

Транспорт

УДК 629.463

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-5-40-47

Е.А. Рожкова

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Выполнен синтез наработок вагона до первого отказа и между отказами. Определена наработка между отказами. Результаты выше проведенных исследований легли в основу графической модели надежности вагона. Получена зависимость перио-

дичности проведения укрупненного текущего ремонта вагонов от средней наработки вагона между отказами.

Ключевые слова: наработка, отказ, межремонтный период, ремонт, полувагон.

Е.А. Rozhkova

ASSESSMENT AND FORECASTING OF FREIGHT CAR TECHNICAL STATE

The purpose of this work is the assessment and forecasting of freight car technical state at life stages. The scientific novelty consists in the definition of car operating run-up to the first failure and between failures, and also in the definition of car life to considerable repair fulfillment from the operating run between failures and development of a graphical model of freight car reliability.

As a result of the statistic modeling of gondola car operating runs up to the first failure it is defined that the given random value conforms to a normal distribution law, the first car setoff in TOR due to wear failure takes place at the operating run of 85,000 km. Besides the operating run-up to the first failure there was defined an operating run-up between failures. It is proved that the operating run-up between failures conforms to the exponential law of distribution, the mathematical expectation of which is 13,000 km. The results of investigations mentioned above formed the basis of the graphical model of car reliability. An inter-repair service life of a car can be represented as a sum

of the following operating run-ups: operating run-ups to the first failure, the product of operating run-ups between failures and the number of failures and a residual operating run-up (from the utmost current repair to the nearest scheduled repair).

On the basis of the mentioned it is expedient to consider a technology for the realization of an enlarged repair with the purpose of the repetition exclusion in car setoffs during the inter-repair term. On the basis of the simulator there is obtained the dependence of the frequency of car enlarged current repair fulfillment depending on average operating run-up between failures. At present an enlarged current repair must be carried out only for gondola cars in the planned order after having reached 80,000 km. The repair mentioned can be carried out both under depot conditions, and under conditions of repair workshops. The advantage of such a system of repair consists in the increase car work reliability during the inter-repair term.

Key words: operating run-up, failure, inter-repair term, repair, gondola car.

Введение

Если рассматривать модель функционирования грузового вагона с точки зрения теории надежности, то интерес представляют следующие показатели: число отцепок вагона в межремонтных периодах с течением срока службы, наработка вагона до первого отказа и наработка вагона между отказами. Исследования «поведения» вагона в межремонтных периодах показывают, что число текущих ремонтов в межремонтных периодах возрастает линейно с течением срока службы [1, 2].

Действующая система планово-предупредительных ремонтов грузовых вагонов предусматривает два критерия постановки вагона в плановый ремонт: по предельной календарной продолжительности – 2 года, по предельному ресурсу (выполненной работе) – 160 тыс. км, по комбинированному критерию – по достижению предельного значения одним из показателей.

Оценка и прогнозирование технического состояния грузового вагона на этапах жизненного цикла

На полигоне Забайкальской железной дороге проведен эксперимент по определению средней наработки до отказа грузовых вагонов. Получен массив данных по числу отказов и наработкам вагонов до первой отцепки в текущий ремонт. Ниже приведены основные условия данного исследования [2, 3].

1. По роду подвижного состава для подконтрольной эксплуатации были выбраны полувагоны. Под наблюдение было поставлено 8645 полувагонов [3, 4].

2. Срок службы полувагонов на момент наблюдений составлял 10–12 лет.

3. Статистическое выравнивание эмпирических данных проводилось на предположении (гипотезе) о нормальном распределении наработки вагона до первого отказа.

В результате обработки массива экспериментальных данных статистически было доказано, что в целом наработка до отказа вагона подчиняется нормальному закону распределения (рис. 1) [2, 5].

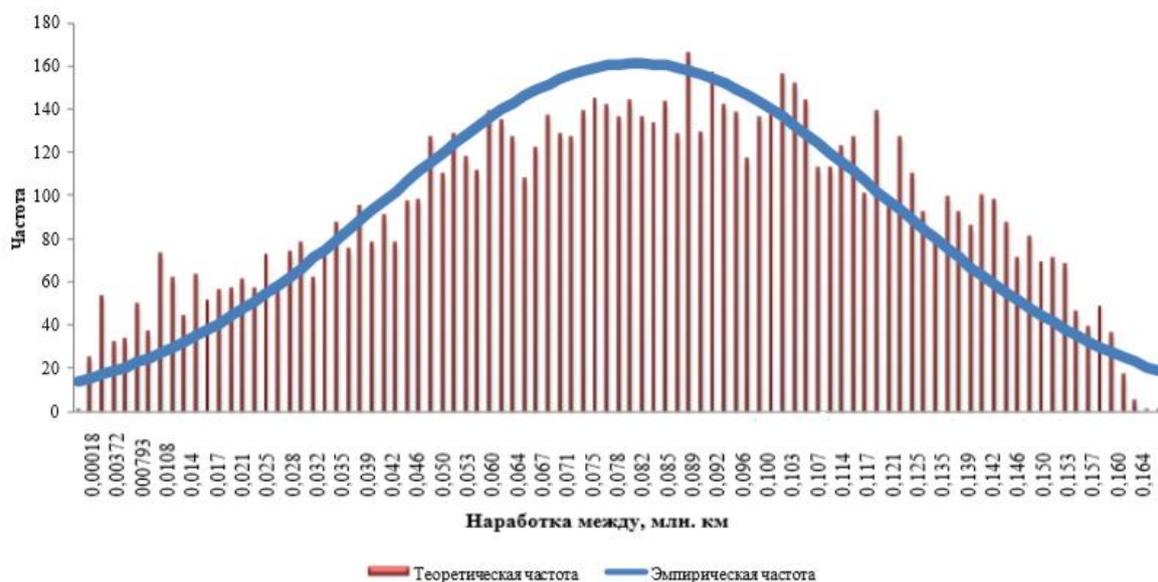


Рис. 1. Гистограмма распределения наработки полувагона до отказа

Основные характеристики нормального распределения времени работы грузовых вагонов до отказа, такие как плотность вероятности и параметр распределения определяются по формулам [6]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M(x))^2}{2\sigma^2}}$$

$$M(X) = \frac{1}{N} \sum x_i$$

$$\sigma(x) = \sqrt{D(X)}$$

$$M(X) = 85000$$

$$\sigma(x) = 38151$$

Результаты расчетов показывают, что средняя наработка до отказа полувагона

равна 85000 км. И как показывает практика — это событие можно считать достоверным, то есть которое обязательно произойдет [7].

Исследование наработки вагона между отказами представляет весьма трудоемкий процесс. Объясним почему: во-первых, необходимо располагать объемом выборочной совокупности грузовых вагонов по наработкам от первого отказа до второго отказа, от второго отказа — до третьего отказа и т.д.; во-вторых, выборочная совокупность вагонов должна соответствовать возрастному и техническому критериям (должна быть одного года выпуска, одного конструктивного исполнения); в-третьих, желательно, чтобы количество

текущих ремонтов вагонов выборки в межремонтных периодах было одинаково.

Несмотря на сложность сбора и обработки массива экспериментальных данных, на полигоне Забайкальской ж.д. выполнено исследование по определению закона распределения наработки вагона между отказами. Приведем основные условия эксперимента [8, 9]:

1. Объем выборки составил 5000 полувагонов;
2. Время проведения наблюдения «Т» принято равным межремонтному периоду – 2 года;
3. В учет наработки между отказами принималась наработка между текущими

ремонтами вагона в межремонтном периоде;

4. Статистическое выравнивание эмпирических данных проводилось на предположении (гипотезе) об экспоненциальном распределении наработки вагона между отказами. В результате статистических расчетов доказана гипотеза о распределении наработки вагона между отказами экспоненциальному распределению.

Порядок выравнивания представлен в табл. 1, гистограмма распределения эмпирических и теоретических частот наработки между отказами представлена на рис. 2.

Таблица 1

Порядок выравнивания эмпирических данных экспоненциальному закону распределения

X_1	X_2	n_1	W	$M(X)$	$P(X_i)$	$P(X_{i+1})$	$P(X)$	n'_1	$n^2_{набл}$
0	10000	2750	0,55	2750	1	0,466912	0,533088	2665,44	2,600122
10000	20000	1250	0,25	3750	0,466912	0,218007	0,248905	1244,526	0,023973
20000	30000	550	0,11	2750	0,218007	0,10179	0,116217	581,084	1,756754
30000	40000	230	0,046	1610	0,10179	0,047527	0,054263	271,315	7,421449
40000	50000	120	0,024	1080	0,047527	0,022191	0,025336	126,6802	0,371879
50000	60000	65	0,013	715	0,022191	0,010361	0,01183	59,14851	0,526768
60000	70000	25	0,005	325	0,010361	0,004838	0,005523	27,61715	0,273978
70000	80000	10	0,002	150	0,004838	0,002259	0,002579	12,89478	0,837972
		5000	1	13130					13,81289

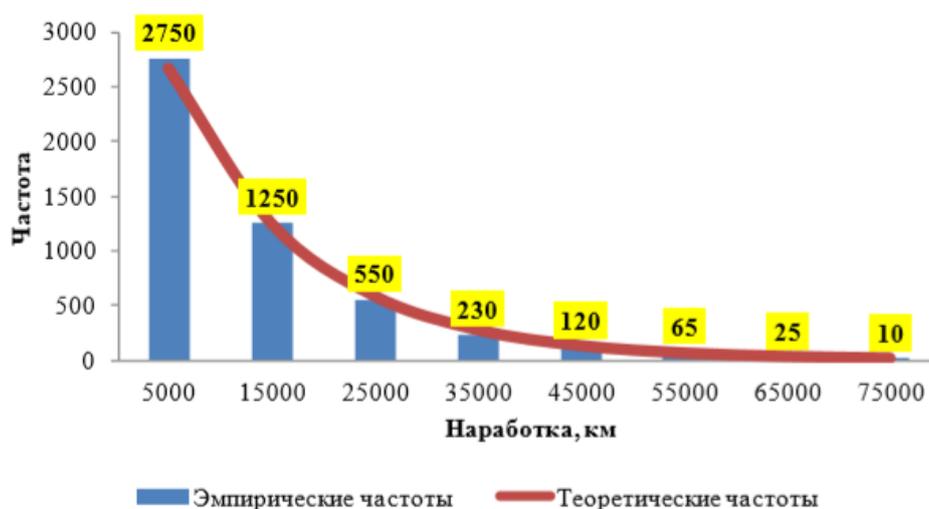


Рис. 2. Гистограмма распределения эмпирических и теоретических частот по наработкам вагона между отказами

Основные числовые характеристики распределения определяются по следующим формулам [10]:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{1}{M(X)}$$

Математическое ожидание выборочное среднее (км):

$$M(X) = \frac{1}{\lambda}$$

Наработка вагона от крайнего текущего ремонта до планового ремонта вагона представляет функцию распределения остатков наработки. При этом заметим, что данная наработка будет определяться равенством:

$$T_3 = S - M(T_1) - n \cdot M(T_2)$$

где S – межремонтный ресурс вагона (160 тыс. км.); $M(T_1)$ – математическое ожидание наработки вагона до первого отказа; $M(T_2)$ – математическое ожидание наработки вагона между отказами; n – количество отказов (текущих ремонтов) вагона в межремонтном периоде.

На рис. 3 представлена графическая модель надежности грузового вагона в межремонтном периоде.

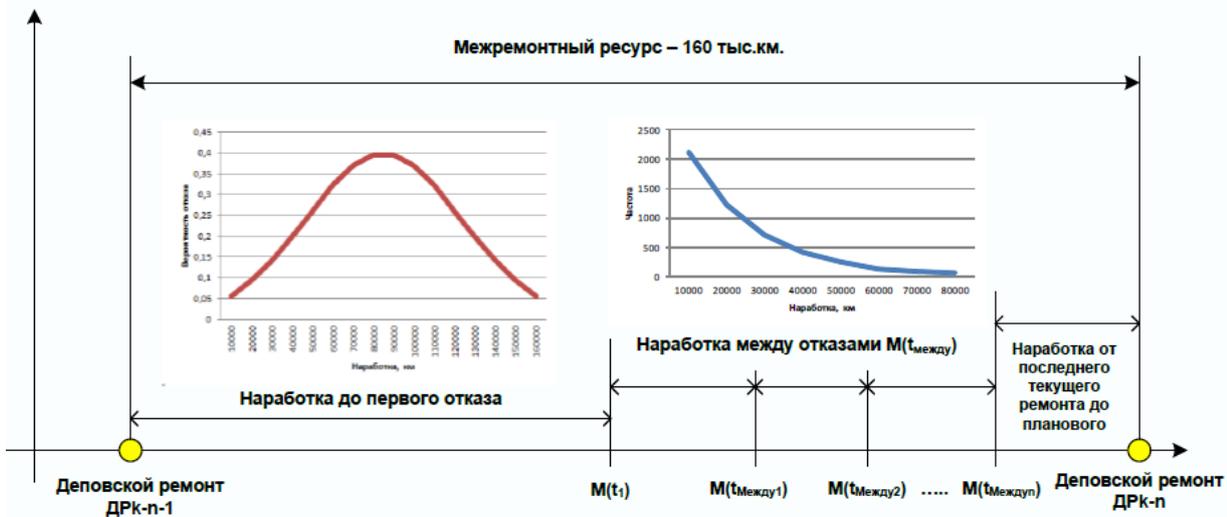


Рис.3. Графическая модель надежности грузового вагона

Таким образом, в результате проведенного исследования определены наработки вагона в межремонтном периоде до

первого отказа (после планового ремонта) и между отказами.

Расчетное обоснование межремонтного ресурса полувагона

При исследовании надежности в качестве теоретической модели принимают диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение).

Результаты моделирования и расчетов средней наработки на отказ приведенных исследований показали хорошее совпадение результатов оценки средней наработки на отказ в процессе эксплуатации на основе использования DN-распределения. Это дает основание решать задачу оценки (прогнозирования) срока службы еще на этапе проектирования технической системы. Исходными данными для расчета срока службы являются количественный состав и показатели надежности элементов (средняя наработка до отказа, коэффици-

ент вариации наработки) определяемые по формулам [11, 12]:

$$T_2(t) = T_2 + (T_1 - T_2) \exp \left[\frac{t - T_1}{T_3 - T_1} \ln(T_1 - T_2) \right]^{-1}$$

$$t \geq T_1; T_1 = \left(\sum n_i T_{0i}^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$T_2 = \left(\sum n_i T_{0i}^{-1} \right)^{-1}$$

$$T_3 = \min \left(\frac{T_{0i}}{n_i} \right) n_i \left(\sqrt{1 + \frac{9v_{0i}^4}{4}} - \frac{3v_{0i}^2}{2} \right)$$

$$T_c = T_1 + (T_3 - T_1) \left[1 - \frac{1}{\ln(T_1 - T_2)} \right]$$

где T_1 – средняя наработка до отказа системы; T_2 – средняя наработка на отказ си-

стемы на стационарном участке; T_3 – значение наработки (времени эксплуатации), соответствующее моде плотности DN -распределения $\min\left(\frac{T_{0i}}{n_i}\right)$ [13].

Если определен средний срок службы T_c , то принимая гипотезу о том, что распределение срока службы может быть также описано DN -распределением, параметр масштаба которого совпадает с полученной оценкой $\mu_c = T_c$, а параметр формы

$$F(t) = DN(t; \mu_c; v_c) = \Phi\left(\frac{t - \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right) \exp\left(\frac{2}{v_c^2}\right) \left(-\frac{t + \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right)$$

где $\Phi\left(\frac{t - \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right)$ – функция нормированного нормального распределения.

Остаточный срок службы характеризуется продолжительностью эксплуатации технической системы до предельного состояния после некоторой суммарной наработки (соответствующей, например, контролю и оценке технического состояния). Информация об остаточном сроке службы необходима для использования в системе

может быть оценен через коэффициент вариации наработки до отказа (на отказ), то есть $v_c = v_1 \left(\frac{T_c}{T_1}\right)^{\frac{1}{2}}$ (здесь v_1 – коэффициент вариации наработки до первого отказа системы).

Таким образом, закон распределения срока службы технической системы имеет следующий вид:

технического обслуживания, а также для выработки решений о возможности дальнейшей эксплуатации, а также о сроках и объемах проведения ремонтных работ.

Если закон распределения срока службы имеет DN -распределение, то средний остаточный срок службы после момента времени определяют по формуле:

$$\pi(t) = \frac{(\mu_c - \tau) \Phi\left(\frac{t - \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right) + (\mu_c + \tau) \exp\left(\frac{2}{v_c^2}\right) \left(-\frac{t + \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right)}{\Phi\left(\frac{t - \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_c^2}\right) \left(-\frac{t + \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right)}$$

Гамма-процентный остаточный срок службы для заданного значения определяется выражением:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu_c \cdot x(1 - \gamma'; v) - \tau$$

где $\gamma' = \gamma \left[\Phi\left(\frac{t - \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_c^2}\right) \left(-\frac{t + \mu_c}{v_c \sqrt{v_c t}}\right) \right]$, $x(1 - \gamma'; v)$ – определяют по значениям

$F = 1 - \gamma$ и v_c из таблиц DN -распределения или из решения уравнения

$$1 - \gamma' = \left[\Phi\left(\frac{1 - x}{v_c \sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_c^2}\right) \left(-\frac{t + x}{v_c \sqrt{x}}\right) \right]$$

Таким образом, используя приведенные выше формулы можно определить межремонтный ресурс вагона.

Исходные данные для расчетного обоснования межремонтного ресурса вагона представлены в табл. 2. Введем уточне-

ние, наработку между отказами примем за переменную величину, изменяющуюся в диапазоне от 10000 км до 30000 км. Результаты расчета представлены в табл. 3, графическая зависимость представлена на рис. 4.

Таблица 2

Исходные и расчетные данные

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Межремонтный ресурс вагона, км	T_1	160000
Наработка до первого отказа, км	T_2	85000
Наработка между отказами, км	T_3	10000...30000

Таблица 3

Расчет ресурса вагона до укрупненного ремонта

T_3	$\left[1 - \frac{1}{\ln(T_1 - T_2)}\right]$	$T_c = T_1 + (T_3 - T_1) \left[1 - \frac{1}{\ln(T_1 - T_2)}\right]$
10000	0.910915	91681.37
11000	0.910915	92592.28
12000	0.910915	93503.2
13000	0.910915	94414.11
14000	0.910915	95325.03
15000	0.910915	96235.94
16000	0.910915	97146.86
17000	0.910915	98057.78
18000	0.910915	98968.69
19000	0.910915	99879.61
20000	0.910915	100790.5
21000	0.910915	101701.4
22000	0.910915	102612.4
23000	0.910915	103523.3
24000	0.910915	104434.2
25000	0.910915	105345.1
26000	0.910915	106256.0
27000	0.910915	107166.9
28000	0.910915	108077.8
29000	0.910915	108988.8
30000	0.910915	109899.7

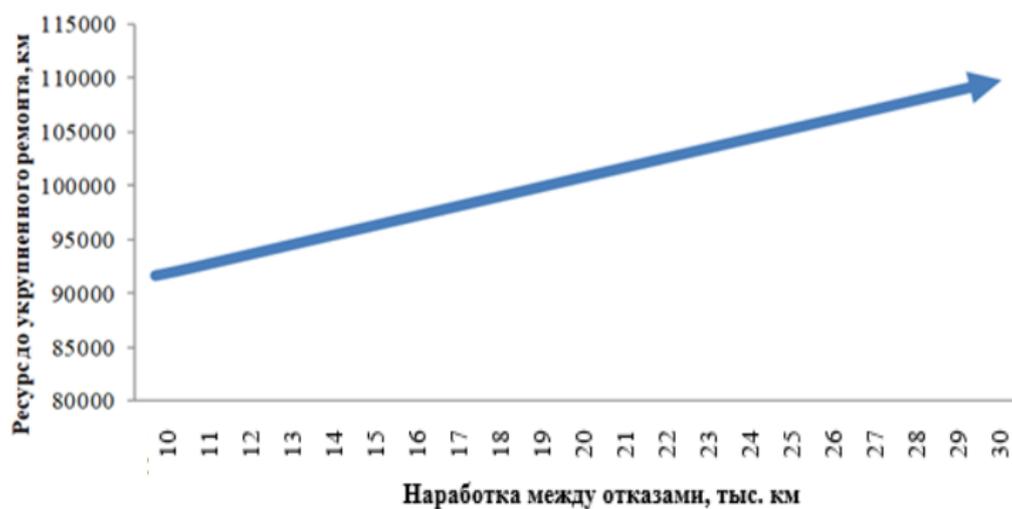


Рис. 4. Зависимость ресурса вагона до производства укрупненного ремонта от наработки между отказами

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- отказ вагона в межремонтном периоде можно считать достоверным событием;
- наработка вагона до первого отказа составляет 85000 км;
- наработка вагона между отказами составляет 13130 км, что значительно ниже наработки до отказа;
- ресурс вагона до производства укрупненного ремонта зависит от наработки между отказами и наработки до первого отказа.

На основании изложенного целесообразно рассмотреть технологию реализации производства укрупненного текущего ремонта с целью исключения повторов отцепок вагона в межремонтном периоде. Необходимо отметить, что проведение ремонта крупного объема целесообразно предусмотреть только для полувагонов, как для подвижного состава с наибольшим коэффициентом интенсивности эксплуатации. Проведение данного ремонта обеспечит (исходя из приведенных выше расчетов) безотказную работу вагона в межремонтном периоде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Устич, П. А.** Вагонное хозяйство: учебник для ж.-д. транспорта / П. А. Устич, И. И. Хаба, В. А. Ивашов; под ред. П. А. Устича. – Москва: Маршрут, 2003. – 560 с.
2. **Ковригина, И. В.** Определение межремонтного ресурса грузового вагона / И. В. Ковригина // Наука и образование транспорту. – 2017. – №1. – С.45-48.
3. **Гордиенко И. А.** Статистическая оценка наработки до отказа полувагонов в межремонтном периоде / И. А. Гордиенко, Т. В. Иванова, Д. Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – №4. – С. 44-46.
4. **Справочные материалы причин поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт за 2019 год** / Центральная дирекция инфраструктуры управления вагонного хозяйства, проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства. – Москва, 2019. – 153 с.
5. **Малашкевич, Э. А.** Прогнозирование отказов грузовых вагонов на основе анализа статистической информации / Э. А. Малашкевич, В. А. Петровых, Д. Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2013 – №1. – С. 34 – 37.
6. **Статистические методы обработки эмпирических данных.** Рекомендации / ВНИИИНАШ. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 232 с.
7. **Володарский, В. А.** О надежности подвижного состава прошедшего ремонт / В.А.Володарский, А. И. Орленко // Надежность. – 2015 – №1. – С. 25–28.
8. **Рожкова, Е. А.** Анализ устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути различного радиуса / Е. А.Рожкова, А. Н. Астафьева, Т. А. Баранова // Молодая наука Сибири. – 2020.- №2. – С. 62-67.
9. **Ермаков, А. О.** Определение предельного состояния объектов железнодорожной техники / А. О. Ермаков // Надежность. – 2014.– №3. – С. 123–129.
10. **Халафян, А. А.** Статистический анализ данных: 3-е изд., учебник / А. А. Халафян. – Москва: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
11. **Устич, П. А.** Надежность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников; под ред. П. А. Устича. – Москва: УМЦ МПС России, 2004. – 416 с.
12. **Кашковский, В. В.** Методика назначения пробега вагонов между ремонтами / В. В. Кашковский // Известия Транссиба. – 2013. – №1. – С. 117 – 125.
13. **Стрельников В. П.** Закономерности изменения средней наработки на отказ технических систем в процессе эксплуатации / В. П. Стрельников, Н. В. Сеспедес-Гарсия // Математические машины и системы. – 2010. – №3. – С. 153-158.
1. **Ustich, P. A.** *Car Facilities: railway transport textbook* / P. A. Ustich, I. I. Khaba, V. A. Ivashov; under the editorship of P. A. Ustich. – Moscow: Route, 2003. – pp. 560.
2. **Kovrigina, I. V.** Definition of freight car inter-repair resource / I. V. Kovrigina // *Science and Education for Transport*. – 2017. – No.1. – pp. 45-48.
3. **Gordienko, I. A.** Statistical assessment of gondola car operating run-up to failure during inter-repair term / I. A. Gordienko, T. V. Ivanova, D. G. Nalabordin // *Cars and Car Facilities*. – 2014. – No.4. – pp. 44-46.
4. **Reference material of reasons for freight car delivery for current setoff repair during 2019** / Central Board of Infrastructure of Car Facilities Management, Design Bureau of Car Facilities. – Moscow, 2019. – pp. 153.
5. **Malashkevich, E. A.** Freight car failure forecasting based on analysis of statistical information / E. A.

- Malashkevich, V. A. Petrovykh, D. G. Nalabordin // *Cars and Car Facilities*. – 2013 – No.1. – pp. 34-37.
6. **Statistical Methods for Empirical Data Processing**. Recommendations / VNIINMACH. – Moscow: Standard Publishers, 1978. – pp. 232.
7. **Volodarsky, V. A.** On reliability of rolling-stock repaired / V. A. Volodarsky, A. I. Orlenko // *Reliability*. – 2015 – No.1. – pp. 25-28.
8. **Rozhkova, E. A.** Analysis of car stability against overturn during passing crooked ways of different radius / E. A. Rozhkova, A. N. Astafieva, T. A. Baranova // *Young Science of Siberia*. – 2020. – No.2. – pp. 62-67.
9. **Yermakov, A. O.** Definition of limiting state of railway engineering objects / A. O. Yermakov // *Reliability*. – 2014. – No.3. – pp. 123-129.
10. **Khalafyan, A. A.** *Data Statistical Analysis*: 3-d edition, textbook / A. A. Khalafyan. – Moscow: J-S C “Binom-Press”, 2007. – pp. 512.
11. **Ustich, P. A.** *Reliability of Railway Non-Traction Rolling-Stock* / P. A. Ustich, V. A. Karpuchev, M. N. Ovechnikov; under the editorship of P. A. Ustich. – Moscow: UMT's MRC of Russia, 2004. – pp. 416.
12. **Kashkovsky, V. V.** Procedure for car run definition between repairs / V. V. Kashkovsky // *TransSib Proceedings*. – 2013. – No.1. – pp. 117-125.
13. **Strelnikov, V. P.** Regularities in changes of average operating run-up to failure of engineering systems during operation / V.P. Strelnikov, N.V. Sespedes-Garsia // *Mathematical Machines and Systems*. – 2010. – No.3. – pp. 153-158.

Ссылка для цитирования:

Рожкова, Е.А. Оценка и прогнозирование технического состояния грузового вагона / Е.А. Рожкова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 5. – С. 40 - 47. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-5-40-47.

Статья поступила в редакцию 10.02.21.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Кобищанов В.В.

Статья принята к публикации 26.04.21.

Сведения об авторах:

Рожкова Елена Александровна, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта

(филиал) Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: helenuys@mail.ru.

Rozhkova Helen Alexandrovna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Railway Rolling-Stock”, Transbaikal Institute of Railway Transport (Branch) of

Irkutsk State University of Railway Communications, e-mail: helenuys@mail.ru.