies and deviations from the standards of content in straight sections of the track]. *Trudy Vsesoyuz. nauch.-issled. in-ta zh.-d. transporta* [Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Railway of Transport]. 1976, Vol. 549, pp. 4–25.

3. Kistanov A. I. *Features of the work of the railway roadbed in conditions of increased train traffic*. Proceedings of the Ural Electro-mechanical Institute of Railway Engineers, 1977, Iss. 56, pp. 36–40.

4. Hongyan Zh. *Dynamic Interact Heavy Haul Railways on Track Structures*. Chinese Railways, 2005, no. 1, pp. 38–42.

5. Makovskiy G. *Analysis of the mathematical model of the road bed track*. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 1981, no. 2, pp. 59–78.

6. Smith K. *Meeting China's burning desire for coal*. *International Railway Journal*, 2013, no. 8, pp. 24–28.

7. Eisenmann J. *Zuverlässigkeit des Oberbaues als Voraussetzung für hohe Betriebsqualität*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 1989, no. 7/8, pp. 495–497.

8. Chirkov N. S., Kustov F. K. *Take into account axial loads*. *Railway Track and Facilities*, 1991, no. 1, p. 44.

9. Lysyuk V. S. *Method of calculating the equivalent train loads on the track*. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1973, no. 5, pp. 17–21.

10. Lysyuk V. S. *Accumulation of residual deformations on the track*. *Railway Track and Facilities*, 1973, no. 10, p. 44.

11. Maze G. *Theory and problems of continuum mechanics*. Textbook. Moscow, Mir Publ., 1974, 319 p.

ABOUT THE AUTHORS

Maksim M. ZHELEZNOV,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Administration on design and research works, FGBOU VO RUT (MIIT)

Viktor O. PEVZNER,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Vyacheslav P. SOLOV'EV,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academic Supervisor of the FSUE "RFNC – VNIIEF", Director of the Institute of Theoretical and Mathematical Physics (ITMF)

Andrey V. ANISIN,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory,
FSUE "RFNC – VNIIEF"

Inga M. ANISINA,
Researcher, FSUE "RFNC – VNIIEF"

Sergey S. NADEZHIN,
Senior Researcher, Head of the Laboratory, FSUE "RFNC – VNIIEF"

Ivan V. TRET'YAKOV,
Researcher, JSC "VNIIZhT"

Received 27.08.2018

Accepted 09.11.2018

E-mail: vpevzner@list.ru (V. O. Pevzner)