

В. Г. Каргин, С. В. Беспалько, А. В. Третьяков, А. С. Шинкарук, А. А. Рогов

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. Система технического обслуживания и ремонта (СТОИР) вагона включает в себя плановые ремонты (ремонты крупного объема) и текущие ремонты и техническое обслуживание в промежутках между плановыми ремонтами (далее – межремонтные периоды, МРП). В данной работе рассматривается СТОИР рефрижераторных вагонов с точки зрения путей ее совершенствования. На основе анализа существующей системы ремонта производится варьирование сроками проведения плановых ремонтов. При этом решается оптимизационная задача, в которой на основе принятого критерия определяется наилучшее сочетание указанных сроков. В результате становится возможным как повысить экономическую эффективность эксплуатации вагонов, так и увеличить срок службы. Введен новый термин «прибыль единицы пробега» (далее – ПЕП), который обозначает отношение общей прибыли от эксплуатации вагона к общему сроку его службы. Данный показатель, позволяющий оценивать экономический эффект от эксплуатации вагона, примем в качестве критерия оптимизации системы технического обслуживания и ремонта рефрижераторных вагонов.

Ключевые слова: рефрижераторный вагон, ремонт, техническое обслуживание, прибыль, срок службы, эксплуатация.

Для цитирования: Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта рефрижераторных вагонов / В. Г. Каргин, С. В. Беспалько, А. В. Третьяков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_105.

Введение

Система технического обслуживания и ремонта (СТОИР) у рефрижераторных вагонов включает традиционные виды [1], а именно: капитальный ремонт (КР), деповской ремонт (ДР), техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) в межремонтный период.

В статье [2] предлагается математический подход к решению задач оптимизации СТОИР с применением в качестве критерия себестоимости единицы пробега (СЕП). При этом минимум целевой функции определяется по условию экстремума функции нескольких переменных (межремонтных периодов). Это позволило разработать научно обоснованный инструментарий для количественной оценки целевого состояния единицы, модели, типа грузового подвижного состава и вагонной отрасли в целом для его перехода к интеллектуальному управлению железнодорожным транспортом. В статье [3] в качестве критерия оптимизации также принята СЕП и разработаны алгоритмы оптимизации на основе методов рекурсивного перебора, покоординатного и градиентного спуска. Результаты исследования предлагается использовать в работе вагонного комплекса, а также при проектировании подвижного состава по системе «вагон – эксплуатационная среда». В научной статье [4] авторы предлагают в качестве критерия оптимизации использовать максимум рентабельности продаж (ROS). Это смещает фокус с чисто технической оптимизации на экономическую эффективность, в рамках чего решается задача перехода от нормативной (календарно-пробежной) системы ТОиР пассажирских вагонов к экономически оптимизированной. Разработанный программный инструментарий позволяет гибко настраивать параметры ремонтных циклов под конкретные условия эксплуатации.

Проанализированные научные работы и результаты научных исследований позволяют сделать вывод, что исследования в области поиска оптимизационных решений в рамках технического обслуживания и ремонта пассажирского и грузового подвижного состава имеют достаточно обширную проработку. При этом необходимо отметить, что существующая СТОИР применительно к автономному рефрижераторному вагону (АРВ) имеет определенные недостатки и нуждается в совершенствовании. Это связано с тем, что сроки проведения плановых ремонтов, а также и срок службы вагона, заданы без необходимого обоснования. Кроме того, существующая система недостаточно «синхронизирована» со сроками службы отдельных элементов вагона. Следовательно, задача по оптимизации системы технического обслуживания и ремонта АРВ является актуальной.

Материалы и методы

Для оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов примем в качестве критерия прибыль единицы пробега. Для его выражения целевая функция оптимизации выражается следующим образом:

$$f(\vec{l}) = \frac{V(\vec{l}) - Z(\vec{l})}{\sum_{i=1}^m l_i} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $\vec{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_m \end{bmatrix}$ – вектор межремонтных периодов; m – количество межремонтных периодов; $V(\vec{l})$ – общая

сумма выручки от эксплуатации вагона как функция $\vec{l}$; $Z(\vec{l})$ – общая сумма затрат от эксплуатации как функция $\vec{l}$.

В качестве неизвестных выступают межремонтные периоды, равные промежуткам между постройкой, депо-скими, капитальными ремонтами и списанием вагона. Оптимальное сочетание длительностей МРП должно обеспечить максимальное значение критерия (1).

Выбор прибыли единицы пробега в качестве критерия при оптимизации СТОИР имеет определенные преимущества перед традиционным критерием стоимости единицы пробега. ПЕП позволяет учесть такую важную для экономической оценки величину, как выручка от эксплуатации. Отношение прибыли к длительности срока службы имеет и дополнительное достоинство, так как дает возможность более точно оценить экономическую эффективность принятой системы. Следует учитывать, что при превышении затрат над выручкой в числителе выражения (1) получится отрицательное значение, означающее убыток. При этом предлагаемая методика сохраняет работоспособность.

Выразим величины выручки и затрат, входящие в целевую функцию (1). При определении выручки будем считать ее изменяющейся ступенчато в соответствии с каждым МРП:

$$V(\vec{l}) = \sum_{i=1}^m (v_i l_i), \quad (2)$$

где v_i – удельная выручка, отношение выручки за время МРП к соответствующей длительности времени (пробегу); l_i – длительность МРП, варьирующаяся в пределах $[l_{\min}; l_{\max}]$; i – номер межремонтного периода; m – общее количество МРП.

Выразим также затраты на эксплуатацию. К затратам относятся:

- 1) неизменные затраты, приходящиеся на стадии определения исходных требований к вагону, разработки, производства и утилизации; при этом доходы от утилизации входят с противоположным знаком;
- 2) затраты на плановые виды ремонта (ДР, КР);
- 3) затраты на техническое обслуживание, текущие, неплановые ремонты (далее – ТО и ТР) и на инфраструктуру в пределах каждого межремонтного периода; данный вид затрат начисляется в сумме, квадратично зависящей от длительности МРП [5, 6, 2].

Тогда общую величину затрат можно выразить как сумму:

$$Z(\vec{l}) = Z_1 + Z_2 + Z_3(\vec{l}), \quad (3)$$

где $Z_1 = S + Q_1 - Q_2$ – неизменные затраты; $Z_2 = \sum_{j=1}^n R_{\text{КР}j} + \sum_{k=1}^{m-n-1} R_{\text{ДР}k}$ – затраты на КР и ДР; $Z_3 = \sum_{i=1}^m (a_i l_i + b_i l_i^2)$ – затраты на ТО и ТР и инфраструктуру; n – количество КР в системе технического обслуживания и ремонта; S – стоимость постройки вагона; Q_1 – затраты на утилизацию вагона; Q_2 – доходы от списания вагона; $R_{\text{КР}j}$ – затраты на j -й капитальный ремонт; $R_{\text{ДР}k}$ – затраты на k -й депо-вской ремонт; a_i, b_i – коэффициенты роста затрат на ТО и ТР в пределах на i -го МРП.

С учетом выражений (2) и (3) целевая функция (1) имеет вид:

$$f(\vec{l}) = \frac{\sum_{i=1}^m (v_i l_i) - Z_1 - Z_2 - \sum_{i=1}^m (a_i l_i + b_i l_i^2)}{\sum_{i=1}^m l_i} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Целевая функция (4) представляет собой функцию нескольких переменных, необходимое условие экстремума которой записывается через частные производные следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_1} = 0; \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_m} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем частную производную по переменной l_k :

$$\frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_k} = \frac{v_k - a_k - 2b_k l_k}{\sum_{i=1}^m l_i} - \frac{\sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) - Z_1 - Z_2}{\left(\sum_{i=1}^m l_i\right)^2}. \quad (6)$$

С учетом (3, 6) получим систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} 2b_1 l_1 \sum_{i=1}^m l_i = (v_1 - a_1) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2; \\ 2b_2 l_2 \sum_{i=1}^m l_i = (v_2 - a_2) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2; \\ \dots \\ 2b_m l_m \sum_{i=1}^m l_i = (v_m - a_m) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2. \end{cases} \quad (7)$$

Для решения системы уравнений (7) можно применить метод простых итераций [7, 8]. Приведем систему уравнений к следующему виду:

$$\begin{cases} l_1 = \frac{(v_1 - a_1)L - P}{2b_1 L} = \varphi_1(\vec{l}); \\ l_2 = \frac{(v_2 - a_2)L - P}{2b_2 L} = \varphi_2(\vec{l}); \\ \dots \\ l_m = \frac{(v_m - a_m)L - P}{2b_m L} = \varphi_m(\vec{l}), \end{cases} \quad (8)$$

где $L = \sum_{i=1}^m l_i$ – общий срок службы вагона; $P = \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) - Z_1 - Z_2$ – общая прибыль от эксплуатации одного вагона.

Представим систему уравнений (8) в векторной форме:

$$\vec{l}|_1 = \vec{\Phi}(\vec{l}|_0), \quad (9)$$

$$\text{где } \vec{\Phi} = \begin{bmatrix} \frac{(v_1 - a_1)L - P}{2b_1L} \\ \frac{(v_2 - a_2)L - P}{2b_2L} \\ \dots \\ \frac{(v_m - a_m)L - P}{2b_mL} \end{bmatrix} - \text{вектор функций правой части; } \vec{l}|_1 - \text{новое приближение вектора}$$

длительностей МРП на данной итерации; $\vec{l}|_0$ – предыдущее приближение вектора длительностей МРП.

Тогда общую последовательность применения метода простых итераций можно представить так:
– задается начальное приближение вектора длительностей межремонтных периодов, например:

$$\vec{l}|_0 = \left\{ \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}, \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}, \dots, \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2} \right\};$$

- вычисляются значения переменных L и P ;
- определяется вектор $\vec{\Phi}$ и находится новое приближение вектора длительностей МРП по (9);
- оценивается погрешность вычисления путем сравнения максимального изменения длительности МРП с заданной точностью ε ; если выполняется условие:

$$\max(l_i|_1 - l_i|_0) \leq \varepsilon, \quad (10)$$

то итерационный процесс можно считать завершенным; если же нет – то новое приближение принимается в качестве начального для следующей итерации, и процесс повторяется;

– по завершении итераций последнее приближение вектора $\vec{l}$ принимается в качестве окончательного и вычисляются итоговые значения срока службы L , выручки V (2), затрат Z (3) и критерия прибыли единицы пробега (1).

На основе разработанных программ было выполнено решение задачи оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов. За основу был взят вариант системы технического обслуживания и ремонта, приведенный на рис. 1. По разработанной методике выполнены расчеты базовой СТОИР.

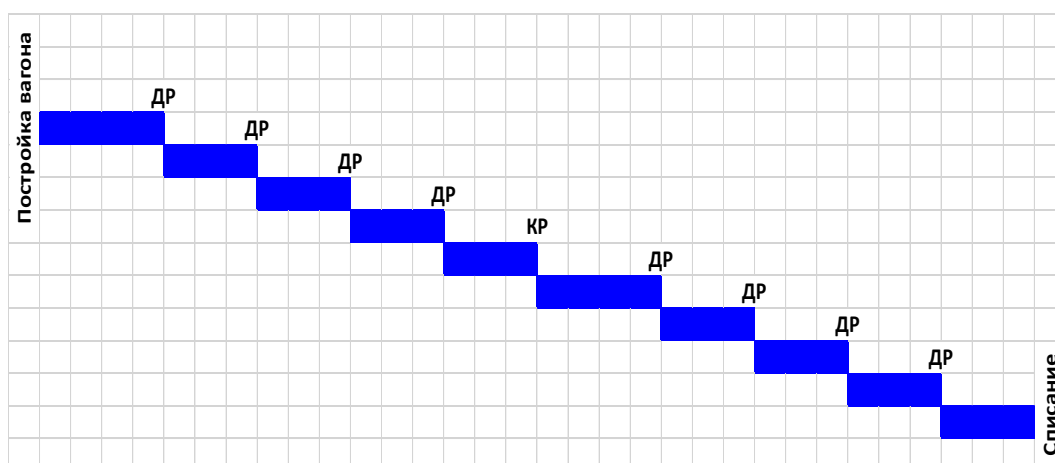


Рис. 1. Базовая система ТОИР

Были выполнены массовые расчеты с оценкой зависимости экономических показателей от длительности срока службы. Результаты представлены на рис. 2, 3. Оказалось, что оптимальна система с одинаковыми значениями длительности каждого МРП, равными 5,35 лет, или 1956 дней. Это соответствует общему сроку службы 53,5 года. На рис. 4 показаны гистограммы длительностей МРП для исходной системы, а также оптимизированной.

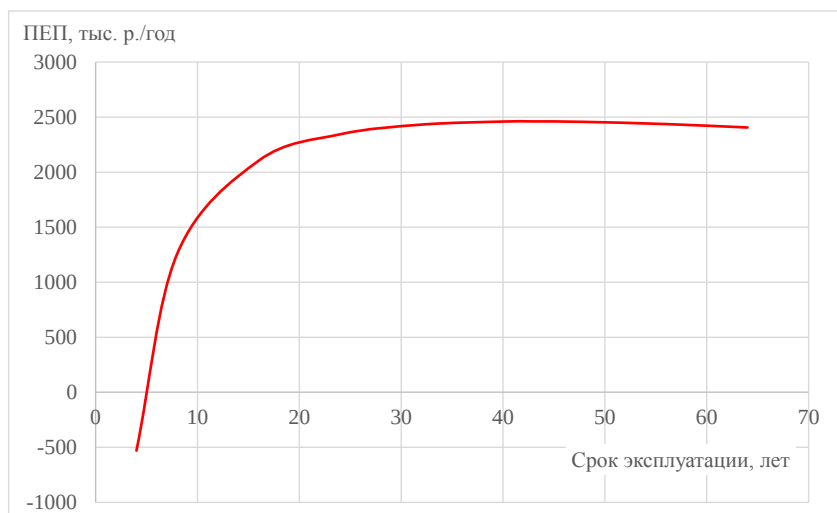


Рис. 2. Зависимость ПЕП от общего срока службы

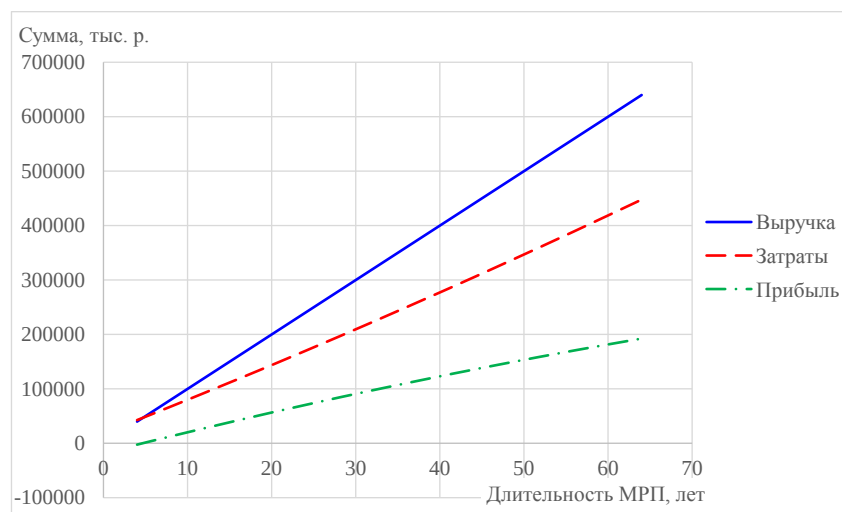


Рис. 3. Зависимость экономических показателей от общего срока службы

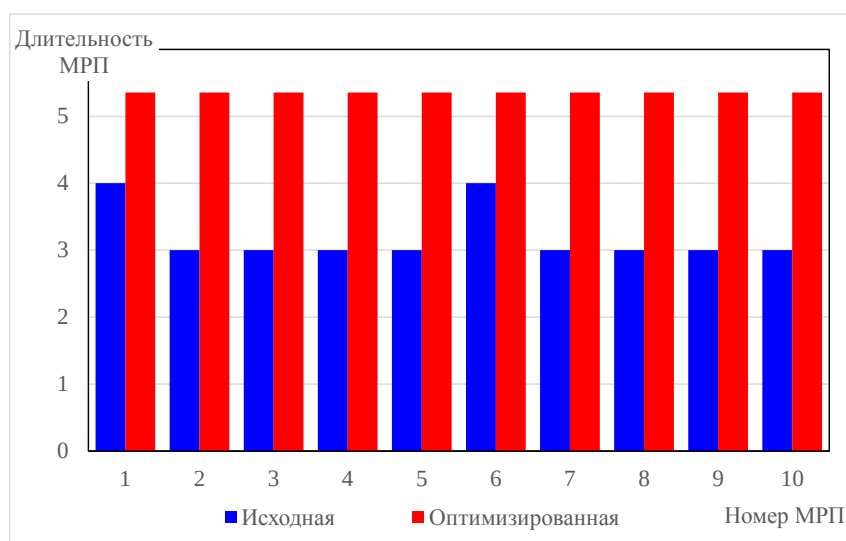


Рис. 4. Гистограммы длительностей МРП

Равномерность длительностей МРП можно объяснить тем, что коэффициенты затрат на ТО и ТР принимались одинаковыми для всего срока службы вагона.

Заключение

Разработана методика оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов на основе критерия прибыли единицы пробега.

Предложен способ решения оптимизационной задачи с применением метода простых итераций для решения системы нелинейных уравнений.

Проведено имитационное моделирование с применением разработанных программ.

Проведенное исследование позволило создать оптимизированную СТОИР для АРВ при их проектировании и эксплуатации во взаимодействии с изготовителем подвижного состава [9, 10]. Предлагаемая система включает 10 МРП с длительностями, равными 5,35 лет, или 1956 дней. Это соответствует общему сроку службы 53,5 года.

Таким образом, при исходном сроке службы в 32 года представляется возможным и экономически целесообразным увеличить срок службы на 50 % – до 48 лет.

Методика может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих АРВ при выборе СТОИР, которая также позволяет определять оптимальные длительности МРП при заданных экономических условиях.

Список литературы

1 Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотра вагона) № 808-2022 ПКБ ЦВ, утверждена Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества Протоколом 8 декабря 2022 г. № 77. – Москва : ЦЕНТРАГ, 2026. – 204 с. – ISBN 979-5-903030-49-0.

2 **Устич, П. А.** Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов / П. А. Устич, А. А. Иванов, Ф. А. Мажидов // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 10 (50). – С. 29–38. – ISSN 0869-4931.

3 Моделирование и оптимизация системы ремонта вагонов / А. В. Зяблов, С. В. Беспалько, П. С. Григорьев, Ю. А. Кузнецова // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 64–66. – ISSN 0044-4448.

4 **Шинкарук, А. С.** Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов / А. С. Шинкарук, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 11 (35). – С. 64–70. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

5 Вагонное хозяйство : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Ивашов, М. В. Орлов, П. А. Устич [и др.] ; под редакцией П. А. Устича. – Москва : Маршрут, 2003. – 560 с. – ISBN 5-89035-082-X.

6 **Польщиков, А. Д.** К проблеме организации системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов в современных условиях работы вагонного хозяйства / А. Д. Польщиков, А. А. Иванов // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта : материалы Международной студенческой научно-практической конференции : в 2 ч. Ч. 2. Нижний Новгород, 10 апреля 2019 года / Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Нижнем Новгороде. – Нижний Новгород : Научно-издательский центр «21 век», 2019. – С. 320–324. – EDN CDKISX.

References

1 Instructions for the technical maintenance of wagons in operation (instructions for wagon inspectors) No. 808-2022 PKB CV approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States by Protocol No. 77 of December 8, 2022. – Moscow : CENTERMAG, 2026. – 204 p. – ISBN 979-5-903030-49-0.

2 **Ustich, P. A.** Application of information technologies in the system of maintenance and repair of wagons / P. A. Ustich, A. A. Ivanov, F. A. Mazhidov // Automation. Modern technologies. – 2016. – No. 10 (50). – P. 29–38. – ISSN 0869-4931.

3 Modeling and optimization of the wagon repair system / A. V. Zyablov, S. V. Bepalko, P. S. Grigoriev, Yu. A. Kuznetsova // Railway transport. – 2021. – No. 2. – P. 64–66. – ISSN 0044-4448.

4 **Shinkaruk, A. S.** Optimization of the system of technical maintenance and repair of passenger cars / A. S. Shinkaruk, S. V. Bepalko // Transport engineering. – 2024. – No. 11 (35). – P. 64–70. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

5 Wagon fleet : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. A. Ivashov, M. V. Orlov, P. A. Ustich [et al.] ; edited by P. A. Ustich. – Moscow : Route, 2003. – 560 p. – ISBN 5-89035-082-X.

6 **Polshchikov, A. D.** On the problem of organizing the system of maintenance and repair of freight cars in modern conditions of operation of the carriage industry / A. D. Polshchikov, A. A. Ivanov // Infrastructure and operation of land transport : proceedings of the International student scientific and practical conference : in 2 parts, Nizhny Novgorod, April 10, 2019 / Branch of Samara State Transport University in Nizhny Novgorod. – Nizhny Novgorod : Scientific Publishing Center "21st Century", 2019. – P. 320–324. – EDN CDKISX.

7 **Зенков, А. В.** Численные методы : учебное пособие / А. В. Зенков. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-7996-1781-3.

8 **Калиткин, Н. Н.** Численные методы : учебное пособие / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с. – ISBN 978-5-9775-0500-0.

9 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) // Ространснадзор : официальный сайт. – URL: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/%D0%9C%D0%A2%D0%A3%20%D0%9F%D0%9E%20%D0%94%D0%A4%D0%9E/%D0%A2%D0%A0%20%D0%A2%D0%A1%20001_2011.pdf?ysclid=mpzey54jdw868875485 (дата обращения: 29.05.2026).

10 Приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 года № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» // Гарант : информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/405042985> (дата обращения: 29.05.2026).

7 **Zenkov, A. C.** Numerical methods : textbook / A. C. Zenkov. – Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016. – 124 p. – ISBN 978-5-7996-1781-3.

8 **Kalitkin, N. N.** Numerical methods : textbook / N. N. Kalitkin. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg, 2011. – 592 p. – ISBN 978-5-9775-0500-0.

9 Technical Regulations of the Customs Union “On the safety of railway rolling stock” (TR CU 001/2011). // Rosrtansnadzor : official website. – URL: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/%D0%9C%D0%A2%D0%A3%20%D0%9F%D0%9E%20%D0%94%D0%A4%D0%9E/%D0%A2%D0%A0%20%D0%A2%D0%A1%20001_2011.pdf?ysclid=mpzey54jdw868875485 (date of access: 29.05.2026).

10 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 No. 250 “On approval of the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation” // Garant : information and legal support. – URL: <https://base.garant.ru/405042985> (date of access: 29.05.2026).

V. G. Kargin, S. V. Bepalko, A. V. Tretyakov, A. S. Shinkaruk, A. A. Rogov

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF REFRIGERATED CARS

Abstract. The railcar maintenance and repair system (MRS) includes scheduled repairs (major repairs) and routine repairs and maintenance between scheduled repairs (hereinafter referred to as inter-repair periods, or IRPs). This paper examines the MRS of refrigerated railcars for potential improvement. Based on an analysis of the existing repair system, the scheduled repair intervals are varied. An optimization problem is solved, in which the best combination of these intervals is determined based on the adopted criterion. This makes it possible to both improve the economic efficiency of railcar operation and extend its service life. A new term, "unit profit per mileage" (hereinafter referred to as UPM), is introduced, which denotes the ratio of the total profit from railcar operation to its overall service life. This indicator, characterizing the economic efficiency of railcar operation, will be adopted as a criterion for optimizing the MRS of refrigerated railcars.

Keywords: refrigerated car, repair, maintenance, profit, service life, operation.

For citation: Optimization of the system for maintenance and repair of refrigerated cars / V. G. Kargin, S. V. Bepalko, A. V. Tretyakov [at al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_105.

Сведения об авторах

Каргин Валентин Геннадьевич

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: w_g_k@mail.ru

Беспалько Сергей Валерьевич

Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: besp-alco@yandex.ru

Information about the authors

Kargin Valentin Gennadievich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: w_g_k@mail.ru

Bepalko Sergey Valeryevich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: besp-alco@yandex.ru

Третьяков Александр Владимирович

Петербургский университет путей сообщения
императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: AVTretiakov@pgups.ru

Шинкарук Андрей Сергеевич

Акционерное общество
«Федеральная пассажирская компания»,
доктор технических наук,
главный ревизор по безопасности
движения поездов,
e-mail: Shinkarukas@mail.ru

Рогов Анатолий Алексеевич

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Менеджмент качества»,
кандидат физико-математических наук,
доцент,
e-mail: rogov_a@rambler.ru

Tretyakov Alexander Vladimirovich

Emperor Alexander I Saint Petersburg
State Transport University (PGUPS),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: AVTretiakov@pgups.ru

Shinkaruk Andrey Sergeevich

Joint Stock Company
“Federal Passenger Company”,
Doctor of Engineering Sciences,
Chief Auditor for Train Safety,
e-mail: Shinkarukas@mail.ru

Rogov Anatoly Alekseevich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Quality Management”,
Candidate of Physical
and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: rogov_a@rambler.ru