

## Прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе статистической оценки

Т.В. Иванова, В.А. Рудаков, И.В. Ковригина✉

*Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация*

✉innabella84@mail.ru

### Резюме

В статье определена функция распределения числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе использования статической информации и установлено наиболее вероятное число отказов полувагонов в процессе эксплуатации. Анализируется объем статистических данных о выполнении ремонтов вагонов за продолжительный период времени. Для оценки рассматриваемой выборки предлагается использовать линейные графики зависимостей числа отказов от номера наблюдения. В дальнейшем применяется гистограмма изменения количества отказов, необходимая для идентификации типа распределения исследуемых данных. Для выделения фактического срока службы выборочной совокупности полувагонов предлагается трансформация представления сведений для перехода от распределения Пуассона к нормальному закону. При исследовании статических данных применялось математическое ожидание, которое подтверждает нормальный характер распределения. Приведены аналитические решения по определению числа отказов, полученных на основе оценки статистики посредством известных подходов. Построены графики распределения ремонтов и отказов. Статические данные проанализированы при помощи пакета прикладных программ «Статистика». Найденные решения и сформированная методика могут использоваться при создании специализированного программного комплекса, что позволит выстраивать приближенные прогнозные модели, так как существующими средствами не всегда возможно быстро решить поставленные задачи. Таким образом, результаты исследований могут быть востребованы при осуществлении планирования технических, эксплуатационных, финансовых и стратегических ресурсов вагонного хозяйства и железнодорожной отрасли в целом.

### Ключевые слова

отказ, грузовые вагоны, межремонтный период, надежность, прогнозирование, нормальное распределение

### Для цитирования

Иванова Т.В. Прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе статистической оценки / Т.В. Иванова, В.А. Рудаков, И.В. Ковригина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 159–170. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).159-170.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2023 г.; принята к публикации: 14.09.2023 г.

## Forecasting the number of freight wagons failures during the overhaul period based on statistical assessment

T.V. Ivanova, V.A. Rudakov, I.V. Kovrigina✉

*Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation*

✉innabella84@mail.ru

### Abstract

In the article the distribution function is determined of the number of freight wagons failures during the overhaul period based on the use of static data and the most probable number of gondola wagons failures during operation is stated. The volume of statistical data on the performance of wagon repairs over a long period of time is analyzed. To evaluate the sample under consideration, it is proposed to use linear graphs of the number of failures versus the observation number. Subsequently, a histogram of changes in the number of failures is used, which is necessary to identify the type of distribution of the data under study. To highlight the actual service life of a sample set of gondola wagons a transformation of the data representation is proposed to move from the Poisson distribution to the normal law. To study static data, a mathematical expectation was used, which confirms the normal nature of the distribution. Analytical solutions are presented for determining the number of failures obtained based on the assessment of static data using known approaches. Graphs of distribution of repairs and failures were constructed. Static data was analyzed using the «Statistics» application package. The resulting solutions and the developed methodology can be used to create a specialized software package, which will allow the construction of approximate forecast models, since it is not always possible to quickly solve the assigned problems using existing tools. Thus, the results of these studies can be in demand when planning technical, operational, financial and strategic resources of the carriage industry and the railway industry as a whole.

**Keywords**

failure, freight wagons, overhaul period, reliability, forecasting, normal distribution

**For citation**

Ivanova T.V., Rudakov V.A., Kovrigina I.V. Prognozirovanie chisla otkazov gruzovyh vagonov v mezhremontnom periode na osnove statisticheskoi otsenki [Forecasting the number of freight wagons failures during the overhaul period based on statistical assessment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 159–170. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).159-170.

**Article info**

Received: September 6, 2023; Revised: September 12, 2023; Accepted: September 14, 2023.

**Введение**

Существующие экономические и политические факторы диктуют новые условия осуществления перевозок, однако, несмотря на это, стратегические цели холдинга ОАО «РЖД» остаются неизменными и направленными, в том числе, на сохранение лидерства в сфере грузовых перевозок с учетом серьезных изменений в структуре погрузки и переориентации больших объемов перевозок для продвижения в восточном направлении [1–5].

Перевозка больших объемов грузов различной номенклатуры, сопряженная с резким изменением направления движения, значительно усиливает нагрузку на объекты железнодорожной инфраструктуры [6–8]. Для оценки новых условий использования пропускных способностей линий и раздельных пунктов необходимо построение достаточно точных прогнозных моделей с учетом долгосрочной перспективы [9].

Увеличение количества грузовых поездов в перевозочном процессе значительно усиливает нагрузку как на элементы верхнего строения пути [10], так и на ходовые части подвижного состава [11], что требует рационального расходования всех видов доступных ресурсов, в том числе связанных с оперированием подвижным составом. В этой связи возникает необходимость создания специализированных программных комплексов, направленных на формирование долгосрочных прогнозов изменения вагонопотоков и объемов погрузки [12]. Однако ресурс технических средств в условиях максимальных динамических нагрузок расходуется значительно быстрее, что провоцирует возникновение отказов различного вида, в том числе связанных с невозможностью эксплуатации грузового подвижного состава.

Отказы технических средств негативно влияют на показатели работы как вагонного хозяйства, так и железнодорожной отрасли в

целом. Поэтому построение моделей безотказной эксплуатации подвижного состава, в частности прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межвалидном периоде, является актуальной задачей [13–16].

Цель данной статьи – определение функции распределения числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде для оценки количества отказов грузовых вагонов на основе анализа большого объема статистических данных.

**Материалы и методы**

Использование статистических методов при оценке изменения различных факторов на железнодорожном транспорте представлено достаточно широко, так как позволяет получить усредненную информацию об общем объеме представленных данных, выявить закономерности и зависимости статических величин от различных факторов.

Для прогнозирования числа отказов грузовых вагонов в межвалидном периоде был принят план наблюдений надежности (NMT).

Для NMT продолжительность наблюдений  $T$  при оценке средних показателей надежности определена по формуле [17]

$$T = \frac{\chi \cdot \bar{T}}{N},$$

где  $\chi$  – предполагаемая величина (отношение продолжительности наблюдений оцениваемому показателю надежности);  $\bar{T}$  – средняя наработка на отказ для грузового вагона;  $N$  – наработка между плановыми видами ремонта.

В нашем случае наработка между плановыми ремонтами грузовых вагонов составляет 160 000 км [13–16] и в соответствии с отчетными данными [14] средняя наработка на отказ грузовых вагонов в настоящее время равна 60 205 км, определено достаточное количество объектов наблюдений, чтобы с доверительной

вероятностью  $\gamma = 0,95$  предельная относительная ошибка  $\delta$  не превышала 0,05:

$$N = \frac{\chi \cdot \bar{T}}{T} = \frac{346 \cdot 60205}{160000} = 185.$$

Полученное значение  $N$  округляем до 200. Для получения массива данных по числу отказов выборочной совокупности грузовых вагонов в межвалидном периоде использованы справки о

выполненных ремонтах «2653». Пример типовой справки «2653» приведен в табл. 1.

Исследуемые параметры выборочной совокупности полувагонов представлены в табл. 2. На рис. 1 и 2 представлены диаграммы совокупности случайно отобранных объектов в межвалидных периодах и их фактических сроков службы.

**Таблица 1.** Наполнение типовой справки «2653» о выполненных ремонтах грузового вагона  
**Table 1.** Filling in the standard certificate «2653» of a freight wagon repairs made

№ п/п	Вид ремонта Repair type	Дата ремонта Repair date	Дорога ремонта Repair railway	Депо ремонта Repair depot
1	Кап.	Ноябрь 1994 г.	48 Донецкая	465 Красноармейск-ВЧД
2	Деп.	28 сентября 1996 г.	76 Свердловская	731 Каменск-Уральский-ВЧД
3	Деп.	10 августа 1997 г.	58 Юго-Восточная	1132 Стойленская-ВЧД
4	Деп.	16 августа 1998 г.	1 Октябрьская	319 Бологое-ВЧД
5	Деп. 7600	7 августа 1999 г.	88 Красноярская	443 Аскиз-ВЧД
6	Деп. 7600	25 августа 2000 г.	88 Красноярская	635 Иланская-ВЧД
7	Деп. 7600	21 ноября 2001 г.	80 Южно-Уральская	600 Челябинск-ВЧД
8	Деп. 3108	26 ноября 2002 г.	76 Свердловская	1082 Войновка-ВЧД
9	Тек-2	10 июня 2003 г.	76 Свердловская	579 ВЧДР Свердловск-Сорт.
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
10	Тек-1	–	48 Донецкая	445 Иловайск-ВЧД
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
11	Тек-2	1 сентября 2003 г.	63 Куйбышевская	303 Рузаевка-ВЧД
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
12	Тек-1	20 сентября 2003 г.	83 Западно-Сибирская	630 Новокузнецк-Сорт.-ВЧД
(249 – Прочие неисправности рамы тележки Other trolley frame faults)				
13	Тек-1	28 октября 2003 г.	83 Западно-Сибирская	1077 Новокузнецк-Север.-ВЧ
(502 – Уширение кузова более 75 мм на одну сторону Body widening more than 75 mm on one side)				
14	Деп. 76003108	30 ноября 2003 г.	88 Красноярская	443 Аскиз-ВЧД
15	Тек-2	–	–	–
(540 – Неисправность запора люка Malfunction of the hatch lock)				
16	Тек-2	25 июля 2004 г.	43 Южная	543 Основа-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня )				
17	Тек-1	21 октября 2004 г.	58 Юго-Восточная	481 Старый оскол-ВЧД
(540 – Неисправность запора люка)				
18	Тек-2	10 января 2005 г.	40 Одесская	523 Одесса-застава -1-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня)				
19	Деп. 76003108	18 мая 2005 г.	92 Восточно-Сибирская	653 Улан-Удэ-ВЧД
20	Тек-1	18 декабря 2005 г.	17 Московская	334 Тула-ВЧД
(540 – Неисправность запора люка)				
21	Тек-2	22 июня 2006 г.	32 Юго-Западная	529 Жмеринка-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня Pointed ridge)				
22	Тек-1	23 июля 2006 г.	83 Западно-Сибирская	621 Ленинск-Кузнецкий-ВЧД
(102 – Тонкий гребень )				
23	Деп.	–	51 Северо-Кавказская	4085 ВЧДЭ-5 Батайск
24	Деп. 76003108	31 октября 2006 г.	28 Северная	735 Сосногорск-ВЧД
25	Тек -1	21 декабря 2006 г.	1 Октябрьская	345 Мурманск-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня)				
26	Тек -1	11 августа 2007 г.	83 Западно-Сибирская	4089 ВЧДЭ-23 Белово

(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
27	Тек -2	14 октября 2007 г.	92 Восточно-Сибирская	4127 ВЧД-10 Улан-Удэ
(150 – Грение буксы Axle box heating)				
28	Тек -1	7 ноября 2007 г.	83 Западно-Сибирская	4090 ВЧДЭ-27 Тайга
(217 – Трещина или излом надрессорной балки Crack or break in bolster)				
(912 – Претензии к качеству вып.деповского ремонта Claims to the quality of depot repairs)				
29	Деп.	–	17 Московская	4091 ВЧДЭ-18 Тула
30	Деп. 76003108	26 ноября 2007 г.	17 Московская	482 Узловая-ВЧД
31	Тек-2	10 января 2008 г.	94 Забайкальская	759 Борзя-ВЧД
(503 – Обрыв сварного шва стойки Broken pillar weld)				
32	Тек-1	27 марта 2008 г.	61 Приволжская	1078 ВЧДЭ-14 Анисовка
(350 – Обрыв или ослабление болта поддерживающей планки Broken or loosened support bar bolt)				
33	Тек-1	14 июля 2008 г.	80 Южно-Уральская	4104 ВЧДЭ-2 Оренбург
(537 – Неисправности запора двери Door lock faults)				
34	Тек-2	20 января 2009 г.	80 Южно-Уральская	4104 ВЧДЭ-2 Оренбург
(107 – Выщербина обода колеса Wheel rim chip)				
35	Тек-2	22 октября 2009 г.	83 Западно-Сибирская	4087 ВЧДЭ-12 Входная
(912 – Претензии к качеству вып. деповского ремонта Claims to the quality of depot repairs)				
(348 – Неисправности поглощающего аппарата Draft gear malfunctions)				

Таблица 2. Исследуемые параметры выборочной совокупности полувагонов

Table 2. Investigated parameters of a sample set of gondola wagons

Номер вагона Wagon serial number	Число отказов в межремонтном периоде Number of failures during the overhaul period	Фактический срок службы грузовых вагонов на конец наблюдений Actual service life of freight wagons by the end of observations
67455324	4	18
67123899	2	14
60877245	3	17
62345689	0	5
64577899	3	11
66643211	5	22
63233557	4	24
67565252	5	26
63223345	2	22
67887544	3	20
60744998	1	12
61324256	6	11
61531259	4	15
61234227	4	15
61128935	4	16
63128628	3	17
63224512	5	18
61321222	5	22
64528973	5	21
67315295	3	22
64189935	1	16
66571286	2	12
63877666	2	12
.....	.....	.....
64529512	5	18

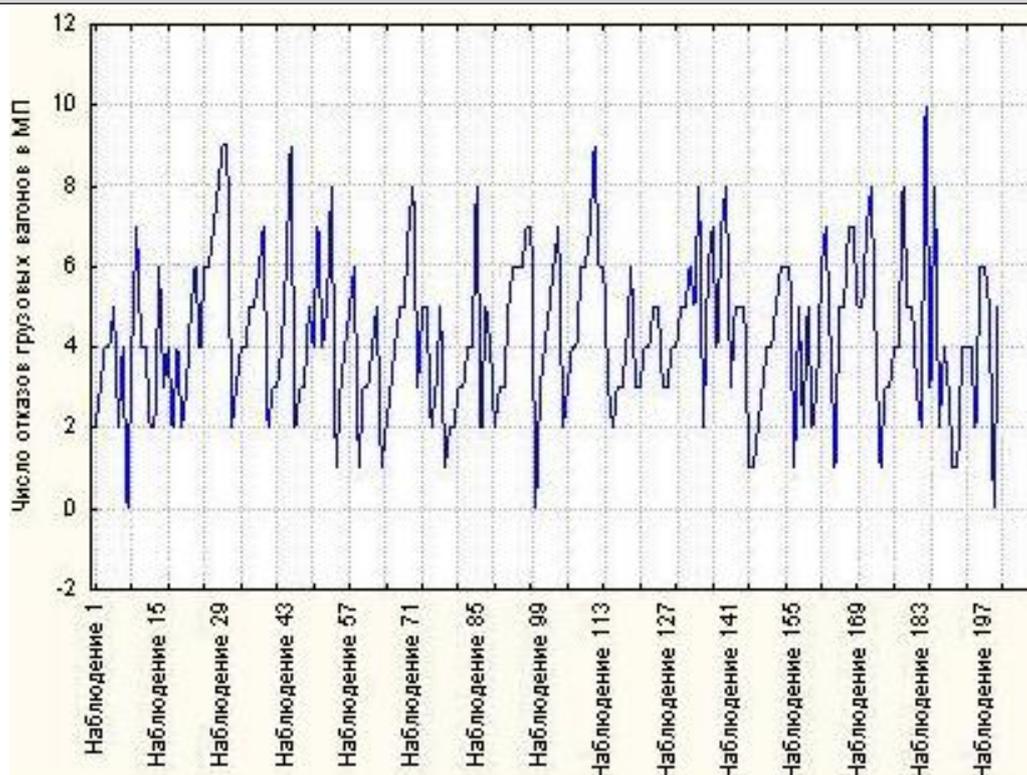


Рис. 1. Линейный график числа отказов выборочной совокупности грузовых вагонов  
 Fig. 1. Line graph of the number of failures of a freight wagons sample population

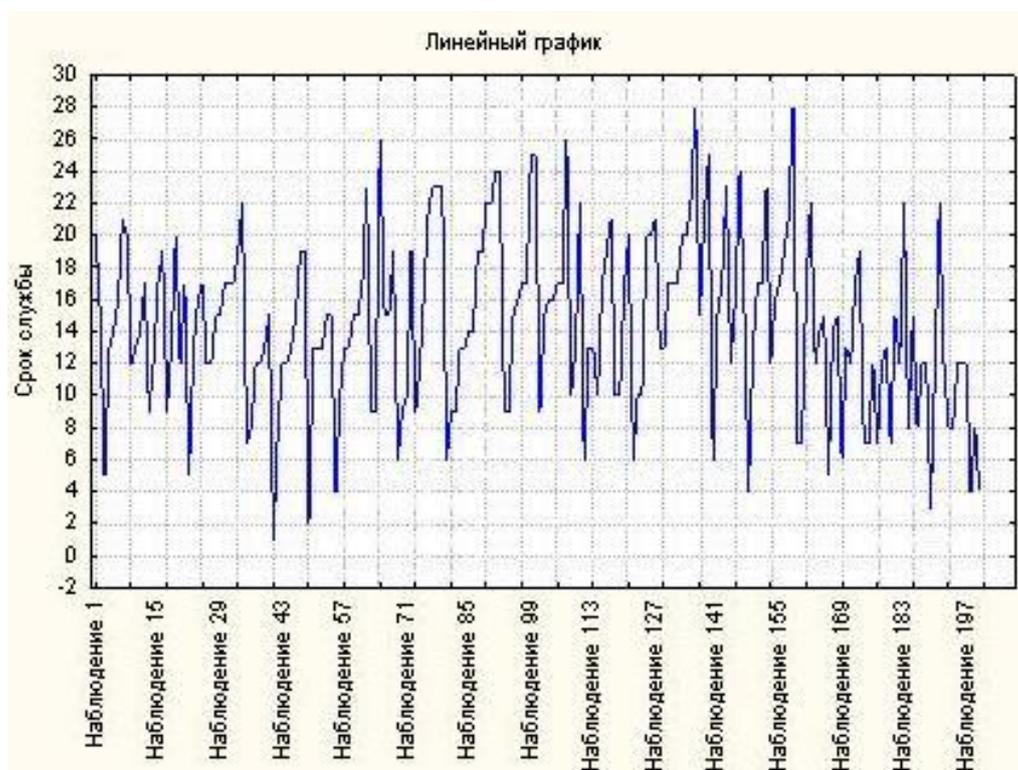


Рис. 2. Линейный график фактических сроков службы выборочной совокупности грузовых вагонов  
 Fig. 2. Linear graph of the actual service life of a freight wagons sample population

Выравнивание полученных эмпирических данных по закону редких событий Пуассона [18], в соответствии с которым вероятность события  $m_i$  раз при  $N$  опытах выполнено по формуле:

$$P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!},$$

где  $m_i$  – число отказов грузовых вагонов;  $\bar{m}$  – число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде.

Среднее значение параметра распределения для случайной величины – число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i n_i}{N} = \frac{862}{200} \approx 4,31.$$

Гистограмма распределения представлена на рис. 3. Для определения типа распределения необходимо выравнивание полученных статистических данных, как показано в табл. 3.

Таким образом, в результате статистического исследования установлено, что число от-

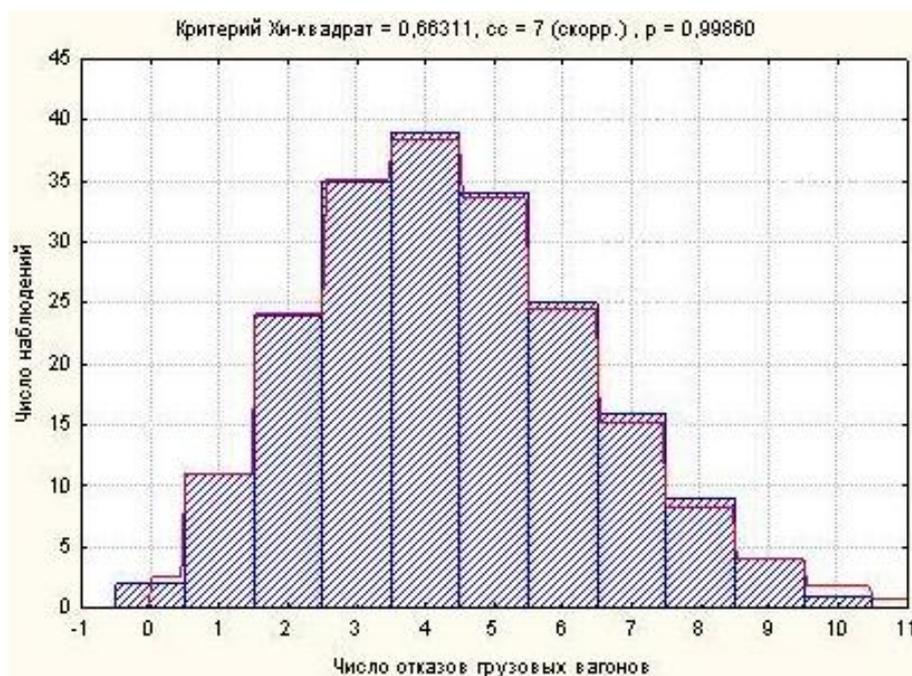


Рис. 3. Гистограмма числа отказов грузовых вагонов  
Fig. 3. Histogram of the number of freight wagons failures

Таблица 3. Выравнивание эмпирических данных по числу отказов грузовых вагонов  
Table 3. Alignment of empirical data on the number of freight wagons failures

Номер интервала Interval number	Число отказов $m_i$ Number of failures $m_i$	Частота $n_i$ Frequency $n_i$	$m_i n_i$	$P(m_i)$	$n'_i$
1	2	3	4	5	6
1	0	3	0	0,01357	2,714
2	1	11	11	0,05834	11,67
3	2	24	48	0,1254	25,08
4	3	35	105	0,1798	35,96
5	4	39	156	0,1933	38,66
6	5	35	175	0,1662	33,24
7	6	24	144	0,1191	23,82
8	7	15	105	0,0732	14,64
9	8	9	72	0,0393	7,86
10	9	4	36	0,0188	3,76
11	10	1	10	0,0081	1,62
	$\Sigma$	200	862		199,024

казов вагонов в межремонтном периоде подчиняется закону редких событий Пуассона, с функцией распределения равной

$$P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!},$$

и наиболее вероятное число их появления между плановыми ремонтами равно четырем.

### Результаты исследований

После проведенного исследования закономерно возникает вопрос о выборе статистических данных для определения фактического срока службы выборочной совокупности грузовых вагонов на момент наблюдений.

Для аппроксимации полученных эмпирических данных по срокам службы грузовых вагонов, соответствующих закону распределения, весь числовой интервал выборочных данных, представленных в табл. 2, разбит на 14 интервалов с шагом  $h = 2$ . Сумма частот вариантов в каждом интервале и статистическое распределение выборки представлены в табл. 4.

Проведем выравнивание нижеприведенных частот по нормальному закону распределения. Введем обозначения:  $N$  – абсолютная частота появления значения случайной величины в заданном интервале;  $W$  – относительная частота появления значения случайной величины в заданном интервале;  $X$  – середина интервала;  $T$  – интервал выборочных данных. Для удобства расчетов проведем замену переменной  $X = 2T - 1$ .

Математическое ожидание случайной величины:

$$M(T) = \sum T_i \cdot W_i,$$

$$M(T) = 0,01 + 0,05 + 0,28 + 0,475 + \dots + 0,72 + 0,01 = 7,5.$$

$$M(T^2) = \sum T_i^2 W_i.$$

$$M(T^2) = 0,01 + 0,05 + 0,28 + 0,475 + \dots + 0,72 + 0,01 = 63,94.$$

$$M(X) = 2M(T) - 1 = 2 \cdot 7,5 - 1 = 14.$$

Дисперсия и среднее квадратичное отклонение случайной величины:

$$\sigma^2(X) = M(X^2) - [M(X)]^2;$$

$$\sigma^2(X) = 4 \cdot (63,94 - 56,25) = 30,76.$$

$$\sigma(X) = \sqrt{\sigma^2(X)} = \sqrt{30,76} \approx 5,55.$$

Следовательно, полагая, что распределение случайной величины подчиняется нормальному закону распределения, имеем следующее:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{5,55\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-14)^2}{61,52}}.$$

$$\text{Тогда } f(x) = \frac{1}{5,55\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} = 0,18z_u,$$

где

$$z_u = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}.$$

Полученные результаты могут быть сопоставлены с вероятностями попадания случайной величины на данный интервал:

$$P(a < X < b) = \left[ \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right],$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  – функция Лапласа.

Таблица 4. Статистическое распределение срока службы исследуемых грузовых вагонов

Table 4. Statistical distribution of service life of the studied freight wagons

Интервал	(0; 2)	(2; 4)	(4; 6)	(6; 8)	(8; 10)	(10; 12)	(12; 14)
$X$	1	3	5	7	9	11	13
$N$	2	5	9	14	19	24	27
$W$	0,01	0,025	0,045	0,07	0,095	0,12	0,135
$T$	1	2	3	4	5	6	7
$T^2$	1	4	9	16	25	36	49
$W$	0,01	0,025	0,045	0,07	0,095	0,12	0,135
Интервал	(14; 16)	(16; 18)	(18; 20)	(20; 22)	(22; 24)	(24; 26)	(26; 28)
$X$	15	17	19	21	23	25	27
$N$	27	24	19	14	5	3	1
$W$	0,135	0,12	0,095	0,07	0,045	0,025	0,01
$T$	8	9	10	11	12	13	14
$T^2$	64	81	100	121	144	169	196
$W$	0,135	0,12	0,095	0,07	0,045	0,025	0,01

Тогда

$$P(0 < X < 2) = 0,5[-\Phi(1,52) + \Phi(1,76)] =$$

$$= 0,5[-0,9661 + 0,9872] = 0,5 \cdot 0,0211 \approx 0,01,$$

$$P(2 < X < 4) = 0,5[-\Phi(1,28) + \Phi(1,52)] =$$

$$= 0,5[-0,9297 + 0,9661] = 0,5 \cdot 0,0364 \approx 0,02,$$

$$P(4 < X < 6) = 0,5[-\Phi(1,02) + \Phi(1,28)] =$$

$$= 0,5[-0,8508 + 0,9297] = 0,5 \cdot 0,0789 \approx 0,04,$$

$$P(6 < X < 8) = 0,5[-\Phi(0,76) + \Phi(1,02)] =$$

$$= 0,5[-0,7175 + 0,8505] = 0,5 \cdot 0,1333 \approx 0,07,$$

$$P(8 < X < 10) = 0,5[-\Phi(0,52) + \Phi(0,76)] =$$

$$= 0,5[-0,5379 + 0,7175] = 0,5 \cdot 0,1796 \approx 0,09,$$

$$P(10 < X < 12) = 0,5[-\Phi(0,26) + \Phi(0,52)] =$$

$$= 0,5[-0,2869 + 0,5379] = 0,5 \cdot 0,2510 \approx 0,13,$$

$$P(12 < X < 14) = 0,5[-\Phi(0) + \Phi(0,26)] =$$

$$= 0,5[0,0 + 0,2869] = 0,5 \cdot 0,2869 \approx 0,14,$$

Таблица 5. Вероятности попадания случайной величины на заданные интервалы

Table 5. Probabilities of a random variable falling within specified intervals

Интервал Interval	$t_1 = \frac{b-m}{\sigma\sqrt{2}}$	$t_2 = \frac{a-m}{\sigma\sqrt{2}}$	$\Phi(t_1)$	$\Phi(t_2)$	$\Phi(t_1) - \Phi(t_2)$	$P(a < X < b)$
(0; 2)	-1,52	-1,76	0,9661	0,9872	0,0211	0,01
(2; 4)	-1,28	-1,52	0,9297	0,9661	0,0364	0,02
(4; 6)	-1,02	-1,28	0,8508	0,9297	0,0789	0,04
(6; 8)	-0,76	-1,02	0,7175	0,8508	0,1333	0,07
(8; 10)	-0,52	-0,76	0,5379	0,7175	0,1796	0,09
(10; 12)	-0,26	-0,52	0,2869	0,5379	0,2510	0,13
(12; 14)	0	-0,26	0	0,2869	0,2869	0,14
(14; 16)	0,26	0	0,2869	0	0,2869	0,14
(16; 18)	0,52	0,26	0,5379	0,2869	0,2510	0,13
(18; 20)	0,76	0,52	0,7175	0,5379	0,1796	0,09
(20; 22)	1,02	0,76	0,8508	0,7175	0,1333	0,07
(22; 24)	1,28	1,02	0,9297	0,8508	0,0789	0,04
(24; 26)	1,52	1,28	0,9661	0,9297	0,0364	0,02
(26; 28)	1,78	1,52	0,9872	0,9661	0,0211	0,01

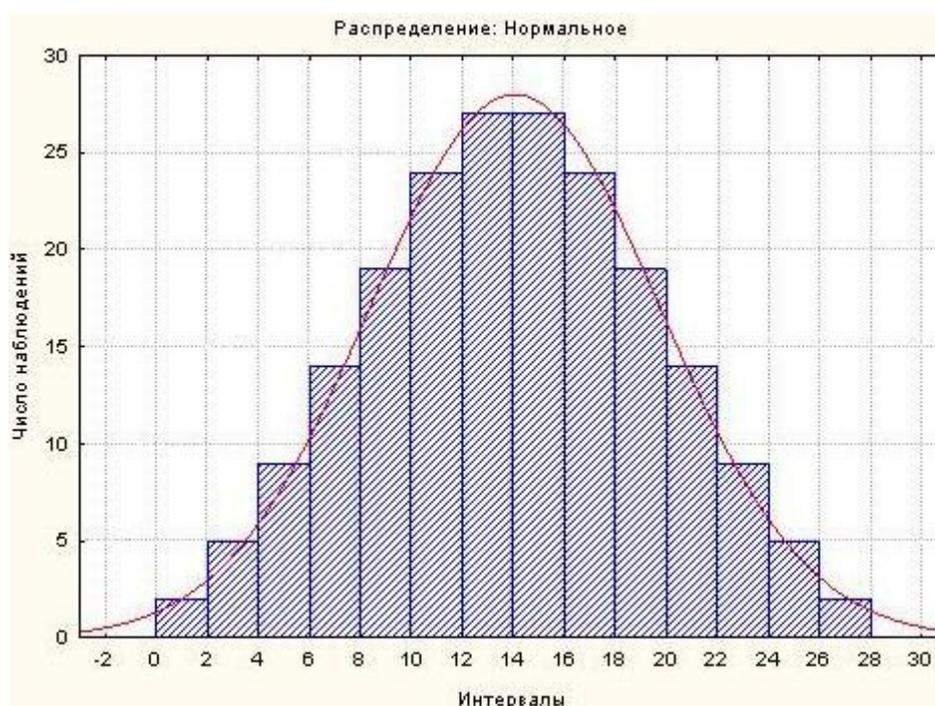


Рис. 4. Гистограмма распределения частот

Fig. 4. Frequency distribution histogram

$$\begin{aligned}
P(14 < X < 16) &= 0,5[\Phi(0,26) - \Phi(0)] = \\
&= 0,5[0,2869 - 0,0] = 0,5 \cdot 0,2869 \approx 0,14, \\
P(16 < X < 18) &= 0,5[\Phi(0,52) - \Phi(0,26)] = \\
&= 0,5[0,5379 - 0,2869] = 0,5 \cdot 0,2510 \approx 0,13, \\
P(18 < X < 20) &= 0,5[\Phi(0,76) - \Phi(0,52)] = \\
&= 0,5[0,7175 - 0,5379] = 0,5 \cdot 0,1796 \approx 0,09, \\
P(20 < X < 22) &= 0,5[\Phi(1,02) - \Phi(0,76)] = \\
&= 0,5[0,8505 - 0,7175] = 0,5 \cdot 0,1333 \approx 0,07, \\
P(22 < X < 24) &= 0,5[\Phi(1,28) - \Phi(1,02)] = \\
&= 0,5[0,9297 - 0,8505] = 0,5 \cdot 0,0789 \approx 0,04, \\
P(24 < X < 26) &= 0,5[\Phi(1,52) - \Phi(1,28)] = \\
&= 0,5[0,9661 - 0,9297] = 0,5 \cdot 0,0364 \approx 0,02, \\
P(26 < X < 28) &= 0,5[\Phi(1,78) - \Phi(1,52)] = \\
&= 0,5[0,9872 - 0,9661] = 0,5 \cdot 0,0211 \approx 0,01.
\end{aligned}$$

Полученные значения представлены в табл. 5, а гистограмма распределения – на рис. 4.

Сравнивая значения относительных частот и вероятностей ( $W$  и  $hf(x)$  или  $W$  и  $P(x)$ ), убеждаемся в том, что заданное статистическое распределение можно считать подчиненным нормальному закону.

Правдоподобность гипотезы о нормальном распределении случайной величины – фактический срок службы выборочной совокупности полувагонов – выполнена на основе критерия Пирсона.

Пирсоном предложен следующий критерий согласованности статистического и теоретического распределений:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^l \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i},$$

где  $w_i$  – относительные частоты;  $p_i$  – вероятности, полученные по некоторому теоретическому закону распределения.

Число степеней свободы:

$$r = l - t,$$

где  $l$  – число разрядов статистической таблицы;  $t$  – число условий, налагаемых на частоты.

Для нормального закона распределения  $t = 3$ , так как используются следующие условия:

$$\sum_{i=1}^l w_i = 1, \quad \sum_{i=1}^l w_i x_i = m_x, \quad \sum_{i=1}^l (x_i - m_x)^2 w_i = D_x,$$

где  $m_x$  и  $D_x$  – математическое ожидание и дисперсия случайной величины.

По значениям  $\chi^2$  и  $r$  определена величина  $\rho$ , характеризующая вероятность согласованно-

сти теоретического и статистического распределений. Если  $\rho < 0,1$ , то можно сделать вывод, что теория плохо воспроизводит эксперимент. Если же  $\rho \geq 0,1$ , то гипотеза о принятом теоретическом распределении не противоречит опытным данным.

Таким образом,

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^l \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i} = 200 \cdot 0,00621 = 1,242.$$

Число разрядов статистической таблицы равно  $l = 14$ ; число условий, налагаемых на частоты, равно  $t = 3$ . Тогда число степеней свободы равно  $r = 14 - 3 = 11$ . Для  $r = 11$ : если  $\chi^2 = 1$ , то  $\rho = 0,9899$ ; если  $\chi^2 = 2$ , то  $\rho = 0,9985$ . Следовательно, при  $\chi^2 = 1,242$  получим промежуточное значение  $\rho$ . Это значение можно найти, применив способ интерполирования. При  $\chi^2 = 1$  и  $\chi^2 = 2$  значения  $\rho$  отличаются на величину

$$0,9985 - 0,9899 = 0,0086.$$

С увеличением  $\chi^2$  вероятность растет, поэтому  $\rho = 0,9899 + 0,0086 \cdot 0,242 = 0,9920$ .

Полученная вероятность больше, чем 0,1. Согласно критерию Пирсона, это дает основание считать, что нормальный закон достаточно удовлетворительно воспроизводит заданное статистическое распределение.

Интервальной оценкой (с надежностью  $\gamma$ ) математического ожидания нормально распределенного количественного признака  $X$  по выборочной средней и известном среднем квадратичном отклонении выборочной совокупности служит доверительный интервал

$$\bar{x}_B - t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) < a < \bar{x}_B + t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \quad (1)$$

где  $t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) = \delta$  – точность оценки;  $n$  – объем выборки;  $t$  – значение аргумента функции Лапласа  $\Phi(t)$ , при котором  $\Phi(t) = \gamma/2$ ;  $\gamma = 0,95$  – надежность.

Подставляя значения в (1), найдем интервальные оценки для случайной величины – фактический срок службы исследуемых грузовых вагонов:

$$14 - 1,96 \left( \frac{5,55}{\sqrt{200}} \right) < a < 14 + 1,96 \left( \frac{5,55}{\sqrt{200}} \right),$$

$$14 - 0,8 < a < 14 + 0,8 \text{ или } 13,2 < a < 14,8.$$

Таблица 5. Согласованность нормального распределения по критерию Пирсона

Table 5. Consistency of normal distribution by Pearson test

Интервал Interval	$W$	$P$	$W - P$	$(W - P)^2$	$(W - P)^2 / P$
(0; 2)	0,01	0,01	0	0	0
(2; 4)	0,025	0,02	0,005	0,000025	0,00125
(4; 6)	0,045	0,04	0,005	0,000025	0,000625
(6; 8)	0,07	0,07	0	0	0
(8; 10)	0,095	0,09	0,005	0,000025	0,00028
(10; 12)	0,12	0,13	-0,01	0,0001	0,00077
(12; 14)	0,135	0,14	-0,005	0,000025	0,00018
(14; 16)	0,135	0,14	-0,005	0,000025	0,00018
(16; 18)	0,12	0,13	-0,01	0,0001	0,00077
(18; 20)	0,095	0,09	0,005	0,000025	0,00028
(20; 22)	0,07	0,07	0	0	0
(22; 24)	0,045	0,04	0,005	0,000025	0,000625
(24; 26)	0,025	0,02	0,005	0,000025	0,00125
(26; 28)	0,01	0,01	0	0	0
$\Sigma$					0,00621

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде представляет собой пуассоновский поток событий, функция распределения которого равна  $P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!}$ . Наиболее

вероятное число отказов полувагонов в процессе эксплуатации равно четырем. При этом фактический срок службы выборочной совокупно-

сти полувагонов подчиняется нормальному закону распределения с плотностью вероятности

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

и с надежностью 95 %

находится в интервале от 13,2 до 14,8 лет. Результаты данных исследований необходимы для планирования технических, эксплуатационных, финансовых и стратегических ресурсов вагонного хозяйства и отрасли в целом [19, 20].

### Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // Правительство Рос. Федерации : сайт. URL : <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (Дата обращения 30.08.2023).
2. Лapidус Б.М. Задачи опережающего развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2023. № 2. С. 4–14.
3. Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО «РЖД» и Российской академией наук / Н.А. Махутов, Б.М. Лapidус, М.М. Гаденин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 7. С. 6–11.
4. Кабанов А.Б., Осминин А.Т. Научный подход к планированию железнодорожных грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2022. № 8. С. 12–16.
5. Москвичев О.В., Москвичева Е.Е., Мищенко Е.А. На основе сквозного контроля сроков доставки грузов и порожних вагонов // Железнодорожный транспорт. 2022. № 9. С. 12–16.
6. Шаньгин Р.В. Надежность рельсов в различных условиях эксплуатации // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 2. С. 2–3.
7. Певзнер В.О., Гринь Е.Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 54–59.
8. Голубев О.В. Повышение эффективности мониторинга рельсовой колеи // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 24–28.
9. Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К. Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков // Т-Сопп: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 1. С. 33–41.
10. Конон А.А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // Бюл. результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 57–64.
11. Ермоленко И.Ю., Рогозинская А.Л. Определение динамической нагрузки от колеса на рельс при извилистом движении // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 4(53). С. 40–44.
12. Свидетельство № 2022661676. Программа для определения технико-эксплуатационных показателей работы стыковой железнодорожной станции на основе использования статистических данных и вариантных прогнозных сценариев

колебаний поступающих вагонопотоков / Е.В. Маловецкая, А.В. Супруновский, А.К. Мозалевская : № 2022660561 ; завл. 07.06.2022 ; зарегистр. 24.06.2022.

13. Иванов А.А., Плотников И.В., Устич П.А. Экономический расчет периодичности плановых ремонтов грузовых вагонов. М. : МИИТ. 2006. 44 с.

14. Иванова Т.В., Налабордин Д.Г., Ларченко Е.А. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Экономика железных дорог. 2015. № 11. С. 60–68.

15. Налабордин Д.Г., Иванова Т.В. Статистическая оценка безотказной работы грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе анализа выживаемости объектов // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 125–129.

16. Иванова Т.В., Налабордин Д.Г., Ларченко Е.А. Оценка стоимости жизненного цикла полувагона по коэффициенту эксплуатационных затрат // Экономика железных дорог. 2015. № 4. С. 38–45.

17. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2459р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.

18. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш. шк., 2003. 478 с.

19. Болотин М.М., Воротников В.Г. Отказы и срок службы грузового вагона // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 2. С. 152–161.

20. Петровых В.А., Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 2. С. 40–42.

### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 №3363-r «Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Order of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (Accessed August 30, 2023).

2. Lapidus B.M. Zadachi operezhayushchego razvitiya rossiiskikh zheleznykh dorog [Tasks of advanced development of Russian railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 2, pp. 4–14.

3. Makhutov N.A., Lapidus B.M., Gadenin M.M., Titov E.Yu. Zadachi i perspektivy razvitiya nauchnykh issledovaniy v ramkakh sotrudnichestva mezhdru ОАО «RZhD» i Rossiiskoi akademiei nauk [Tasks and prospects for the development of scientific research within the framework of cooperation between JSC «Russian Railways» and the Russian Academy of Sciences]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 7, pp. 6–11.

4. Kabanov A.B., Os'minin A.T. Nauchnyi podkhod k planirovaniyu zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok [Scientific approach to the planning of rail freight transportation]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2022, no. 8, pp. 12–16.

5. Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E., Mishchenko E.A. Na osnove skvoznoy kontrolya srokov dostavki tovarov i porozhnykh vagonov [Based on end-to-end control of the delivery time of goods and empty wagons]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2022, no. 9, pp. 12–16.

6. Shan'gin R.V. Nadezhnost' rel'sov v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Reliability of rails in various operating conditions]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no. 2, pp. 2–3.

7. Pevzner V.O., Grin' E.N. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tekhnicheskimi obsluzhivaniem puti [Improvement of the track maintenance management system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2021, no. 2, pp. 54–59.

8. Golubev O.V. Povyshenie effektivnosti monitoringa rel'sovoy kolei [Improving the efficiency of monitoring the rail gauge]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2023, no. 10, pp. 24–28.

9. Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K. Vozmozhnosti primeneniya modelei ARIMA pri postroenii prognoznnykh znachenii vagonopotokov [The possibilities of using ARIMA models in constructing forecast values of wagon traffic]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2023, vol. 17, no. 1, pp. 33–41.

10. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy elementov zheleznodorozhnogo puti pod poezdnoi nagruzkoj i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of natural oscillation frequencies of railway track elements under train load and selection of elastic shock absorbers]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2021, no. 4, pp. 57–64.

11. Ermolenko I.Yu., Rogozinskaya A.L. Opredelenie dinamicheskoy nagruzki ot koleasa na rel's pri izvilistom dvizhenii [Determination of the dynamic load from the wheel on the rail during tortuous movement]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2020, no. 4(53), pp. 40–44.

12. Malovetskaya E.V., Suprunovskii A.V., Mozalevskaya A.K. Certificate of registration of a computer program 2022661676, 24.06.2022.

13. Ivanov A.A., Plotnikov I.V., Ustich P.A. Ekonomicheskii raschet periodichnosti planovykh remontov gruzovykh vagonov [Economic calculation of the frequency of scheduled repairs of freight wagons]. Moscow: MIIT Publ., 2006. 44 p.

14. Ivanova T.V., Nalaborin D.G., Larchenko E.A. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways], 2015, no. 11, pp. 60–68.

15. Nalaborin D.G., Ivanova T.V. Statisticheskaya otsenka bezotkaznoy raboty gruzovykh vagonov v mezhremontnom periode na osnove analiza vyzhivaemosti ob'ektov [Statistical evaluation of the trouble-free operation of freight wagons in the inter-repair period based on the analysis of the survival rate of objects]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2010, no. 2, pp. 125–129.

16. Ivanova T.V., Nalabordin D.G., Larchenko E.A. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla poluvagona po koeffitsientu ekspluatatsionnykh zatrat [Estimation of the life cycle cost of a gondola wagon by the coefficient of operating costs]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways], 2015, no. 4, pp. 38–45.

17. Rasporuyazhenie OAO «RZhD» ot 27.12.2007 № 2459r «O metodike opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoi tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 27, 2007 No 2459r «On the methodology for determining the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complex technical systems of long-distance transport»].

18. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 478 p.

19. Bolotin M.M., Vorotnikov V.G. Otkazy i srok sluzhby gruzovogo vagona [Failures and service life of a freight wagon]. *Mir transporta* [World of Transport], 2012, no. 2, pp. 152–161.

20. Petrovykh V.A., Ivanova T.V., Nalabordin D.G. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2014, no. 2, pp. 40–42.

### Информация об авторах

**Иванова Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: ivanova@zab.megalink.ru.

**Рудаков Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: rudakov@zab.megalink.ru.

**Ковригина Инна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; innabella84@mail.ru.

### Information about the authors

**Tat'yana V. Ivanova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: ivanova@zab.megalink.ru.

**Vladimir A. Rudakov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: rudakov@zab.megalink.ru.

**Inna V. Kovrigina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: innabella84@mail.ru.