

## Оценка надежности рельсовых креплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло

Ю. М. Краковский<sup>1</sup>, В. О. Беляков<sup>2</sup>, В. А. Начигин<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ nachiginv@yandex.ru

### Резюме

В статье приводится описание созданного программно-математического обеспечения оценки показателей надежности рельсовых креплений железнодорожного пути. В качестве математической модели наработки принято трехпараметрическое треугольное распределение, параметры которого выбирают эксперты. Показателями надежности выбраны: вероятность безотказной работы; средняя наработка; гамма-процентный ресурс. Для создания программного обеспечения использовалась среда разработки Visual Studio 2019. Код написан на языке программирования C#. Возможность получения аналитических значений показателей надежности позволила провести тестирование их численных моделей. С применением метода Монте-Карло и созданного программного обеспечения проведено исследование влияния неопределенности на выбранные показатели надежности при условии, что среднее значение наработки является случайной величиной. В качестве вероятностной модели для среднего значения наработки в условиях неопределенности предложено бета-распределение с двумя вариантами значений параметров: бета-распределение является равномерным законом; бета-распределение близко к нормальному закону. Показано, что полученные численные значения средней наработки с учетом неопределенности для обоих вариантов значений параметров попадают в доверительный интервал. Более того, доверительные интервалы для этих вариантов пересекаются. В результате можно сделать вывод, что оценки средних значений для представленных вариантов статистически неразличимы. Однако моделирование показало, что гамма-процентный ресурс по первому варианту отличается от аналитического значения на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения наработки гамма-процентный ресурс снизился на 5,1 млн ткм. Этот факт учитывается в процессе принятия управленческих решений при обслуживании рельсовых креплений железнодорожного пути.

### Ключевые слова

показатели надежности, рельсовые крепления, экспертный подход, неопределенность исходных данных, метод Монте-Карло

### Для цитирования

Краковский Ю. М. Оценка надежности рельсовых креплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло / Ю. М. Краковский, В. О. Беляков, В. А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 163–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 25.01.2022 г.; принята к публикации: 27.01.2022 г.

## Assessment of the reliability of rail fasteners based on expert information using the Monte Carlo method

Yu. M. Krakovskii<sup>1</sup>, V. O. Belyakov<sup>2</sup>, V. A. Nachigin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk, the Russian Federation

✉ nachiginv@yandex.ru

### Abstract

The created software and mathematical support for the evaluation of reliability indicators of rail fasteners of the railway track is given. As a mathematical model of operating time, a three-parameter triangular distribution is adopted, whose parameters are chosen by experts. As reliability indicators, the following factors were selected: the probability of a failure-free operation; average operating time; gamma percent resource. The Visual Studio 2019 development environment was used to create the software. The code is written in the C# programming language. The possibility of obtaining analytical values of reliability indicators made it possible to test their numerical models. Using the Monte Carlo method and the created software, the study of the influence of uncertainty upon the selected reliability indicators was carried out, the average operating time being a random variable. As a probabilistic model for the average value of operating time under uncertainty, a beta distribution with two variants of parameter values is proposed: the beta distribution is a uniform law; the beta distribution is close to the normal law. It is shown that the obtained numerical values of the average operating time, the uncertainty for both variants of parameter values taken into account, fall into the confidence interval. Moreover, the confidence intervals for both variants overlap. Based on these results, it can be

concluded that the estimates of the mean values for these variants are statistically indistinguishable. But at the same time, the simulation results showed that the gamma percentage resource for option 1 differs from the analytical value by 2.24%. In absolute terms, due to the uncertainty of the average gamma value, the percentage resource decreased by 5.1 million tkm. And this fact should be taken into account when making management decisions on servicing rail fasteners of a railway track.

### Keywords

reliability indicators, rail fasteners, expert approach, uncertainty of initial data, Monte Carlo method

### For citation

Krakovskii Yu. M., Belyakov V. O., Nachigin V. A. Otsenka nadezhnosti rel'sovykh skreplenii na osnove ekspertnoi informatsii s ispol'zovaniem metoda Monte-Karlo [Assessment of the reliability of rail fasteners based on expert information using the Monte Carlo method]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 163–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169

### Article Info

Received: 18.01.2022; revised: 25.01.2022; accepted: 27.01.2022.

### Введение

Железнодорожный путь содержит множество компонентов: рельсы, шпалы, подкладки, земляное полотно и др. Соединяют эти компоненты рельсовые скрепления различных типов, например, скрепление ПФК-350, скрепление ЖБР, скрепление SBS SL-1 компании Schwihag AG и др. [1–5].

Вопросу надежности железнодорожного пути, его мониторингу и диагностики посвящено значительное число публикаций [5–11]. Это связано с тем, что надежный железнодорожный путь, содержащий рельсовые скрепления, обеспечивает безопасную перевозку грузов и пассажиров. Дополнительно, только при высокой надежности железнодорожного пути и связанной с ним инфраструктуры, возможно повышение провозной и пропускной способностей перевозочного процесса железнодорожным транспортом [12–16].

Отказы скреплений происходят по различным причинам, при этом их относят к невосстанавливаемым объектам. При эксплуатации пути важно уметь определять показатели надежности скреплений, используя экспертную информацию с учетом неопределенности. На железной дороге наработка измеряется в единицах грузонапряженности (млн ткм). Это позволяет в расчетах использовать условные единицы (усл. ед), когда, например, одна единица равна 50 млн ткм [2, 5].

Таким образом, необходимость оценки надежности рельсовых скреплений железнодорожного пути является актуальной задачей, требующей своего решения. Целью работы является повышение эффективности принятия управленческих решений за счет разработки и применения программно-математического

обеспечения оценки показателей надежности рельсовых скреплений.

### Программно-математическое обеспечение оценки надежности рельсовых скреплений

В данном исследовании предполагается, что эксперты задают диапазон изменения наработки рельсового скрепления ( $a, b$ ) и ее среднее значение ( $\bar{x}$ ), усл. ед. Это позволяет выбрать в качестве вероятностной модели наработки трехпараметрическое треугольное распределение с функцией распределения:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)}, & a < x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-c)}, & c < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – минимальное и максимальное значение наработки (информация экспертов),  $c$  – наиболее вероятное значение. При известном среднем значении (информация экспертов), этот параметр равен:

$$c = 3 \cdot \bar{x} - (a + b). \quad (2)$$

Зная (1), находим модель определения значений времени наработки:

$$x = \begin{cases} a + \sqrt{r(b-a) \cdot (c-a)}, & 0 < r \leq \frac{c-a}{b-a} \\ b - \sqrt{(1-r) \cdot (b-a) \cdot (b-c)}, & \frac{c-a}{b-a} < r < 1 \\ c < x < b \end{cases}, \quad (3)$$

где  $r$  – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале (0, 1).

С применением метода Монте-Карло, по модели (3) создается выборка нужного объема (4), а затем находятся точечная оценка средней

наработки ( $\tilde{x}$ ) и ее доверительный интервал (5) ( $x_1, x_2$ ):

$$X = (x_q, q = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q; \quad x_1 = \tilde{x} - \delta; \quad x_2 = \tilde{x} + \delta, \quad (5)$$

где

$$\delta = \frac{z_y \cdot s}{\sqrt{n}}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^n x_q^2 - n \cdot \tilde{x}^2}{n-1}}. \quad (6)$$

Здесь  $n$  – объем выборки;  $x_q$  – выборочные значения наработки (4);  $z_y$  – квантиль нормированного нормального распределения для доверительной вероятности  $y$ ;  $s$  – оценка среднеквадратического отклонения.

Выбранное экспертами значение средней наработки должно попасть в доверительный интервал (5) с учетом (6).

Показателями надежности рельсовых скреплений в работе являются: вероятность безотказной работы ( $P(x)$ ); средняя наработка ( $\bar{x}$ ); гамма процентный ресурс для вероятности  $\gamma(x_\gamma)$ . Для распределения (1) эти показатели равны:

$$P(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)}, & a < x \leq c \\ \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-c)}, & c < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$$

$$\bar{x} = \frac{a+b+c}{3};$$

$$x_\gamma = \begin{cases} a + \sqrt{(1-\gamma) \cdot (b-a) \cdot (c-a)}, & \frac{c-a}{b-a} \leq \gamma < 1 \\ b - \sqrt{\gamma \cdot (b-a) \cdot (b-c)}, & 0 < \gamma < \frac{c-a}{b-a} \end{cases} \quad (7)$$

При использовании выборочных значений (4), численные выбранные показатели надежности будут иметь вид:

– численная вероятность безотказной работы

$$P_r(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_0 \\ k_{j-1} + (x - x_{j-1}) \cdot (k_j - k_{j-1}) \cdot \frac{x_j - x_0}{J}, & x_0 < x < x_j \\ 0, & x \geq x_j \end{cases} \quad (8)$$

где  $x_{j-1} < x \leq x_j, j = \overline{1, J}$ ;

– численная средняя наработка

$$\bar{x}_r = \int_0^{x_j} P_r(x) dx = x_0 + \frac{x_j - x_0}{J} \cdot \left( 0,5 + \sum_{j=1}^{J-1} k_j \right); \quad (9)$$

– численный гамма процентный ресурс

$$x_r(\gamma) = x_{j-1} + \frac{\gamma - k_{j-1}}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{x_j - x_0}{J}, \quad (10)$$

$$k_j < \gamma \leq k_{j-1}, j = \overline{1, J}.$$

В моделях (8)–(10)  $k_j$  – обратная величина относительных частот

$$k_j = 1 - m_j; j = \overline{1, J}, k_0 = 1, k_J = 0,$$

где  $J$  – число интервалов группировки выборочных значений;  $x_j$  – узлы.

Для гамма процентного ресурса определим относительную погрешность в процентах

$$\Delta x_\gamma = 100 \cdot |x_\gamma - x_r(\gamma)| / x_\gamma \quad (11)$$

Для создания программного обеспечения использовалась среда разработки Visual Studio 2019. Код написан на языке программирования C#. Преимущества языка программирования в среде Visual Studio заключается в следующем [17, 18]:

1. C# использует объектно-ориентированный подход программирования;
2. C# относится к языкам компилируемого типа, а значит обладает всеми преимуществами этих языков;
3. C# обладает большой надежностью из-за работы CLR машины;
4. C# обладает большим количеством синтаксических конструкций и возможностью работать с платформой «.NET», что позволяет быстрее разрабатывать программное обеспечение.

### Исходные данные и результаты вычислений

В данном исследовании рассмотрено два случая выбора среднего значения наработки:

1. эксперты это значение задают в виде числа. В этом случае параметр (2) также является числом, а выборка (4) с учетом (3), имеет значения распределения (1);

2. эксперты, учитывая условия неопределенности, считают среднее значение наработки случайной величиной на интервале ( $m_1, m_2$ ). В качестве вероятностной модели предлагается

бета-распределение с параметрами  $(p, q)$ . В этом случае параметр (2) также является случайной величиной, а выборка (4) с учетом (3), имеет значения, отличные от распределения (1).

Далее с применением метода Монте-Карло и созданного программного обеспечения, исследуется влияние условий неопределенности на выбранные показатели надежности. Рассмотрено два варианта значений параметров  $(p, q)$ :

–  $p = q = 1$ , вариант равномерного закона на интервале  $(m_1, m_2)$ ;

–  $p = q = 4$ , вариант, удовлетворяющий правилу «трех сигм», характерный для нормального закона. В этом случае интервал  $(m_2 - m_1)$  равен шести значениям среднеквадратического отклонения.

Вычисления по созданному программно-математическому обеспечению проведем при следующих исходных данных, выбранных экспертами:  $a = 2,0$ ;  $b = 12,0$ ;  $\bar{x} = 7,5$ ; параметр  $c$  (2) равен  $8,5$ ;  $n=10000$ ;  $\gamma = 0,90$ .

В табл. 1 приведены результаты вычислений для первого случая, когда эксперты среднее значение наработки задают в виде числа.

**Таблица 1.** Результаты вычислений для первого случая

**Table 1.** Calculation results for the first case

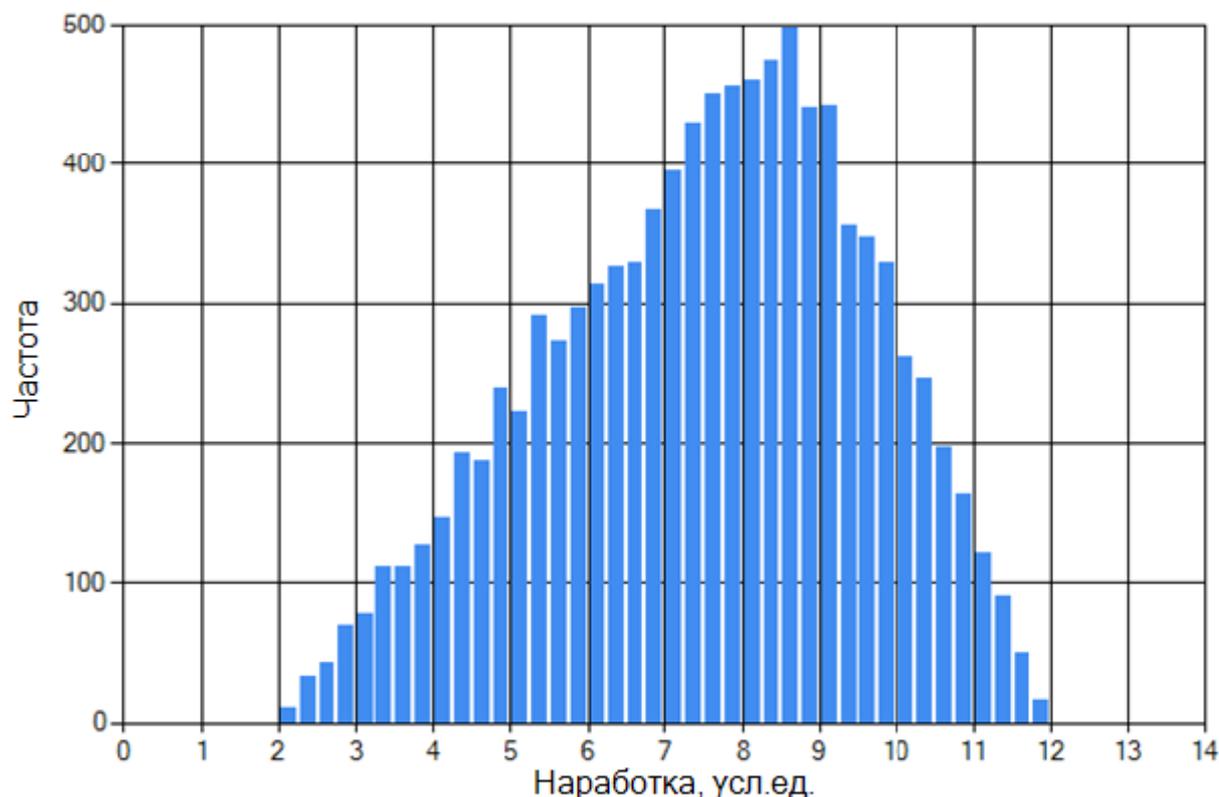
$\tilde{x}$	$x_1$	$x_2$
7,524	7,483	7,564
$\bar{x}_r$	$x_r(\gamma)$	$\Delta x_r, \%$
7,525	4,549	4,600

Из табл. 1 видно, что выбранное экспертами среднее значение наработки и полученное численное значение наработки (9) попадают в доверительный интервал (5). Гамма процентный (7) и численный гамма процентный ресурсы (10) близки по значениям, относительная погрешность по (11) равна 1,12%.

Эти результаты тестирования позволяют доверять численным моделям (8)–(10).

На рис. 1 приведена гистограмма частот наработки, она хорошо напоминает треугольное распределение, что подтверждает предыдущий вывод.

В табл. 2 приведены результаты вычислений для второго случая, когда учитывается



**Рис. 1.** Гистограмма частот наработки, первый случай

**Fig. 1.** Operating time frequencies bar graph, first case

неопределенность среднего значения наработки. Исследование проведено при таких дополнительных исходных данных:  $m_1 = 6,5$ ;  $m_2 = 8,5$ . В этом случае параметр  $c$  в соответствии с (2) меняется в диапазоне 5,5–11,5.

При этих данных исследуются два варианта значений параметров: а)  $p = q = 1$ ; б)  $p = q = 4$ .

**Табл. 2.** Результаты вычислений для второго случая  
**Table 2.** Calculation results for the second case

№	$\tilde{x}$	$x_1$	$x_2$
<i>a</i>	7,50635	7,46346	7,54923
<i>b</i>	7,47317	7,43084	7,51422
№	$\overline{x_r}$	$x_r (\gamma)$	$\Delta x_r, \%$
<i>a</i>	7,50453	4,44731	2,24
<i>b</i>	7,47383	4,51429	0,77

Из табл. 2 видно, что полученные численные значения средней наработки (9) с учетом неопределенности для обоих вариантов значений параметров попадают в доверительный интервал (5). Численное среднее значение для варианта: *a* попадает в доверительный интервал варианта *b* и наоборот (доверительные интервалы пересекаются). Следовательно, оценки средних значений для обоих вариантов статистически неразличимы.

Гамма процентный ресурса по первому варианту отличается от аналитического значе-

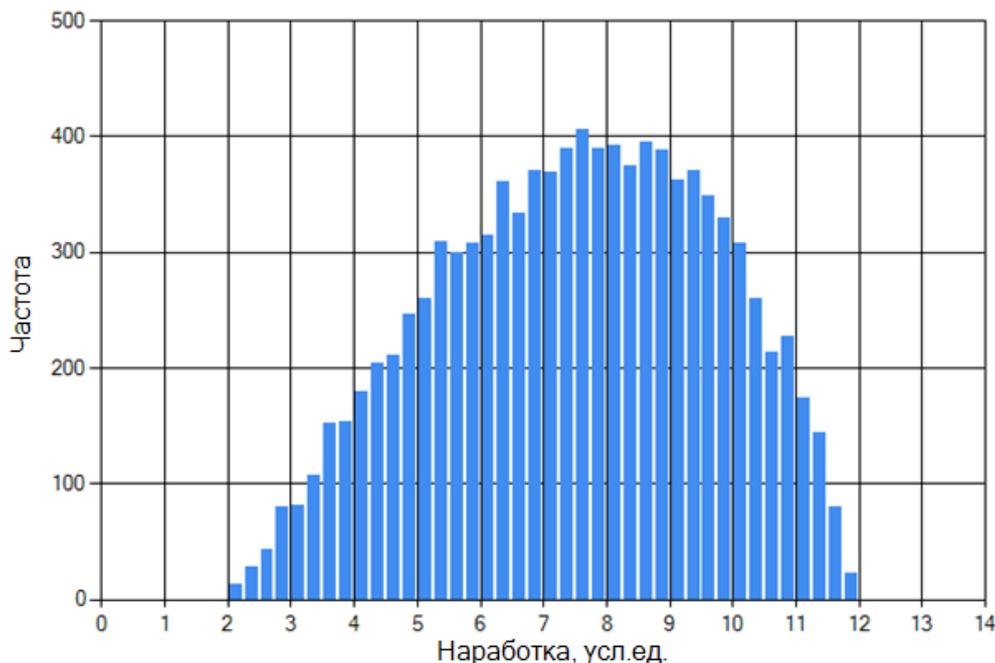
ния  $x_\gamma$  на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения гамма процентный ресурс снизился на 5,1 млн ткм (1 усл. ед. равна 50 млн ткм). Этот факт надо учитывать в процессе принятия управленческих решений при обслуживании рельсовых скреплений железнодорожного пути.

На рис. 2 приведена гистограмма частот наработки для варианта *a*, которая по значениям частот отличается от треугольного распределения (см. рис. 1). На рис. 1 частоты достигают значений 500, а на рис. 2 – 400. В связи с этим, вершина гистограммы на рис. 2 менее заостренная.

### Заключение

С применением созданного программно-математического обеспечения, использующего метод Монте-Карло, проведено исследование показателей надежности рельсовых скреплений железнодорожного пути. Математическая модель наработки – трехпараметрическое треугольное распределение, параметры которого определяют эксперты. В результате исследования выявлено:

1. Неопределенность среднего значения в исходных данных статистически не влияет на оценки средней наработки, полученные в результате моделирования (они оказались статистически неразличимыми);



**Рис. 2.** Гистограмма частот наработки, второй случай  
**Fig. 2.** Operating time frequencies bar graph, second case

2. гамма процентный ресурс при моделировании отличается от аналитического значения на 2,24 %. В абсолютных значениях из-за неопределенности среднего значения наработки гамма процентный ресурс снизился на 5,1

млн ткм (1 усл. ед. – 50 млн ткм). Этот факт нужно учесть при принятии управленческих решений при обслуживании рельсовых скреплений железнодорожного пути.

### Список литературы

1. Кузнецов В.В. Мониторинг работы скрепления APC // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 18–23.
2. Краковский Ю.М., Даваадорж, Батбаатар. Нечеткий численный вероятностный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений // Мир Транспорта. 2017. Т. 15. № 3 (70). С. 30–39.
3. Максимцев С.В., Начигин В.А., Архипенко Ю.А. Скрепления как основной элемент стабильности верхнего строения пути // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 6. С. 8–12.
4. Петров А.В., Савин А.В., Лебедев А.В. Рельсовые скрепления безбалластных конструкций пути на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 12. С. 2–5.
5. Краковский Ю.М., Каргапольцев С.К., Начигин В.А. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски. СПб. : ЛИТЕО, 2018. 240 с.
6. Антипов А.Г., Марков А.А. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 8. С. 27–32.
7. Аштит Е.С. Развитие системы мониторинга пути // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 30–32.
8. Гарделей Л.В. и др. Комплексная оценка состояния рельсов современными средствами дефектоскопии // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 6. С. 7–8.
9. Игонькин С.Н. О методах статистического анализа состояния рельсовой колеи // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 9. С. 29–31.
10. Бирюзов В.П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 4–8.
11. Краковский Ю.М., Начигин В.А., Начигин А.В. Оценка технического состояния рельсов по данным мониторинга пути // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 5. С. 40–43.
12. Осминин А.Т., Мехедов М.И., Медников Д.В. Обеспечение интероперабельности перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 11–17.
13. Козлов П.А. Колокольников В.С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (67). С. 96–101.
14. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участков // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 4–7.
15. Сотников Е.А., Мехедов М.И. Холодняк П.С. Интенсификация роста загруженных направлений сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 11–14.
16. Ковалев И.А., Колокольников В.С. Влияние отказов технических средств на выполнение графика движения поездов // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 54–57.
17. Албахари Д., Албахари Б. #7.0. Справочник : полное описание языка. СПб. : Альфа-книга, 2018. 1024 с.
18. Трелсен Э., Джепикс Ф. Язык программирования C# 7 и платформы .NET и .NET Core. М. ; СПб. : Диалектика, 2018. 1328 с.

### References

1. Kuznetsov V.V. Monitoring raboty skrepleniya ARS [Monitoring of the work of fastening the ARF]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 8, pp. 18-23.
2. Krakovskiy Yu.M., Davaadorzh, Batbaatar. Nchetkii chislennyi veroyatnostnyi analiz dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti rel'sovykh skreplenii [Fuzzy numerical probabilistic analysis for assessing the reliability of rail fasteners]. *Mir transporta* [The World of Transport]. 2017, vol. 15, no 3(70), pp. 30-39.
3. Maksimtsev S.V., Nachigin V.A., Arkhipenko Yu.A. Skrepleniya kak osnovnoi element stabil'nosti verkhnego stroeniya puti [Bond as the main element of the stability of top structure of path]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 6, pp. 8-12.
4. Petrov A.V., Savin A.V., Lebedev A.V. Rel'sovye skrepleniya besballastovykh konstruksii puti na eksperimental'nom kol'tse ОАО «ВНИИЖТ» [Rail fastening of the ballastless designs of the track on the experimental polygon of JSC «ВНИИЖТ»]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 12, pp. 2-5.
5. Krakovskiy Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovanie perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnym transportom: analiz, prognozirovaniye, riski [Modeling of the transport process by rail: analysis, forecasting, risk]. Saint Petersburg: LITEO Publ., 2018. 240 p.
6. Antipov A.G., Markov A.A. Noveye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov [New possibilities of the magnetodynamic method of rail control]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 8, pp. 27-32.
7. Ashtiz E.S. Razvitie sistemy monitoringa puti [Development of the track monitoring system]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 4, pp. 30-32.

8. Gardelei L.V. et al. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya rel'sov sovremennymi sredstvami defektoskopii [Comprehensive assessment of the condition of rails by modern means of flaw detection]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 6, pp. 7-8.
9. Igonkin S.N. O metodakh statisticheskogo analiza sostoyaniya rel'sovoi kolei [On methods of statistical analysis of the state of the rail track]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2015, no 9, pp. 29-31.
10. Biryuzov V.P. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaistva do 2025 g. [On the main directions of development of diagnostic and monitoring systems of the track economy until 2025]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Path and track facilities]. 2016, no 4, pp. 4-8.
11. Krakovskii Yu.M., Nachigin V.A., Nachigin A.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya rel'sov po dannym monitoringa puti [Evaluation of the technical state of rails according to the monitoring path]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2012, no 5, pp. 40-43.
12. Osminin A.T., Mekhedov M.I., Mednikov D.V. Obespechenie interoperabel'nosti perevozok [Ensuring the interoperability of transportation]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2019, no 7, pp. 11-17.
13. Kozlov P.A., Kolokolnikov V.S. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Calculation and optimization of railway transport polygons]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2017, no 3 (67), pp. 96-101.
14. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti uchastkov [Growth prospects of the capacity of sites]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2020, no 3, pp. 4-7.
15. Sotnikov E.A., Mekhedov M.I., Holodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravlenii seti zheleznykh dorog [Intensification of the growth of the busiest lines of a network of Railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2020, no 3, pp. 11-14.
16. Kovalev I.A., Kolokol'nikov V.S. Vliyaniye otkazov tekhnicheskikh sredstv na vypolneniye grafika dvizheniya poezdov [The impact of failures of technical means on the implementation of the train schedule]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2014, no 2, (41), pp. 54-57.
17. Albahari D., Albahari B. C# 7.0. Spravochnik. Polnoe opisaniye yazyka [C# 7.0 in a Nutshell]. Saint Petersburg: Alfa-book Publ., 2018. 1024 p.
18. Troelsen A., Japikse F. Yazyk programirovaniya C# 7 i platformy .NET i .NET Core [Pro C# 7 with .NET and .NET Core]. Moscow, Saint Petersburg: Dialektika Publ., 2018. 1328 p.

#### Информация об авторах

**Краковский Юрий Мечеславович**, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru  
**Беляков Вячеслав Олегович**, аспирант кафедры информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск e-mail: surelok1@yandex.ru  
**Начигин Владимир Александрович**, канд. техн. наук, начальник инновационно-технологического центра развития Восточного полигона, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nachiginv@yandex.ru

#### Information about the authors

**Yurii. M. Krakovskii**, Doctor of Engineering Science, Professor, Full Professor of the Department «Information Systems and Information Security», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru  
**Vyacheslav O. Belyakov**, Ph.D student of the Department «Computer Science and Mathematical Modeling», Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk, e-mail: surelok1@yandex.ru  
**Vladimir A. Nachigin**, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Innovation and Technological Development Center of the Eastern Polygon, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nachiginv@yandex.ru