УДК 625.14

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-183-187

Оценка срока службы безбалластной конструкции пути

С.В. МИХАЙЛОВ

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

Аннотация. Приводится метод расчета срока службы безбалластной конструкции пути с использованием модели колебаний пути как трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера. Применение данной модели обусловлено необходимостью проведения расчета для несущей бетонной плиты, разрушения в которой являются основной причиной выхода из строя безбалластной конструкции пути. Проведена оценка срока службы безбалластной конструкции пути для различных условий эксплуатации и представлено сравнение этих данных с результатами, полученными при помощи метода с использованием модели однослойной балки. Построены графики зависимости срока службы безбалластной конструкции пути от нагрузок на ось, скорости движения экипажей и грузонапряженности на линии. Сделаны выводы о применимости модели однослойной балки для оценки срока службы безбалластной конструкции пути в текущих условиях эксплуатации и целесообразности использования предложенного в статье способа для перспективных условий высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Ключевые слова: вертикальные динамические силы; спектральная плотность; прогибы; напряжения; срок службы; моделирование; модель трехслойной балки; безбалластные конструкции пути

ведение. В настоящее время перед железнодо-Врожным транспортом России стоит задача развития высокоскоростного и тяжеловесного движения [1, 2, 3, 4, 5]. В условиях роста скорости движения и нагрузок на ось встает вопрос о целесообразности применения новых конструкций пути. В мировой практике широко используются безбалластные конструкции пути (БКП) [6, 7, 8, 9]. При этом испытания и исследования, проведенные в условиях российских железных дорог [10, 11], показали техническую возможность применения как балластной, так и безбалластной конструкций пути. Таким образом, крайне актуальной является задача выбора предпочтительной конструкции с точки зрения экономической целесообразности [10, 11, 12], для решения которой требуется оценка срока службы БКП.

Проведение натурных испытаний БКП довольно затруднительно из-за необходимости выбора подходящих условий эксплуатации. При этом данные испытания требуют значительных финансовых затрат, связанных с высокой стоимостью строитель-

■ E-mail: mikhailov.sergey@vniizht.ru (С.В. Михайлов)

ства БКП [13]. Существует метод, позволяющий по результатам испытаний на опытном полигоне оценить срок службы БКП в условиях действующей линии. В основе этого метода заложена модель колебаний пути как трехслойной балки, лежащей на модифицированном основании Винклера [13]. Ее выбор обусловлен необходимостью проведения расчета для несущей бетонной плиты (второй слой), разрушения в которой и являются главной причиной выхода из строя БКП, что подтверждается как отечественными, так и зарубежными исследованиями [10, 14, 15]. Однако на практике для проведения расчетов по данному методу при оценке вертикальных динамических сил, действующих на путь, используется программа ВЭИП [16], в алгоритме которой заложена модель колебаний пути как однослойной балки, что формально является недостаточно строгим [17]. Полученные оценки сроков службы безбалластных конструкций демонстрируют хорошую сходимость с результатами натурных экспериментов, однако их точность для различных условий эксплуатации нуждается в подтверждении. В статье приводится сравнение результатов расчетов, полученных с применением программы ВЭИП и проведенных с использованием модели трехслойной балки, построены графики зависимости срока службы БКП от скорости движения экипажа, нагрузки на ось и грузонапряженности на линии.

Расчет срока службы БКП. В основе метода расчета срока службы БКП на действующей линии по результатам испытаний на опытном полигоне лежит следующая формула [13]:

$$T_1 = T_0 \frac{D_0}{D_1} \frac{\langle P_1 \rangle}{\langle P_0 \rangle} K_t$$

где T_1 — расчетный тоннаж брутто, пропущенный на действующей линии до исчерпания ресурса; T_0 — тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку до исчерпания ресурса, определяется по результатам натурных испытаний; $\langle P_1 \rangle$ — средняя нагрузка на ось на действующей линии; $\langle P_0 \rangle$ — средняя нагрузка на ось на опытном участке; K_t — коэффициент влияния климата, характеризующий увеличение интенсивно-

сти расстройства пути в период оттаивания весной и замерзания осенью; $D_{\rm l}$ — показатель повреждаемости на действующей линии, рассчитывается с учетом планируемых условий эксплуатации; $D_{\rm o}$ — показатель повреждаемости на опытном участке, рассчитывается по результатам натурных экспериментов.

В качестве показателя повреждаемости принимается напряжение во втором слое безбалластной конструкции [13], и его значение рассчитывается по формулам [13, 18]:

$$D_{i} = \left(\left\langle\sigma_{2i}\right\rangle^{2} + \sigma_{\sigma 2i}^{2}\right)^{k/2}, i = 0, 1,$$

где $\langle \sigma_{20} \rangle$ — среднее значение напряжений во втором слое на опытном участке; $\sigma_{\sigma_{20}}$ — среднеквадратическое отклонение напряжений во втором слое на опытном участке; $\langle \sigma_{21} \rangle$ — среднее значение напряжений во втором слое на действующей линии; $\sigma_{\sigma_{21}}$ — среднеквадратическое отклонение напряжений во втором слое на действующей линии; k — эмпирический коэффициент, k = 6.

Средние значения и среднеквадратические отклонения напряжений в слоях конструкции находятся при помощи модели колебаний пути как трехслойной балки [19]:

$$\langle \sigma_i \rangle = \langle Q \rangle \frac{\mathbf{W}_{M_i}^Q(0)}{W_i}, \ i = \overline{1,3};$$

$$\sigma_{\sigma_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^\infty S_{\sigma_{ijj}}(\omega) d\omega \right),$$

где

$$\mathbf{S}_{\sigma_{i}}(\omega) = \frac{\overline{\mathbf{W}}_{M_{i}}^{Q}(\omega)}{W_{i}} \mathbf{S}_{Q}(\omega) \frac{{\mathbf{W}_{M_{i}}^{Q^{T}}(\omega)}}{W_{i}},$$

где $\mathbf{W}_{M_i}^Q(\omega)$ — частотная матрица изгибающих моментов, определяемая при помощи модели колебаний пути как трехслойной балки [16, 19]; n — число осей вагона; $\langle Q \rangle$ — среднее значение вертикальной динамической нагрузки; W_i — момент сопротивления в заданной точке i-го слоя, \mathbf{M}^3 ; $S_{\sigma_{i,y}}(\omega)$ — диагональные элементы

матрицы; $\mathbf{S}_{\sigma_i}(\omega)$ — матрица спектральных плотностей напряжений в i-м слое конструкции; $\overline{\mathbf{W}}_{M_i}^{\mathcal{Q}}(\omega)$ — матрица, комплексно сопряженная к матрице $\mathbf{W}_{M_i}^{\mathcal{Q}}(\omega)$; $\mathbf{W}_{M_i}^{\mathcal{Q}^T}(\omega)$ — матрица, транспонированная к матрице $\mathbf{W}_{M_i}^{\mathcal{Q}}(\omega)$; $\mathbf{S}_{\mathcal{Q}}(\omega)$ — матрица взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь; ω — круговая частота.

Для нахождения матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных динамических сил, действующих на путь, использован метод, предложенный в [17]. Таким образом [17, 20]

$$\mathbf{S}_{o}(\omega) = \overline{\mathbf{W}_{n}(i\omega)}\mathbf{S}_{\Xi}(\omega)\mathbf{W}_{n}(i\omega)^{T},$$

где $\mathbf{W}_p(i\omega)$ — матрица частотных характеристик, связывающая вектор неровностей пути под всеми осями вагона с вектором вертикальных сил, возникающих при движении вагона; $\overline{\mathbf{W}}_p(i\omega)$ — матрица комплексно сопряженная к матрице $\mathbf{W}_n(i\omega)$,

$$\mathbf{W}_{p}(i\omega) = \left[\mathbf{W}^{0}(i\omega) - \mathbf{W}_{z_{1}}^{Q}(0, i\omega) - \frac{1}{C_{\kappa}^{0}}\mathbf{E}\right]^{-1}$$
, где $\mathbf{W}^{0}(i\omega)$ —

частотная характеристика, связывающая вектор динамических сил в контактах колес и рельсов с вектором вертикальных смещений колесных центров, способ ее нахождения в зависимости от типа экипажа рассмотрен в [21], частные случаи для тележки и четырехосного грузового вагона приводятся в [21] и [17] соответственно; $\mathbf{W}_{z_i}^{\mathcal{Q}}(0,i\omega)$ — частотная характеристика прогибов 1-го слоя, находится по формулам, приведенным в [19, 21]; C_{κ}^{0} — контактная жесткость пары колесо — рельс; \mathbf{E} — единичная матрица; $\mathbf{S}_{\underline{z}}(\omega)$ — матрица спектральных плотностей неровностей пути, $\mathbf{S}_{\underline{z}}(\omega) = S_{\underline{\xi}}(\omega)\mathbf{R}$, где $S_{\underline{\xi}}(\omega)$ — спектральная плотность неровности как функции протяженности пути; \mathbf{R} — осциляционная матрица; $\mathbf{W}_{p}(i\omega)^{T}$ — матрица транспонированная к матрице $\mathbf{W}_{a}(i\omega)$.

Проведение расчетов срока службы БКП. Исходные данные для расчета срока службы БКП, испытанной на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные БКП, испытанной на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»

Table 1

Initial data of the ballastless track structure tested on the Test Loop of the JSC "VNIIZhT"

№ слоя	Материал	Толщина, мм	Ширина, мм	Объем в 1 погонном метре, м ³	Плот- ность, кг/м ³	Модуль упругости $E, \mathrm{H/m^2}$	Момент инерции (вертикальный) I , м ⁴	Распределенная приведенная масса <i>m</i> , кг/м
1	Рельс со скреплением	180	_	_	_	0,21 · 1012	0,355·10-4	90
2	Бетонный слой	240	2500	0,6	2300	3,3.1010	0,00144	690
3	Тощий бетон	300	2800	0,84	1800	1,8.1010	0,00315	756
4	ЩПГС	700	7000	4,9	1500	1,7.108	0,2	3675

Таблица 2

Сравнение результатов расчета срока службы БКП с применением однослойной и трехслойной моделей

Table

Comparison of the calculation results of the service life of ballastless track structure using single-layer and three-layer models

Срок	Условия эксплуатации								
службы	Скорость движения, км/ч	80	300	350	400				
БКП	Нагрузка на ось, т/ось	23,5	18	23,5	27				
	Грузонапряженность,	20	30	10	5				
	млн т брутто/км в год								
Однослойная модель			47,4	9,4	10,1				
Трехслойн	30	48,8	9,9	12,1					
Расхожден	0%	3%	5%	20%					

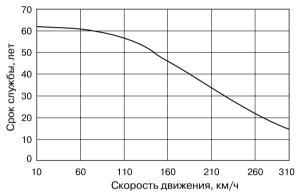


Рис. 1. График зависимости срока службы безбалластной конструкции от скорости движения при нагрузке на ось 23,5 т и грузонапряженности 10 млн т брутго/км в год Fig. 1. Dependence graph of the service life of ballastless structure on the speed with axle load of 23.5 tons and load capacity

of 10 million tons gross/km per year

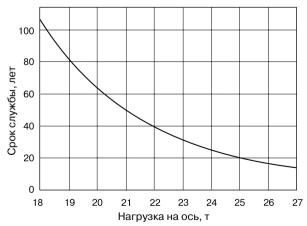


Рис. 2. График зависимости срока службы безбалластной конструкции от нагрузки на ось при скорости движения 80 км/ч и грузонапряженности 20 млн т брутго/км в год

Fig. 2. Dependence graph of the service life of ballastless structure on the axle load at a speed of 80 km/h and load capacity of 20 million tons gross/km per year

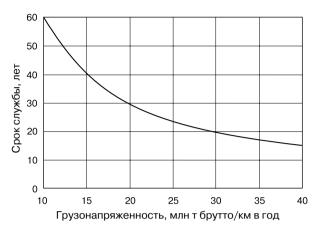


Рис. 3. График зависимости срока службы безбалластной конструкции от грузонапряженности при скорости движения 80 км/ч и нагрузке на ось 23,5 т

Fig. 3. Dependence graph of the service life of ballastless structure on the load capacity at a speed of 80 km/h and axle load of 23.5 tons

Сравнение результатов расчета срока службы безбалластной конструкции с применением однослойной и трехслойной моделей приведены в табл. 2. Параметры вагона, а также спектральные плотности неровностей пути $S_{\xi}(\omega)$, использованные для расчета, приводятся в [22].

Графики зависимостей расчетного значения срока службы безбалластной конструкции от скорости движения, нагрузки на ось и грузонапряженности представлены на рис. 1-3.

Выводы. 1. Разница в результатах расчета срока службы БКП с использованием однослойной и трехслойной моделей для условий Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» при скорости движения 80 км/ч и нагрузке на ось 23,5 т и перспективных условий ВСМ при скорости движения 300 км/ч и нагрузке на ось 18 т составляет не более 3%.

- 2. Для оценки срока службы БКП в текущих условиях эксплуатации возможно использование программы ВЭИП и модели однослойной балки.
- 3. С ростом нагрузок на ось и скоростей движения экипажей расхождение между результатами, полученными при помощи однослойной и трехслойной моделей, существенно увеличивается, что делает целесообразным использование трехслойной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3FSTRUCTURE_ID%3D704%26layer_id%3D5104%26id%3D6396 (дата обращения: 22.12.2018 г.).
- 2. Мишарин А.С. Генеральная схема основа устойчивого развития железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 5. С. 11-14.
- 3. Пехтерев Ф.С. С учетом прогнозов социально-экономического развития страны // Железнодорожный транспорт. 2016. № 5. С. 15-19.

- 4. Гапанович В.А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10—15.
- 5. Петрушенко Г.В. Высокоскоростное движение шаг в будущее России // Экономика железных дорог. 2015. № 10. С. 28—34.
- 6. Giannakos K. Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure // Vossloh AG. 2nd traffic & transportation conference, OSE. Sep. 2004. URL: https://ru.scribd.com/document/46196673/OSE-Speech (дата обращения: 25.12.2018 г.).
- 7. Bilow D. N. Slab track for the next 100 years / Portland Cement Association. Skokie. URL: https://ru.scribd.com/document/97772685/00047 (дата обращения: 27.12.2018 г.).
- 8. Michas G. Slab Track Systems for High-Speed Railways, Division of Highway and Railway Engineering / Royal Institute of Technology. Department of Transport Science. School of Architecture and the Built Environment. Stockholm, 2012. P. 40–43. URL: https://ru.scribd.com/document/222835090/Slab-Track-Design (дата обращения: 07.01.2019 г.)
- 9. Малозатратный безбалластный путь // Железные дороги мира. 2014. № 1. С. 64—66. URL: http://www.zdmira.com/arhiv/2014/zdm-2014-no-1 (дата обращения: 09.01.2019 г.).
- 10. Савин А.В., Разуваев А.Д. Сферы применения безбалластного пути // Техника железных дорог. 2016. № 3. С. 32—41.
 - 11. Савин А. В. Безбалластный путь. М.: РАС, 2017. 192 с.
- 12. Разуваев А.Д., Ципин П.Е. Оценка экономической эффективности строительства безбалластного пути на эстакадах // Экономика железных дорог. 2016. № 2. С. 81-85.
- 13. Коган А.Я., Савин А.Д. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 3—9. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-3-9.
- 14. Савин А. В. Итоги испытаний безбалластного пути // Техника железных дорог. 2017. № 1. С. 26-31.
- 15. Muramoto K., Sekine E., Nakamura T. Roadbed degradation mechanism under ballastless track and its countermeasures //

- QR of RTRI. 2006. Vol. 47. No. 4. P. 222—227. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/47/4/47_4_222/_pdf (дата обращения 05.01.2019 г.).
- 16. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава: описание программы / А.Я. Коган [и др.] // Информационный бюллетень ВНТИ-Центр ГОСФАП. 1985. № 4/67. 40 с.
- 17. Михайлов С.В., Гоник М.М. Вероятностная оценка вертикальных динамических сил, действующих на путь, в модели трехслойной балки при воздействии четырехосного грузового вагона // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т.77. № 2. С. 98—103. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-2-98-103.
- 18. Савин А.В., Михайлов С.В. Экспериментально-теоретический метод определения параметров безбалластного пути // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6. С. 29—39.
- 19. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 326 с.
- 20. Леннинг Дж. Х., Беттин Р. Г. Случайные процессы в задачах автоматического управления. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 388 с.
- 21. Коган А.Я., Никитин Д.А., Полещук И.В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М.: Интекст, 2007. 168 с.
- 22. Коган А.Я., Крепогорский С.С., Шинкарев Б.С. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку / под ред. А.Я. Когана. М.: Транспорт, 1973. 80 с. (Труды ВНИИЖТ; вып. 502).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

МИХАЙЛОВ Сергей Владимирович,

бизнес-аналитик, Центр математического моделирования, AO «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 15.01.2019 г., актуализирована 24.04.2019 г., принята к публикации 05.05.2019 г.

Service life evaluation of ballastless track construction

S. V. MIKHAYLOV

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

Abstract. The article presents method for calculating service life of ballastless track structure using the track oscillation model as a structure containing three infinitely long beams, the lower of which lies on the modified Winkler base, and the upper and middle are based on elastic layers, mainly having the characteristics of Winkler. The use of this model is due to the need to carry out calculation for bearing concrete slab, the destruction of which is the main reason for the failure of the ballastless track structure. First part of the article presents model for calculating service life of a ballastless structure. When calculating the damage index, which takes the stresses in the bearing concrete slab, to estimate the vertical dynamic forces acting on the track, it is proposed to use a frequency response that determines the dynamic system with input on the track unevenness and output on the dynamic force at the wheel and rail contact in the model oscillations of the track as a three-layer beam. Second part presents estimates of the service life of ballastless structure for various operating conditions and their comparison with the results obtained using the practice method with the single-beam model. Graphs were plotted for the service life of the ballastless track structure on axle loads, the speed of the carriages and the load capacity on the line. Results show the applicability of the single-layer beam model for estimating the service life of the ballastless track structure in the current operating conditions; however, for the promising conditions of high-speed and heavy traffic, it is advisable to use a three-layer model.

Keywords: vertical dynamic forces; spectral density; deflections; stresses; service life; modeling; model of a three-layer beam; ballastless track construction

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-183-187

REFERENCES

- 1. Development strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2030. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3FSTRUCTURE_ID%3D704%26layer_id%3D5104%26id%3D6396 (retrieved on 22.12.2018) (in Russ.).
- 2. Misharin A. S. *General'naya skhema* osnova ustoychivogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta [General scheme the basis of sustainable development of railway transport]. Zheleznodorozhnyy transport, 2016, no. 5, pp. 11–14.
- 3. Pekhterev F.S. S uchetom prognozov sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya strany [Taking into account the forecasts of the socio-economic development of the country]. Zheleznodorozhnyy transport, 2016, no. 5, pp. 15–19.
- 4. Gapanovich V. A. Voprosy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii [Issues of in-

teraction between rolling stock and infrastructure during heavy haul traffic]. Zheleznodorozhnyy transport, 2016, no. 10, pp. 10–15.

- 5. Petrushenko G.V. *Vysokoskorostnoe dvizhenie shag v budushchee Rossii* [High-speed traffic a step into the future of Russia]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2015, no. 10, pp. 28–34.
- 6. Giannakos K. *Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure*. Vossloh AG, 2nd traffic&transportation conference, OSE, Sep. 2004. URL: https://ru.scribd.com/document/46196673/OSE-Speech (retrieved on 25.12.2018).
- 7. Bilow D. N. *Slab track for the next 100 years*. Portland Cement Association, Skokie. URL: https://ru.scribd.com/document/97772685/00047 (retrieved on 27.12.2018).
- 8. Michas G. Slab Track Systems for High-Speed Railways, Division of Highway and Railway Engineering. Royal Institute of Technology. Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment. Stockholm, 2012, pp. 40–43. URL: https://ru.scribd.com/document/222835090/Slab-Track-Design (retrieved on 07.01.2019).
- 9. Malozatratnyy bezballastnyy put' [Low-cost ballastless track]. Zheleznye dorogi mira [Railways of the world], 2014, no. 1, pp. 64–66. URL: http://www.zdmira.com/arhiv/2014/zdm-2014-no-1 (retrieved on 09.01.2019).
- 10. Savin A.V., Razuvaev A.D. *Sfery primeneniya bezballast-nogo puti* [Scope of application of ballastless track]. Tekhnika zheleznykh dorog [Railway engineering], 2016, no. 3, pp. 32–41.
- 11. Savin A. V. *Bezballastnyy put'* [Ballastless track]. Moscow, RAS Publ., 2017, 192 p.
- 12. Razuvaev A. D., Tsipin P.E. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti stroitel'stva bezballastnogo puti na estakadakh [Evaluation of the economic efficiency of the construction of ballastless track on flyovers]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2016, no. 2, pp. 81–85.
- 13. Kogan A. Ya., Savin A. D. *Metodika opredeleniya raschet-nogo sroka sluzhby bezballastnogo puti* [Method for determining design life of ballastless way]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 3–9. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-3-9.
- 14. Savin A.V. *Itogi ispytaniy bezballastnogo puti* [Results of testing ballastless track]. Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment Magazine], 2017, no. 1, pp. 26–31.
- 15. Muramoto K., Sekine E., Nakamura T. *Roadbed degradation mechanism under ballastless track and its countermeasures.* QR of RTRI, 2006, Vol. 47, no. 4, pp. 222–227. URL https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/47/4/47_4_222/_pdf (retrieved on 05.01.2019).
- E-mail: mikhailov.sergey@vniizht.ru (S. V. Mikhaylov)

- 16. Kogan A. Ya., Shestakov V. N., Levinzon M. A. *Vozdeystvie ekipazha na put' pri prostranstvennykh kolebaniyakh podvizhnogo sostava: opisanie programmy* [Impact of the carriage on the track with rolling space variations: description of the program]. Informatsionnyy byulleten' VNTI-Tsentr GOSFAP [GOSFAP VNTI-Center newsletter], 1985, no. 4/67, 40 p.
- 17. Mikhaylov S. V., Gonik M. M. Veroyatnostnaya otsenka vertikal'nykh dinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na put', v modeli trekhsloynoy balki pri vozdeystvii chetyrekhosnogo gruzovogo vagona [A probabilistic estimate of the vertical dynamic forces acting on the track, in the model of a three-layer beam under the influence of a four-axle freight car]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 2, pp. 98–103. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-2-98-103.
- 18. Savin A. V., Mikhaylov S. V. Eksperimental'no-teoreticheskiy metod opredeleniya parametrov bezballastnogo puti [Experimental-theoretical method for determining the parameters of ballastless track]. Vestnik transporta Povolzh'ya, 2018, no. 6, pp. 29–39.
- 19. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Dynamics of the track and its interaction with rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997, 326 p.
- 20. Lenning J.H., Bettin R.G. *Sluchaynye protsessy v zadachakh avtomaticheskogo upravleniya* [Random processes in problems of automatic control]. Moscow, Izd-vo inostr. lit. Publ., 1958, 388 p.
- 21. Kogan A. Ya., Nikitin D. A., Poleshchuk I. V. *Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhey i udarnom vzaimodeystvii kolesa i rel'sa* [Track oscillations at high speeds of the carriage motion and impact interaction of the wheel and the rail]. Moscow, Intext Publ., 2007, 168 p.
- 22. Kogan A. Ya., Krepogorskiy S. S., Shinkarev B. S. *Raschety zheleznodorozhnogo puti na vertikal'nuyu dinamicheskuyu nagruzku* [Calculations of a railway track for vertical dynamic load]. Moscow, Transport Publ., 1973, 80 p. (Trudy VNIIZhT [Proc. of the VNIIZhT], no. 502).

ABOUT THE AUTHOR

Sergey V. MIKHAYLOV,

Business Analyst, Center for Mathematical Modeling, JSC "VNIIZhT"

Received 15.01.2019 Revised 24.04.2019 Accepted 05.05.2019

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru, https://vestnik.vniizht.ru/jour.

Подписчики зарубежных стран могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press , export@ural-press.ru).