

# Оценка средней наработки до отказа поворотных подножек по данным эксплуатации

**М. В. БЕЛОУСОВА, В. В. БУЛАТОВ**

Открытое акционерное общество «Производственная фирма «КМТ» — Ломоносовский опытный завод» (ОАО «ПФ» КМТ), Ломоносов, 198412, Россия

**Аннотация.** В статье приведены обоснованные доводы в пользу того, что статистические данные по наработке до отказа поворотных подножек на пассажирских вагонах локомотивной тяги более точно характеризуются законом распределения Вейбулла, чем нормальным. Для подтверждения был применен статистический критерий проверки отклонения распределения от нормального. Для идентификации параметров распределения Вейбулла, на основе которых рассчитывается значение точечной оценки средней наработки до отказа, использовался метод максимального правдоподобия.

Данный закон распределения и процесс нахождения его параметров целесообразно ввести в программу и методику оценки эксплуатационной надежности при расчете оценки средней наработки до отказа поворотных подножек, а также рассмотреть возможность его применения для изделий-аналогов. В соответствии с принятым законом распределения произведен расчет точечной оценки средней наработки до отказа подножки поворотной закрытой на основе эксплуатационных испытаний за один год.

**Ключевые слова:** эксплуатационная надежность; вагоны локомотивной тяги; поворотная подножка; показатели надежности; средняя наработка до отказа; распределение Вейбулла; метод максимального правдоподобия

**Введение.** Поворотные подножки устанавливаются на пассажирские вагоны локомотивной тяги производства ОАО «ТВЗ» и предназначены для удобного и безопасного прохода пассажиров, возможности посадки в вагон с земли и с высоких и низких платформ. В настоящее время поворотными подножками оборудуются пассажирские вагоны поездов локомотивной тяги моделей 61-4447, 61-4440, 61-4463, 61-4458 и др.

Подножки могут устанавливаться на вагоны с распашными дверями и дверями прислонно-сдвижного типа. Подножка (рис. 1) состоит из корпуса 1, площадки откидной 2 и блока поворотного 3. Площадка откидная соединена с блоком поворотным толкателем 4, обеспечивающим синхронный поворот откидной площадки и блока поворотного на 90°.

В соответствии с ГОСТ 27.003–2016 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» (введен в действие 01.09.2017 г.) подножки классифицируются как изделие конкретного назначения (КН) многократного циклического применения, отказы или переход в предельное состояние которого не приводят к последствиям ката-

строфического (критического) характера, восстанавливаемое и обслуживаемое в процессе эксплуатации, стареющее и изнашиваемое одновременно до перехода в предельное состояние или отказ. Для подножки отказом принято считать прекращение выполнения заданных функций — открытия и закрытия, фиксации из-за нарушения работоспособности элементов конструкции.

Оценка показателей надежности подножек осуществляется по программе и методике, согласованными с заказчиком, и проводится параметрическим методом на основе обрабатываемых статистических данных эксплуатационных наблюдений.

К данному моменту на предприятии ОАО «ПФ» «КМТ» накоплен опыт серийного производства подножек (с 2008 г.), а также выявлены основные причины отказов изделия, что дает возможность провести уточненную оценку закона распределения.

**Определение закона распределения отказов.** Целью данного исследования является определение закона распределения наработок до отказа поворотных подножек, который более точно описывает результаты наблюдений в эксплуатации, и последующий вывод численных выражений для расчета показателя безотказности на основе выбранного закона распределения. Исследование закономерностей появления неисправностей, являющихся случайными событиями, — один из основных вопросов надежности [1, 2, 3, 4]. Чаще всего для непрерывных величин в теории надежности используются нормальный, экспоненциальный и закон распределения Вейбулла.

Если экспоненциальный закон распределения можно явно выделить и связать его со спецификой изделия, то аналогично поступить с прочими двумя законами не всегда возможно. Корректный выбор закона распределения для каждого технического изделия позволяет осуществлять текущий расчет показателей надежности, прогнозировать их, а также разрабатывать превентивные меры для конкретного изделия и нивелировать издержки как на этапах производства, так и в процессе эксплуатации.

При анализе показателей надежности из предположения о нормальном законе распределения отказов

■ E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru (В. В. Булатов)

была сформирована однородная выборка из наработок за все время фиксации данных (рассматривались подножки одинаковой конструкции).

После этого были вычислены значения показателей асимметрии  $g_1$  и эксцесса  $g_2$  по формулам [5]:

$$g_1 = \frac{m_3}{m_2^{1,5}} = -0,291389; \quad (1)$$

$$g_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = -0,769712, \quad (2)$$

где  $m_2, m_3, m_4$  — центральные моменты второго, третьего и четвертого порядков соответственно. В контексте нормального распределения  $g_1 = 0, g_2 = 0$ . В нашем случае показатель асимметрии  $g_1 = -0,291389 < 0$ , из чего следует, что «длинная» часть кривой распределения расположена слева от вершины. Коэффициент эксцесса — мера плосковершинности (остроконечности) графика распределения измеряемого признака, в данном случае  $g_2 = -0,769712 < 0$ , значит, кривая распределения имеет более пологую вершину, чем кривая нормального распределения. В результате была выполнена проверка нормальности распределения по критерию Дэвида — Хартли — Пирсона с вычислением статистики  $U$  [5, 6], используя размах варьирования  $R$ :

$$U = \frac{R}{s}; \quad (3)$$

$$R = t_{\max} - t_{\min}; \quad (4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2, \quad (5)$$

где  $s^2$  — несмещенная оценка дисперсии;  $t_{\max}, t_i, t_{\min}, \bar{t}$  — максимальное,  $i$ -е, минимальное и среднее значения рассматриваемой выборки наработок до отказа;  $n$  — общее число наработок до отказа. Гипотеза о нормальности отвергается, если значение статистики  $U < U_{0,5\alpha}$  или  $U > U_{1-0,5\alpha}$ , где  $U_{0,5\alpha}, U_{1-0,5\alpha}$  — критические точки для статистики  $U$ . При уровне значимости 0,1 процентные точки статистики  $U / U_{0,5\alpha} = 3,958, U_{1-0,5\alpha} = 5,508$ . Таким образом, поскольку значение  $U = 3,81 < U_{0,5\alpha}$ , гипотезу о нормальном законе распределения наработки следует отвергнуть.

Далее используем графическое представление статистического ряда (гистограмму), которое дает возможность сделать предположение о законе распределения наработок и произвести их дальнейший анализ. Для этого чаще всего используется ряд программных средств, например: Excel, Statistica, R, Python, Mathcad и др. [7, 8].

В программной среде для статистического анализа была проведена работа по определению наиболее подходящего закона распределения по заданной выборке. В результате данного анализа было выявлено (рис. 2, таблица), что более точно средняя наработка

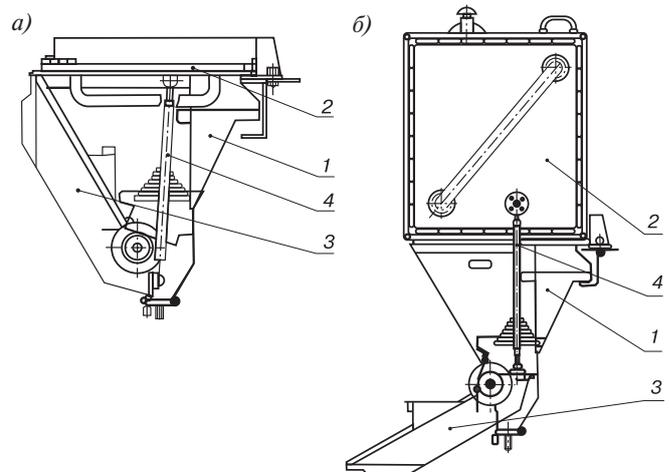


Рис. 1. Подножка поворотная закрытая: а — положение «закрыто»; б — положение «открыто»; 1 — корпус; 2 — площадка откидная; 3 — поворотный блок; 4 — толкатель

Fig. 1. Closed turning step: а — position “closed”; б — position “open”; 1 — case; 2 — folding area; 3 — turning block; 4 — pusher

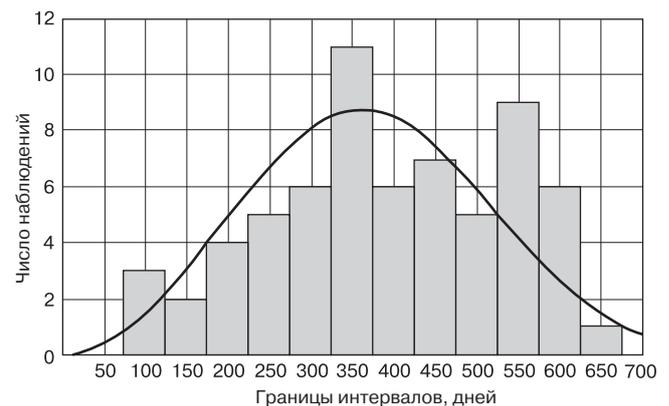


Рис. 2. Гистограмма частот по выборке наработок до отказа поворотных подножек  
Fig. 2. Histogram of frequencies on a sample of developments to the failure of the rotary steps

до отказа описывается законом распределения Вейбулла (с параметрами масштаба и формы 420 и 2,85 соответственно). Помимо этого,  $P$ -значение ( $p$ -value) выборки по критерию согласия  $\chi^2$  составило 0,94, что говорит об обоснованности данного предположения.  $P$ -значение позволяет судить о том, насколько данная выборка соответствует теоретическому распределению, так как, по сути, представляет собой вероятность истинности нулевой гипотезы. Проверяемую гипотезу  $H_0$  нет основания отвергнуть, если  $p$ -value  $> \alpha$  [7]. Так как в данном исследовании используется уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , то при полученном  $P$ -значении есть основания принять гипотезу о распределении Вейбулла. Итак, для оценки средней наработки до отказа необходимо определить параметры этого распределения.

Сравнение законов распределения по критериям  $\chi^2$  и  $P$ -значения  
Comparison of the distribution laws for the criteria  $\chi^2$  and  $p$ -value

Типы распределения	$\chi^2$ и $p$ -value
Вейбулла (масштаб, форма)	0,938448
Нормальное (положение, масштаб)	0,679369
Обобщенное распределение экстремальных значений (положение, масштаб, форма)	0,282102
Рэля (масштаб)	0,269219
Обобщенное распределение Парето (масштаб, форма)	0,022862
Треугольное (минимум, максимум, мода)	0,005468
Логнормальное (масштаб, форма)	0,000616
Полунормальное (масштаб)	0,000000

**Нахождение параметров распределения Вейбулла для расчета оценки средней наработки до отказа.** В настоящее время основным документом при анализе надежности изделий в эксплуатации является [9]. В нем приводятся математические соотношения для расчета как точечных, так и интервальных оценок показателей надежности. Однако данный документ изобилует большим количеством опечаток и неточностей. Помимо этого, представленные там методы нахождения численных соотношений для расчета показателей надежности из предположений о различных законах распределения и всевозможных планах проведения испытаний на надежность вызывают сомнения в их корректности и затруднения в процессе применения.

При расчете оценки средней наработки до отказа на основе данных эксплуатации значение, полученное в результате вычислений по формулам из [9, с. 45], оказалось неадекватным. При дальнейшем рассмотрении данных численных выражений и их анализе было принято решение о выведении соотношений для вычисления параметров распределения Вейбулла методом максимального правдоподобия.

Для  $N$  изделий рассмотрим совокупность наработок до отказа  $t_i$ , расположенных в порядке неубывания:

$$t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < T,$$

где  $T$  — продолжительность испытаний;  $n$  — число отказов за  $T$ .

Тогда выражение для вероятности с ограничением длительности  $T$  имеет вид

$$P = f(t_1)f(t_2), \dots, f(t_i), \dots, f(t_n)\Delta t_1 \times \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n (1 - F(T))^{N-n}, \quad (6)$$

где  $P$  — вероятность реализации в ходе испытаний выборки наработок, включающей наработки до отказа

из числа фиксированных значений  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < T$  и наработки, усеченные временем испытаний  $T$ , в количестве  $(N - n)$ , где  $N$  — объем выборки;  $n$  — число наработок до отказа в этой выборке, что равносильно

$$\frac{P}{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n} = \prod_{i=1}^n f(t_i) (1 - F(T))^{N-n}. \quad (7)$$

Тогда функция правдоподобия будет иметь следующий вид:

$$L = \ln \frac{P}{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n} = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + \ln(1 - F(T))^{N-n} \Leftrightarrow L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + (N - n) \ln(1 - F(T)). \quad (8)$$

Перепишем функцию правдоподобия (8), используя выражения плотности распределения Вейбулла [10]

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0}} \quad (9)$$

и функции распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^m}{t_0}}, \quad (10)$$

где  $t_0$  — параметр, характеризующий масштаб кривой распределения;  $m$  — параметр, характеризующий форму кривой плотности распределения.

Суть метода максимального правдоподобия заключается в том, что в качестве оценок параметров  $t_0$  и  $m$  принимаются те величины, при которых функция правдоподобия имеет максимальное значение, а необходимое условие экстремума — равенство нулю градиента функции  $L$ .

Следовательно, оценки параметров  $t_0$  и  $m$  определим из условий

$$\frac{\partial L}{\partial t_0} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial m} = 0. \quad (11)$$

Получим следующие уравнения для нахождения параметров распределения Вейбулла:

$$\frac{\partial L}{\partial t_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_0} \ln f(t_i) + (N - n) \frac{\partial}{\partial t_0} \times \ln(1 - F(T)) = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial m} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial m} \ln f(t_i) + (N - n) \frac{\partial}{\partial m} \times \ln(1 - F(T)) = 0. \quad (13)$$

Преобразуем выражение (12):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial t_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_0} \ln \left( \frac{m}{t_0} t_i^{m-1} e^{-\frac{t_i^m}{t_0^m}} \right) + (N-n) \frac{\partial}{\partial t_0} \times \\ &\times \ln \left( e^{-\frac{T^m}{t_0^m}} \right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial L}{\partial t_0} = -\frac{1}{t_0} + \sum_{i=1}^n \frac{t_i^m}{t_0^2} + \\ &+ (N-n) \frac{T^m}{t_0^2} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Аналогичным образом упростим выражение (13):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial m} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial m} \ln \left( \frac{m}{t_0} t_i^{m-1} e^{-\frac{t_i^m}{t_0^m}} \right) + (N-n) \frac{\partial}{\partial m} \times \\ &\times \ln \left( e^{-\frac{T^m}{t_0^m}} \right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial L}{\partial m} = -\frac{1}{m} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) \times \\ &\times \left( 1 - \frac{t_i^m}{t_0^m} \right) + (N-n) \left( -\frac{T^m}{t_0^m} \ln(T) \right) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из уравнений (14), (15) можно численно найти искомые оценки распределения Вейбулла для расчета средней наработки до отказа. Алгоритм реализован в математическом пакете. На вход подается вектор наработок до отказа  $t$  и продолжительность испытаний  $T$ .

**Расчет средней наработки до отказа подножки поворотной закрытой.** Вычислим точечную оценку средней наработки до отказа подножек в количестве 610 шт. (план испытаний на надежность [NUT]) за продолжительность испытаний в течение 365 дней при условии, что известен вектор наработок до отказа за этот период, по формуле

$$t_c = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right), \quad (16)$$

где  $\Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right)$  — гамма-функция, где значения параметров  $t_0$  и  $m$  получены из уравнений (14) и (15).

При подстановке получаем

$$t_c = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) = 0,88567 \cdot 31\,523\,000^{\frac{1}{2,108}} = 3195,18.$$

Значит, оценка средней наработки до отказа при заданных исходных данных  $t_c = 3195$  дней. Полученное значение может быть использовано при переводе данного показателя безотказности в километры пробега исходя из принятого среднесуточного пробега вагона.

**Заключение.** По итогам исследования был определен фактический закон распределения наработок до отказа подножек поворотных закрытых, соответствующий закону распределения Вейбулла. Кроме того, на основе численных выражений для идентификации параметров данного распределения, полученных методом максимального правдоподобия, был произведен расчет средней наработки до отказа подножек за период испытаний, равный одному году, по данным об их наработках до отказа за актуальный период времени, завершающийся 2017 годом. Полученные значения показателя безотказности поворотных подножек могут быть использованы для решения задач оптимизации процессов в системе технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов с целью сокращения издержек на их содержание в эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
2. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
3. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Практикум. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.
4. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
5. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 238 с.
6. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Новосибирск: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 160 с. (Научная мысль).
7. Буре В. М., Евсеев Е. А. Основы эконометрики: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 72 с.
8. Прикладная статистика в R, Statistica и Excel: описательная статистика, оценивание параметров, статистические критерии: учеб. пособие / В. М. Буре [и др.]. СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2011. 104 с.
9. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: введен 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 1990. 136 с.
10. Косточкин В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. М.: Машиностроение, 1976. 248 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**БЕЛОУСОВА Мария Владимировна**, инженер по надежности, ОАО «ПФ «КМТ»

**БУЛАТОВ Виталий Владимирович**, канд. техн. наук, инженер по надежности, ОАО «ПФ «КМТ»

Статья поступила в редакцию 17.09.2018 г., актуализирована 01.11.2018 г., принята к публикации 10.12.2018 г.

## Estimation of the average time to failure of the turning steps according to the operation data

M. V. BELOUSOVA, V. V. BULATOV

Joint Stock Company "KMT Production Company — Lomonosov Experimental Plant" (JSC "PF KMT"), Lomonosov, 198412, Russia

**Abstract.** The purpose of this study is to determine the empirical law of the distribution of developments to the failure of the turning steps installed on passenger cars of locomotive traction.

The correct choice of the distribution law for each technical product allows for the current calculation of reliability indicators, predicting them, as well as developing preventive measures for a specific technical product and leveling costs both during production and during operation.

The article presents well-founded arguments that the failure time for turning steps is characterized by the Weibull distribution law. For confirmation, a statistical criterion for checking the deviation of the distribution from the normal one was applied.

On the basis of carried statistic analysis a histogram of frequencies and a line of the density function of samples of failure time in the data fixation period from 2010 to 2017 were built. Results of applying the  $\chi^2$  agreement criterion in the same software environment revealed that the failure time of the closed turning step comply with the law of Weibull distribution. Authors suggest using the maximum likelihood method to identify Weibull distribution parameters, on the basis of which the value of the point estimate of the mean time to failure is calculated.

Based on the research, it is concluded that this type of distribution law and the process of finding its parameters should be introduced into the program and methodology for assessing the operational reliability of the turning steps, when calculating the average time to failure of the steps, and consider the possibility of applying this law for analogous products.

In conclusion, calculation of the pointed estimation of the average time to failure of the closed turning step was made on the basis of operational tests for one year in accordance with the adopted distribution law.

**Keywords:** operational reliability; locomotive traction cars; turning step; reliability indicators; average time to failure; Weibull distribution; maximum likelihood method

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-54-58>

### REFERENCES

1. Gnedenko B.V. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. Spravochnik: v 10 t. T. 2. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i effektivnosti* [Reliability and efficiency in technology. Reference book in 10 vol. Vol. 2. Mathematical methods in the theory of reliability and efficiency]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 280 p.

■ E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru (V. V. Bulatov)

2. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* [Reference book for calculating reliability of radio electronics equipment and automation]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975, 472 p.

3. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum* [Fundamentals of the theory of reliability. Practical work]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2006, 560 p.

4. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p.

5. L'vovskiy E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Statistical methods for constructing empirical formulas. Textbook for universities]. Moscow, Higher school Publ., 1988, 238 p.

6. Lemeshko B. Yu. *Kriterii proverki otkloneniya raspredeleniya ot normal'nogo zakona* [Criteria for checking the deviation of the distribution from the normal law]. Novosibirsk, NITs INFRA-M, 2015, 160 p.

7. Bure V. M., Evseev E. A. *Osnovy ekonometriki. Ucheb. posobie* [Basics of Econometrics. Tutorial]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2004, 72 p.

8. Bure V. M., Parilina E. M., Sedakov A. A., Shevkoplyas E. V. *Prikladnaya statistika v R, Statistica i Excel: opisatel'naya statistika, otsenivanie parametrov, statisticheskie kriterii. Ucheb. posobie* [Applied statistics in R, Statistica and Excel: descriptive statistics, parameter estimation, statistical criteria. Tutorial]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2011, 104 p.

9. RD 50-690-89. *Methodical instructions. Reliability in technology. Methods for assessing reliability indicators based on experimental data. Put into force 01.01.1991*. Moscow, Standard Publishing house, 1990, 136 p. (in Russ.).

10. Kostochkin V. V. *Nadezhnost' aviatsionnykh dvigateley i silovykh ustanovok* [Reliability of aircraft engines and power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 248 p.

### ABOUT THE AUTHORS

**Maria V. BELOUSOVA**,  
Reliability Engineer, JSC "PF KMT"

**Vitaliy V. BULATOV**,  
Cand. Sci. (Eng.), Reliability Engineer, JSC "PF KMT"

Received 17.09.2018

Revised 01.11.2018

Accepted 10.12.2018

### ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Савин А. В. Безбалластный путь. М.: РАС, 2017. 192 с.

Представлена эволюция безбалластного пути как способа уменьшения давления на балласт и уменьшения трудозатрат на текущее содержание, а также рациональные сферы его применения. Выполнено сравнение различных конструкций по объемам укладки в разных странах мира. Описаны конструкции отечественных и зарубежных вариантов безбалластного пути и их классификация, даны технические требования к их отдельным элементам. Также описаны неисправности безбалластных конструкций и способы их устранения в процессе текущего содержания.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников железнодорожного транспорта, будет полезна преподавателям и студентам отраслевых вузов, а также тем, кому предстоит проектировать, сооружать и эксплуатировать безбалластный путь.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.