

# Долговечность элементов подвижного состава при циклическом нагружении

## Durability of rolling stock elements under cyclic loading

Махутов Н.А.<sup>1</sup>, Коссов В.С.<sup>2</sup>, Оганьян Э.С.<sup>2\*</sup>, Волохов Г.М.<sup>2</sup>, Красюков Н.Ф.<sup>2</sup>, Протопопов А.Л.<sup>2</sup>  
Makhutov N.A.<sup>1</sup>, Kossov V.S.<sup>2</sup>, Oganyan E.S.<sup>2\*</sup>, Volokhov G.M.<sup>2</sup>, Krasnyukov N.F.<sup>2</sup>, Protopopov A.L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН)

<sup>2</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)

<sup>2</sup>JSC Research and Design Institute for Rolling Stock (JSC VNIKTI), Kolomna, Russian Federation

\*oganian-es@vnikti.com



Махутов Н.А.



Коссов В.С.



Оганьян Э.С.



Волохов Г.М.



Красюков Н.Ф.



Протопопов А.Л.

**Резюме.** В результате длительной работы экипажной части тягового подвижного состава (рамы и кузова, их шкворневых узлов, рам тележек, осей колесных пар и др.), под действием знакопеременных циклических нагрузок происходит деградация прочностных свойств металла деталей, снижается их сопротивление усталости, что может впоследствии привести к разрушению конструкции. Поэтому прочность конструкций локомотивов и вагонов необходимо подтверждать не только коэффициентами запаса, как предусмотрено действующими нормативами, но и расчетами на долговечность (ресурс), конструкций с заданными уровнями надежности. **Цель.** Совершенствование традиционных подходов к оценке и обеспечению безопасной эксплуатации подвижного состава. **Метод.** Оценка ресурса и срока службы элементов конструкции выполняется расчетно-экспериментальными методами с использованием методов, разработанных Институтом Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН), адаптированных к конструкциям железнодорожного подвижного состава на базе опыта их эксплуатации и с использованием данных, накопленных ВНИКТИ. **Результат.** Расчеты долговечности и ресурса критически важных объектов, определение приемлемого уровня риска эксплуатации локомотива. **Заключение.** Риск-ориентированный подход способствует повышению безопасности движения на железнодорожном транспорте.

**Abstract.** As a result of lasting operation of the undercarriages of traction rolling stock (frame and body, their pivot assemblies, bogie frames, axles of wheel pairs, etc.) under alternating cyclic loads, the strength properties of the metal parts degrade, their fatigue resistance declines, which may eventually cause the structure's destruction. Therefore, the strength of the structures of locomotives and wagons is to be validated not only through safety margins as per the current regulations, but also through durability (life) predictions for such structures with predefined levels (dependability). **Aim.** To improve the conventional approaches to assessing and ensuring safe operation of rolling stock. **Method.** The life of structural elements is estimated using computations and experiments involving methods developed by the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) adapted to the structures of railway rolling stock given the existing experience of their operation and using the data collected by VNIKTI. **Results.** Calculations of the durability and life of critical items, definition of the acceptable level of risk of locomotive operation. **Conclusion.** A risk-based approach helps improve railway traffic safety.

**Ключевые слова:** долговечность, ресурс, циклическое нагружение, сопротивление усталости, повреждаемость, живучесть, безопасность эксплуатации, риск-анализ.

**Keywords:** durability, life, cyclic loading, fatigue resistance, damage rate, survivability, operational safety, risk analysis.

**Для цитирования:** Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Красюков Н.Ф., Протопопов А.Л. Долговечность элементов подвижного состава при циклическом нагружении // Надежность. 2025. №3. С. 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-3-9>

**For citation:** Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Krasnyukov N.F., Protopopov A.L. Durability of rolling stock elements under cyclic loading. Dependability 2025;3: 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-3-9>

**Поступила:** 21.03.2025 / **После доработки:** 14.05.2025 / **К печати:** 25.07.2025

**Received on:** 21.03.2025 / **Revised on:** 14.05.2025 / **For printing:** 25.07.2025

Проблемы прочности, надежности и ресурса элементов конструкций железнодорожного подвижного состава (ПС) обуславливают необходимость совершенствования традиционных подходов к обеспечению их безопасной эксплуатации. Решение этих проблем возможно путем установления фактического состояния объекта с учетом накопленных в эксплуатации циклических, коррозионных, износных и других повреждений, определяющих наступление его предельного состояния на этапах жизненного цикла.

Следовательно, актуальным является научно-техническое обоснование безопасной эксплуатации объекта по ресурсу или предельному состоянию, в частности по сопротивлению усталости (мало- и многоцикловой) на основе расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных.

Поэтому прочность конструкций локомотивов и вагонов необходимо подтверждать не только коэффициентами запаса, как предусмотрено действующими нормативами (табл. 1), но и расчетами на долговечность (ресурс), которые учитывали бы технологические, конструкционные и эксплуатационные факторы, обуславливающие работоспособность и безопасность эксплуатации конструкций с заданным уровнем надежности [1–5].

Оценка долговечности элементов конструкций выполняется расчетно-экспериментальными методами с использованием методов разработанных Институтом Машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН), адаптированных к конструкциям железнодорож-

ного подвижного состава на базе опыта их эксплуатации и с использованием накопленных АО «ВНИКТИ» результатов научно-исследовательских работ.

В основе применяющихся методов – корректированная линейная гипотеза (В.П. Когаев, Н.А. Махутов) суммирования усталостных повреждений Пальмгрена – Майнера [5]. Накопленная повреждаемость  $a_p$  принимается в этом случае в пределах от 0,5 до 2,0 (вместо 1,0).

Условие разрушения имеет вид:

$$\frac{N_{сум}}{N_0} = \frac{a_p}{n_p^m \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \geq \frac{1}{n_p}} \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^m \cdot t_i}$$

при  $\sigma_{ai} \geq 0,5 \cdot \sigma_{-1д}$ , и коэффициенте перегрузки (предельный коэффициент нагруженности), определяемом выражением:

$$n_p = \frac{\sigma_{a\max}}{\sigma_{-1д}}$$

где  $\sigma_{a\max}$  – максимальное напряжение в блоке нагружения, который вызывает разрушение детали при числе циклов  $N_{сум}$ ;  $\sigma_{-1д}$  – предел выносливости детали;  $t_i = \frac{n_i}{N_i}$  – отношение количества циклов  $n_i$  амплитуды  $\sigma_{ai}$  к соответствующему разрушающему количеству циклов  $N_i$ ;  $N_0$  – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости;  $m$  – показатель степени в уравнении наклонной ветви кривой усталости.

Для расчета долговечности с целью учета эксплуатационных нагрузок различного уровня и имеющих

Табл. 1. Критерии, применяемые для оценки прочности

Подвижной состав	Оценка статической прочности по допускаемым напряжениям [1, 2]		Оценка сопротивления усталости по допускаемому коэффициенту запаса $n$ [1, 2]
	I режим	III режим	
Локомотивы	$\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_{0,2}$	$\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,55 \cdot \sigma_{0,2}$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{a\sigma} + \psi \cdot \sigma_m} \geq 2$
Вагоны	$\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_{0,2}$	$\sigma_{\sigma} \leq [\sigma] = 0,60 \cdot \sigma_{0,2}$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{a\sigma}} \geq 1,4 \dots 1,8$

Примечание:  $\sigma_{\sigma}$  – эквивалентные (по Мизесу) напряжения в конструкции;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости стандартного образца;  $K_{\sigma}$  – коэффициент понижения предела выносливости;  $\sigma_{a\sigma}$  – амплитуды эксплуатационных циклических напряжений;  $\sigma_m$  – среднее напряжение цикла;  $\psi$  – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Табл. 2. Блок нагружения в виде ступенчатой последовательности амплитуд  $\sigma_{ai}$  с числом циклов  $n_i$  и их распределением в относительных величинах

$\sigma_{ai}$ , МПа	$n_i$ , МПа	$A_i = \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}}$	$t_i = \frac{n_i}{N_{\Sigma}}$	$A_i^m \cdot t_i$
$\sigma_{a1}$	$n_1$	$A_1$	$t_1$	$A_1^m \cdot t_1$
$\sigma_{a2}$	$n_2$	$A_2$	$t_2$	$A_2^m \cdot t_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\sigma_{a\max}$	$n_k$	1,0000	$t_k$	$A_k^m \cdot t_k$
$\Sigma$	$\Sigma n_i, (N_{\Sigma}^{\delta})$	-	1,0	-

Табл. 3. Параметры ресурса литой боковой рамы тележки с учетом факторов технологической дефектности

Факторы дефектности	Ресурс	
	Число разрушающих циклов нагружения	Лет эксплуатации при пробеге 100 тыс. км/год
Технологические дефекты отсутствуют, размеры поперечного сечения номинальные	$86 \cdot 10^6$	26
Остаточные напряжения после заварки литейных дефектов в радиусе R55 без последующей термообработки	$13 \cdot 10^6$	3,8
Внутренний дефект литья в зоне R55 (газовая пора размером 15x5x5 мм на глубине 1/3 толщины стенки)	$5,8 \cdot 10^6$	1,7

случайный характер, формируют суммарный режим нагружения – блок или спектр эксплуатационных нагрузок (табл. 2), представляемый распределением частот, т.е. гистограмм (рис. 1) или плотностью вероятностей амплитуд напряжений (рис. 2).

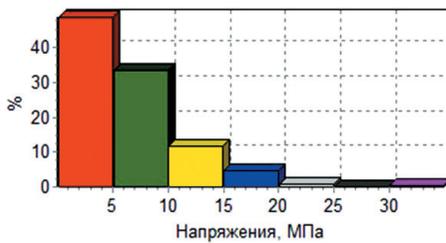


Рис. 1. Гистограмма распределения текущих значений амплитуд динамических напряжений в раме тележки тепловоза

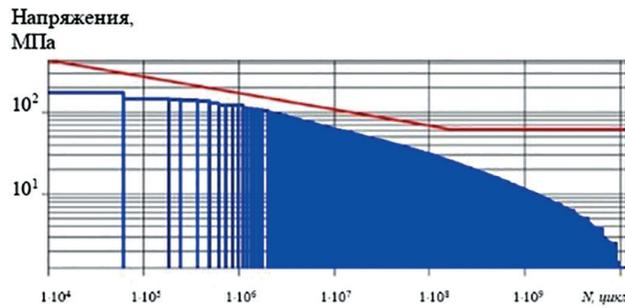


Рис. 2. Спектр нагрузок (амплитуд напряжений)

В табл. 3 представлены результаты расчета ресурса боковой рамы тележки грузового вагона в зависимости от допускаемой (по ГОСТ 32400-2013 «Литые детали тележек. Технические условия») технологической дефектности, моделируемой в расчете в виде трещино-подобного дефекта.

Учитывается и следующее. Как известно, при построении кривой усталости правая ветвь обычно условно принимается горизонтальной (т.е. долговечность при этом уровне напряжений считается неограниченной). Но, как установлено, для деталей, работающих в многогигацикловой области нагружения (оси, колеса, рамы и др.), правая ветвь оказывается также наклонной, хотя и более пологой, т.е. с гораздо большей величиной показателя  $m$  (рис. 3).

При этом подразумевается, что для натуральных объектов найдена взаимосвязь между углами наклона правой

( $m_2$ ) и левой ( $m_1$ ) ветвей кривой усталости, описываемой формулой вида:

$$\sigma_{ai}^m \cdot N_i = const.$$

В зависимости от требуемой надежности оценки величины ресурса, кривая усталости детали может быть эквидистантно опущена (рис. 3) для значения предела выносливости, рассчитанного с учетом квантиля нормального распределения ( $U_p$ ) и коэффициента вариации ( $v_{-1}$ ) по формуле:

$$\sigma_{-1\theta} = \overline{\sigma_{-1\theta}} \cdot (1 - U_p \cdot v_{-1}).$$

При этом используются параметры нагруженности и характеристики сопротивления усталости, полученные путем испытаний натуральных деталей. Представленные требования и критерии прочности, ресурса и безопасности объектов, их критических элементов на жизненном цикле предусмотрены разработанным АО «ВНИКТИ» совместно с ИМАШ РАН ГОСТ Р 57445-2017 [7].

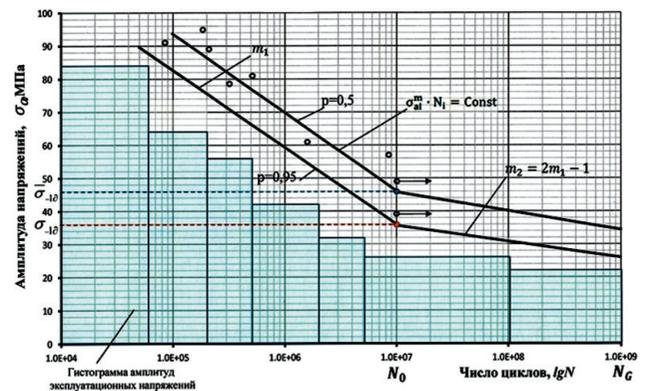


Рис. 3. Характеристики нагруженности и сопротивления усталости детали:  $m_1, m_2$  – показатели угла наклона кривой усталости;  $N_0, N_G$  – базы испытаний в многоцикловой и гигацикловой области;  $\overline{\sigma_{-1d}}, \sigma_{-1\theta}$  – пределы выносливости детали при вероятности неразрушения  $P = 0,50$  и  $P = 0,95$  соответственно

Развивая риск-ориентированный подход к обеспечению долговечности, целесообразно рассматривать безопасность ПС в нестандартных ситуациях, которые случаются на железнодорожном транспорте по причине отказа техники, человеческого и других факторов, в результате чего повреждаются единицы ПС, сходят с рельсов. При этом могут травмироваться и получать уве-



Рис. 4. Авария в грузовом поезде по причине излома боковой рамы тележки вагона

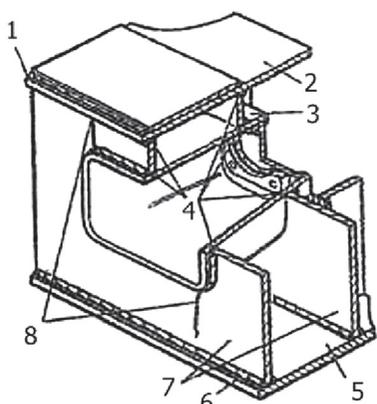
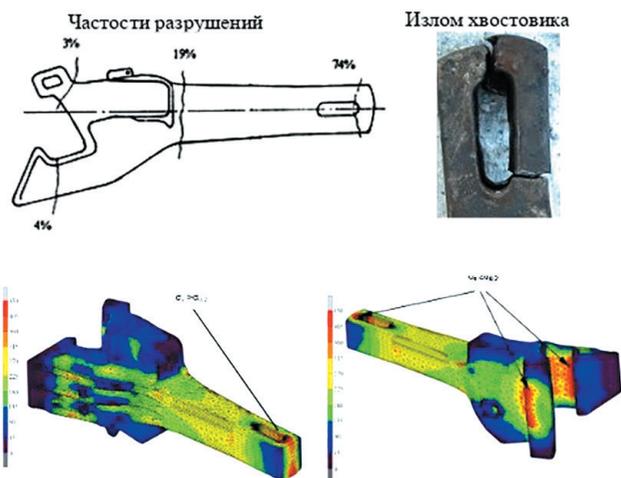


Рис. 5. Узел боковой рамы тележки моторвагона:

- 1 – верхний пояс; 2 – шкворневая балка; 3 – карман демпфера; 4 – зоны непровара; 5 – боковина; 6 – нижний пояс; 7 – стенки; 8 – зоны образования усталостных трещин

чья члены локомотивных и поездных бригад, пассажиры поезда. Опасным источником таких случаев являются изломы деталей ПС. К критически важным элементам конструкций, способным инициировать их, относятся, прежде всего: колесные пары, сцепные устройства, рамы тележек, главные рамы, шкворневые узлы, элементы крепления тяжелого оборудования и тягового привода. Примеры разрушений подобных деталей приведены на рис. 4–7. Проблема обеспечения безопасности в этих условиях становится особенно актуальной в связи с развитием высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Однако в рамках сложившихся подходов при создании подвижного состава разработка технических заданий (ТЗ) и технико-экономическое обоснование (ТЭО) выполняются обычно без учета требований по безопасности его эксплуатации. Дело в том, что действующая традиционная нормативно-техническая база построена в основном на рассмотрении условий в направлении от простых к сложным условиям (табл. 4). Задачи обеспечения эксплуатационной безопасности потенциально опасных объектов решаются по принципу, что если удовлетворены действующие нормативы [1, 2], то специальный количественный анализ безопасности уже не требуется [3–5].



Напряженное состояние корпуса от растяжения силой 2,5 МН

Рис. 6. Характер разрушений корпуса автосцепки

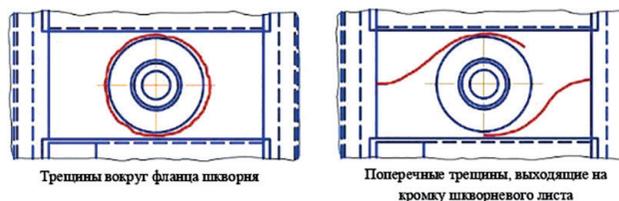


Рис. 7. Общие виды трещин в околошовной зоне шкворневого узла балки рамы тепловоза

Это привело к тому, что для анализа каждой нештатной ситуации с тяжелыми последствиями создаются специальные комиссии и разрабатываются необходимые ремонтно-восстановительные мероприятия.

В риск-ориентированном подходе [4, 9] изначально решается задача оценки достижения заданных (приемлемых) рисков возможных отказов, разрушений и аварий с нанесением вреда человеку, технике и окружающей среде (табл. 4).

С этой целью совершенствуется нормативно-методическая база, предусматривающая:

- применение современных методов анализа нагруженности, характеристик сопротивления усталости

Табл. 4. Структура обеспечения механической безопасности объектов ж/д транспорта

Годы	Этапы развития	Базовые требования		Критерии технического состояния	Обозначение	Признаки предельных состояний	Построение анализа требований
		Критически Важные Объекты	Риск				
2020	VII	Критически Важные Объекты	Риск	Приемлемые риски отказов, аварий и катастроф	R	Превышение приемлемых рисков	
1990	VI	Потенциально Опасные Объекты	Безопасность	Управление безопасностью	S	Критическое состояние: угроза разрушения, аварии, нанесение вреда человеку, окружающей среде	
1980	V	Объекты Технического Регулирования	Живучесть	Трещиностойкость	$L_{1d}$	Предельный размер дефекта. Критическое значение КИН	
1970	IV		Надежность	Отказоустойчивость	$P_{QR}$	Достижение вероятности выхода из строя, отказа	
1960	III		Ресурс	Долговечность	$R_{Nt}$	Достижение предельных: числа циклов, износа, деформаций	
1940	II		Жесткость, устойчивость	Сохранение размеров и формы	$R\delta$ $R\lambda$	Потеря устойчивости. Остаточная деформация. Вибрация (резонанс)	
1920	I		Прочность	Неразрушаемость	$R\sigma$	Трещиноподобный дефект. Истощение запаса. Трещина	

Табл. 5. Пример расчета для грузовых локомотивов частоты нештатных событий с приемлемым уровнем риска

№ п/п	Наименование показателя	Тепловоз	Электровоз
1	Допустимая частота событий за 1 час эксплуатационной работы (этапное значение критерия РАС-TS, ЖДМ-2007, № 12, с 60-65), $p_3$	$10^{-9}$ час <sup>-1</sup>	
2	Среднетехническая скорость – $V$ , км/ч	45	60
3	Среднегодовой пробег – $L$ , км	121 200	167 040
4	Продолжительность эксплуатационной работы за 1 год – $T_1 = L/V$ , час	2 693	2 784
5	То же за назначенный срок службы (45 лет) – $T_{45} = T_1 \cdot 45$ , час	121 200	125 280
6	Приемлемая частота событий за 1 год эксплуатации – $p_1 = p_3 \cdot T_1$	$2,69 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-6}$
7	То же за назначенный срок службы, т.е. за 45 лет – $p_{45} = p_3 \cdot T_{45}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$

и живучести несущих конструкций и ответственных деталей ПС;

– разработку критериев безопасности по условиям прочности, долговечности и рисков, определение их приемлемых значений (табл. 5);

– моделирование экстремальных и аварийных условий и видов нагружения объекта;

– моделирование совместных и отдельных компонентов и видов (механических, тепловых и др.) воздействий на исследуемые объекты;

– включение в ТЗ и ТЭО требований безопасности критически важных объектов в нештатных (запроектных) условиях.

В результате могут быть достигнуты приемлемые риски эксплуатации потенциально опасных и критически важных узлов и деталей ПС, что может способствовать повышению безопасности движения на железнодорожном транспорте.

### Список литературы

- ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2014. 72 с.
- ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 53 с.
- Обеспечение безопасной эксплуатации подвижного состава на основе стратегии управления ресурсом на этапах жизненного цикла / Э.С. Оганьян, В.С. Коссов, Г.М. Волохов, М.Н. Овечников, А.С. Гасюк // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 36–40.
- Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: ЛЕНАНД, 2018. 720 с.

5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта» Раздел II. Техногенная безопасность железнодорожного транспорта: коллективная монография / Н.В. Абросимов, В.А. Акимов, А.В. Алешин [и др.]; науч. рук. чл.-корр. РАН Н.А. Махутов. М.: МГОФ Знание, 2021. 488 с.

6. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Под ред. А.П. Гусенкова. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

7. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса. М. Стандартинформ, 2017. 26 с.

8. Алгоритм снижения риска возникновения нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте по условиям безопасности подвижного состава / В.С. Коссов, Н.Ф. Красюков, Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, Д.А. Князев / Материалы третьей международной научно-технической конференции: «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы», г. Ташкент, 17–20 апреля 2024 г. Ташкент: ТГТУ, 2024. 488 с.

9. Риск-ориентированный подход и критерии его использования при оценке безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте / Г.М. Волохов, Э.С. Оганьян, А.А. Лунин, Д.А. Князев, Н.Ф. Красюков // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции, г. Ташкент, 17–20 апреля 2024 г. Ташкент: ТГТУ, 2024. 488 с.

## References

1. GOST R 55513-2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic performance. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)

2. GOST R 33211-2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic performance. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

3. [Ensuring safe operation of rolling stock based on life management strategy at life cycle stages]. Oganyan E.S., Kossov V.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Gasyuk A.S. *Zheleznodorozhny transport* 2018;12:36-40. (in Russ.)

4. Matters of strength, technological safety and structural materials science. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Romanov A.N, editors. Moscow: LENAND; 2018. (in Russ.)

5. Abrosimov N.V., Akimov V.A., Alyoshin A.V. et al. Makhutov N.A., corresponding member of RAS, academic adviser. Russia's security. Legal, socio-economic, scientific, and technological aspects. In: Safety of railway transportation. Section II. Technological safety of railway transportation: a collective monograph. Moscow: MGOF Znanie; 2021. (in Russ.)

6. Kogaev V.P. Gusenkov A.P., editor. [Time-variable strength calculation]. Moscow: Mashinostroenie; 1993. (in Russ.)

7. GOST R 57445-2017. Railway technical means. General requirements for methods of life time estimation. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

8. Kossov V.S., Krasnyukov N.F., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Knyazev D.A. [Algorithm for reducing the risk of contingency situations in railway transport based on rolling stock safety conditions]. In: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects. Tashkent, April 17-20; 2024. Tashkent: TSTU; 2024. (in Russ.)

9. Volokhov G.M., Oganyan E.S., Lunin A.A., Knyazev D.A., Krasnyukov N.F. [A risk-oriented approach and application criteria for safety assessment of the railway transportation process]. In: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects. Tashkent, April 17-20; 2024. Tashkent: TSTU; 2024. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Махутов Николай Андреевич** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИМАШ РАН.

Адрес: Малый Харитоньевский переулок, д.4, Москва, Российская Федерация, 101000. E-mail: info@imash.ru

**Коссов Валерий Семенович** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: info@vnikti.com

**Оганьян Эдуард Сергеевич** – доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: oganian-es@vnikti.com

**Волохов Григорий Михайлович** – доктор технических наук, главный научный эксперт АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

**Красюков Николай Федорович** – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: oganian-es@vnikti.com

**Протопопов Андрей Леонидович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». Адрес: ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Москов-

ская область, Российская Федерация, 140402. E-mail: protopopov-al@vnikti.com

## About the authors

**Nikolay A. Makhutov**, Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, IMASH RAN. Address: 4 Malyy Kharitonyevsky Pereulok, Moscow, 101000, Russian Federation. E-mail: info@imash.ru

**Valery S. Kossov**, Doctor of Engineering, Professor, Director General, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: info@vnikti.com

**Eduard S. Oganyan**, Doctor of Engineering, Chief Researcher, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: oganian-es@vnikti.com

**Grigory M. Volokhov**, Doctor of Engineering, Chief Scientific Expert, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

**Nikolay F. Krasnyukov**, Candidate of Engineering, Lead Engineer, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: oganian-es@vnikti.com

**Andrey L. Protopopov**, Candidate of Engineering, Lead Researcher, JSC Research and Design Institute for Rolling Stock. Address: 410 Oktyabrskoy revolyutsii st., Kolomna, 140402, Moscow Oblast, Russian Federation. E-mail: protopopov-al@vnikti.com

## Вклад авторов в статью

Махутов Н.А. – разработка требований к методам определения ресурса, риск-ориентированный подход.

Коссов В.С. – научно-техническое обоснование безопасности эксплуатации объекта на основе расчетно-экспериментальных исследований.

Волохов Г.М. – риск-анализ конструкций, построение структуры отказов потенциально-опасных узлов подвижного состава.

Красюков Н.Ф. – моделирование экстремальных и аварийных ситуаций и видов нагружения объектов.

Протопопов А.Л. – анализ нагруженности, характеристик сопротивления усталости и живучести деталей подвижного состава с применением методов механики разрушения.

Оганьян Э.С. – формирование и анализ спектра нагруженности, оценка долговечности конструкций подвижного состава на основе гипотез суммирования повреждений.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.