

Рациональное размещение ремонтных пунктов с учётом дефектов вагона



Евгений КРУГЛИКОВ

Evgeny P. KRUGLIKOV

Rational Placement of Repair Facilities Taking into Account Failures of Railway Wagons

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 121)

Проведение ремонта грузовых вагонов по фактическому техническому состоянию на основе оценки остаточного ресурса элементов их конструкции признаётся многими специалистами приоритетным при выборе руководящей стратегии. При этом текущий ремонт должен осуществляться в отцепочном варианте на механизированных пунктах ремонта вагонов (МПРВ). В статье на базе теории вероятностей, теории массового обслуживания и теории интегральных уравнений обосновывается методика размещения МПРВ на сети железных дорог с учётом надёжности одного из наиболее ответственных и потенциально опасных элементов конструкции грузового вагона – роликовой буксы. В том числе определён локальный критерий рационального размещения ремонтных пунктов – минимальное число неотрёмонтированных в течение суток грузовых вагонов при максимальном числе их отцепок по причине неисправности буксы.

Ключевые слова: железная дорога, грузовой вагон, роликовая букса, надёжность, текущий ремонт, размещение ремонтных пунктов.

*Кругликов Евгений Павлович – аспирант
отделения «Вагоны и вагонное хозяйство»
ОАО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.*

В последние годы среди основных проблем на инфраструктуре ОАО «РЖД» выделяют эксплуатацию потенциально опасной продукции вагонного комплекса и низкий технологический уровень участников рынка ремонта вагонов. В частности, это касается роликовой буксы, которая является одним из самых ответственных элементов конструкции грузового вагона, от её надёжности во многом зависит безопасность движения поездов.

По мнению специалистов, для решения проблемы эксплуатации потенциально опасной продукции необходимо проведение ремонта грузовых вагонов по фактическому техническому состоянию на основе оценки остаточного ресурса элементов их конструкции. При этом текущий ремонт должен проводиться в отцепочном варианте на механизированных пунктах ремонта вагонов (МПРВ) [1].

На организацию текущего отцепочного ремонта несомненное влияние оказывает местоположение ремонтных пунктов. Причём дело не только в расстояниях, учитывать следует и разный технологический и ресурсный уровень МПРВ:

- количество мест на участке накопления вагонов такого пункта ограничено;

Таблица 1

Однократно цензурированная выборка наработок роликовой буксы грузового вагона

№	i	t _i	j	τ _j
1	1	0,7333333	—	—
2	2	0,5666667	—	—
3	3	0,5666667	—	—
4	4	0,3666667	—	—
5	5	0,7333333	—	—
6	6	0,8333333	—	—
7	7	0,6333333	—	—
8	8	0,6666667	—	—
9	9	0,8333333	—	—
10	10	0,7	—	—
.....			—	—
.....			—	—
927	927	19,98	—	—
.....	—	—	1	20
.....	—	—	2	20
.....	—	—	3	20
.....				
18373	—	—	17446	20

Принятые обозначения: i — индекс для нумерации, i, j — индекс наработки до возникновения отказа и безотказной наработки; t_i, τ_j — значение в месяцах наработки до возникновения отказа и безотказной наработки.

• возможна ситуация, когда запасные части и материалы для проведения ремонта на данном МПРВ в момент отцепки вагона практически полностью отсутствуют;

• вероятна ситуация, когда свободные ремонтные бригады на МПРВ в момент отцепки вагона отсутствуют.

Названные ситуации являются как причинами потери заявок на ремонт вагонов, так и причинами аврала на МПРВ, в результате чего увеличиваются число неотремонтированных в течение суток вагонов и их непроизводительный простой.

Формулировка задачи: учитывая существующие проблемы, определить способ рационального размещения МПРВ на сети железных дорог с учётом уровня отказов роликовой буксы грузового вагона.

1.

Рассмотрим вопрос надёжности элементов конструкции грузового вагона. Вероятность события, состоящего в том, что остаточный срок службы элемента конструкции до возникновения ресурсно-

го отказа, к которым относится момент перехода движения роликов подшипника буксы из режима трения качения в режим трения скольжения [2] (случайная величина ξ_i), будет не меньше требуемого периода эксплуатации y (например, до следующего текущего отцепочного ремонта) при условии, что он использовался по назначению и безотказно проработал до момента t , определяется следующим образом:

$$P\{\xi_i \geq y\} = \frac{\bar{F}(t+y)}{\bar{F}(t)}, \quad (1)$$

где $\bar{F}(t)$ — вероятность безотказной работы элемента конструкции грузового вагона в течение времени t ; $\bar{F}(t+y)$ — вероятность безотказной работы того же элемента в течение времени $(t+y)$.

Для оценки остаточного ресурса элемента конструкции грузового вагона, проработавшего некоторый период времени t , необходимо решить обратную задачу: найти такое значение периода эксплуатации y , в течение которого отказ не возникнет с требуемой вероятностью.



С математической точностью доказано, что наработка роликовой буксы грузового вагона до отказа имеет закон распределения Вейбулла–Гнеденко [3]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (2)$$

Был проведён эксперимент с помощью системы централизованного пономерного учёта вагонов. Наблюдение проводилось за эксплуатацией грузовых вагонов различного типа постройки 2005–2007 годов до первой отцепки по кодам неисправности 150 (грение буксы) и 151 (сдвиг буксы). С учётом того, что наблюдаемый вагон за время эксперимента не должен попасть в первый после постройки деповской ремонт, при котором детали буксы могут быть заменены на новые, продолжительность наблюдения T_a принималась равной 20 месяцам. Согласно нормативно-технической документации [4] таким условиям наблюдения соответствует план испытаний NUT. Объём выборки (количество вагонов, отцепленных по нагреву и сдвигу буксы) $N = 18373$. В ходе наблюдения получена однократно цензурированная выборка, включающая в себя число наработок до отказа $n = 927$ и число безотказных наработок $m = 17446$ (таблица 1).

С помощью метода максимального правдоподобия были получены точечные оценки параметров закона распределения $\hat{b} = 1,68$, $\hat{a} = 133,3$ месяца.

С помощью критерия А. Н. Колмогорова доказана верность гипотезы о близости полученной модели наработки роликовой буксы грузового вагона до отказа и статистической функции распределения, значения которой получены методом Джонсона. Поэтому полученную модель отказа роликовой буксы можно использовать при прогнозировании показателей надёжности, в частности остаточного ресурса с вероятностью ошибки, не превышающей 5 %.

Таким образом, принимая значение требуемой вероятности отсутствия отказа роликовой буксы за период u как 0,99 и учитывая эксплуатационные данные для грузовых вагонов постройки 2005–2007 годов, с помощью модели отказа (2) и формулы (1) получаем выражение остаточного ресурса роликовой буксы, безотказно отработавшей 20 месяцев:

$$y^{PB} = \sqrt[b]{\left(\left(\frac{20}{a}\right)^b - \ln 0,99\right)} a - 20. \quad (3)$$

По истечению срока, определяемого с помощью формулы (3), потребуются провести глубокую диагностику роликовой буксы и аналогично выполнить оценку остаточного срока службы.

2.

В работе [5] установлено, что для безаварийного проследования грузового вагона до места ремонта необходимо сохранение некоторой величины остаточного ресурса элементов его конструкции, т.е. обеспечение запаса надёжности. Говоря об аварии грузового вагона по причине отказа роликовой буксы, требуется описать процесс образования конечного множества усталостных повреждений деталей подшипника, являющегося следствием перехода движения роликов из режима трения качения в режим трения скольжения и приводящего к разрушению деталей подшипника с последующим изломом шейки оси [6].

Учитывая необходимость обеспечения запаса надёжности, представим процесс постановки на абстрактный механизированный пункт ремонта вагонов, отцепленных в момент обнаружения неисправности роликовой буксы (предотказное состояние), следующим образом: в пункт ремонта приходят n вагонов, при этом на обслуживание ставится один из отцепленных, а остальные $(n - 1)$ вагонов находятся в очереди на постановку; МПРВ имеет участок накопления вагонов с ограниченным количеством мест и действует n каналов обслуживания (ремонтных бригад). При этом может одновременно ремонтироваться не более n вагонов, на что ориентирован запас деталей и материалов. Процесс постановки вагонов на МПРВ идёт до тех пор, пока n -й отцепленный вагон не будет взят в работу.

Считаем, что вагоны поступают на МПРВ с некоторой фиксированной интенсивностью и без каких-либо приоритетов, по мере продвижения очереди, а очередность ремонта вагонов произвольная. В этом случае количество времени, уже

затраченного на ожидание, не влияет на количество времени, которое ещё придётся потратить.

Исходя из условий возникновения аварии по причине отказа роликовой буксы и постановки вагонов на МПРВ, для описания процесса разрушения деталей подшипника и прихода заявок на ремонт вагонов уместно использовать выражение плотности вероятности гамма-распределения:

$$f(t) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} t^{n-1} e^{-\lambda t}, \text{ при } t > 0 \text{ и } n > 0, \quad (4)$$

где λ, n — параметры распределения; $\Gamma(n)$ — табулированная гамма-функция.

Поскольку n — целое, то выражение функции распределения случайной величины t имеет вид:

$$F(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

При этом наработку роликовой буксы грузового вагона до обнаружения неисправности и периодичность поступления отцепленных вагонов на МПРВ можно интерпретировать как сумму независимых слагаемых, каждое из которых имеет экспоненциальное распределение, являющееся частным случаем распределения Вейбулла—Гнеденко. При экспоненциальном распределении увеличиваем значение вероятности отказа роликовой буксы в период от начала эксплуатации грузового вагона до проведения текущего отцепочного ремонта (интервал $(0; T)$, T — среднее значение наработки роликовой буксы до обнаружения неисправности), обеспечивая запас надёжности.

Из выражения (5) также следует, что:

$$P\{v(t) = k\} = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

где $v(t)$ — количество вагонов (заявок на ремонт), поступивших за время t ; $\lambda = 1/T$ — интенсивность потока поступления заявок на МПРВ.

То есть входящие на МПРВ в случайные моменты времени заявки на ремонт вагонов образуют неординарный пуассоновский поток.

Используя метод максимального правдоподобия и данные таблицы 1, можно определить точечную оценку параметра λ в соответствии с планом испытаний NUT:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i + (N - n)T_a}. \quad (7)$$

Пусть X — сеть железных дорог рассматриваемого полигона эксплуатации грузовых вагонов. Разобьём её на n частей и обозначим через $L_1, L_2, \dots, L_n$. Каждую зону L_j должен обслуживать свой МПРВ H_j . Однако при необходимости вагоны могут пересылаться на ремонтный пункт смежной зоны. Качество текущего ремонта на всех предприятиях полигона считаем одинаковым. На все линейные предприятия поступают неисправные вагоны, образующие во времени поток типа (6). При этом предотказное состояние каждого вагона характеризуется не только моментом времени t , но и координатами местоположения данного вагона $(x_1, x_2) \in X$.

Учитывая низкий технологический уровень МПРВ, при определении в каждой зоне полигона расстояний между планируемым для размещения МПРВ и пунктами технического обслуживания вагонов (ПТО) необходимо их выбирать так, чтобы число неотремонтированных в течение суток вагонов было минимальным.

3.

Проведём прогнозирование изменения числа неотремонтированных в течение суток вагонов с учётом расстояния между планируемым для размещения МПРВ и ПТО.

С помощью формулы (6) при $k = 0$ математическое ожидание числа вагонов (необслуженных заявок), находящихся на определённом расстоянии от наугад выбранного МПРВ в случайный момент времени t , может выступать как функционал, представляющий собой произведение вероятности того, что некоторое число неисправных вагонов не будет проходить ремонт по данному адресу в связи со значительным расстоянием между МПРВ и пунктом их обнаружения, и числа неотремонтированных вагонов, зависящего от этого расстояния. А это значит, что для прогнозирования процесса изменения количества неотремонтированных вагонов в течение суток можно использовать уравнение Фредгольма [7]:



$$f(\mu) = 8,3066e^{-0,0829\mu}$$

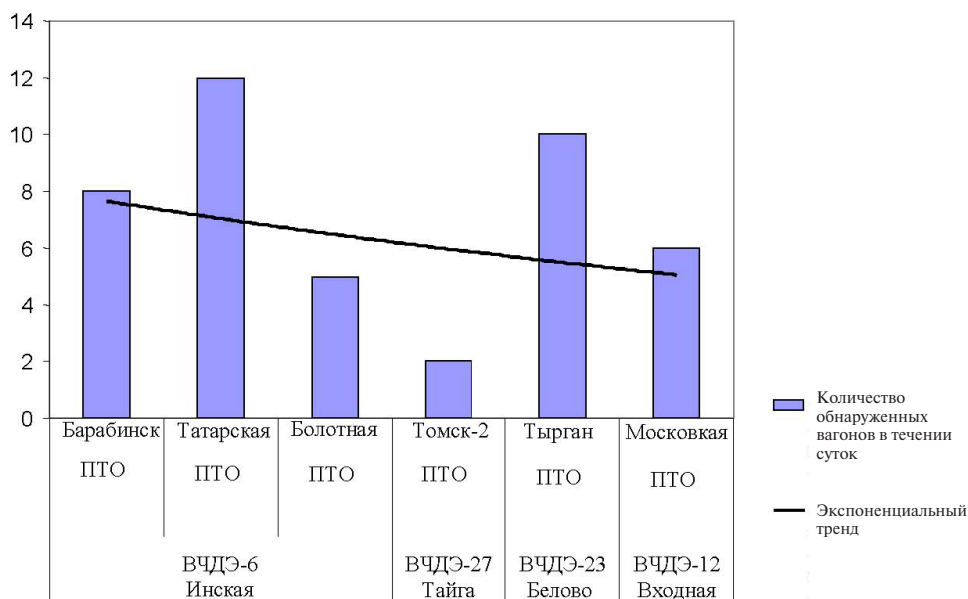


Рис. 1. Пример определения выражения функции $f(\mu)$. Принятые обозначения:
 координата x_1 – ПТО, на котором отцеплены грузовые вагоны по причине неисправности роликовой буксы;
 координата x_2 – эксплуатационное депо, к которому относятся ПТО.

$$N(\mu) = f(\mu) + \int_{s_1}^{s_n} e^{-\hat{\lambda}M(\mu,s)} N(s) ds. \quad (8)$$

Здесь μ – число вагонов, отцепленных по причине неисправности роликовой буксы в течение предыдущих суток; $N(\mu)$ – функция, описывающая зависимость изменения математического ожидания числа неотремонтированных в течение суток вагонов от числа обнаруженных неисправных вагонов μ в зоне полигона их эксплуатации (исследуемый параметр текущего отцепочного ремонта); $f(\mu)$ – функция, описывающая закономерность обнаружения неисправных вагонов μ в зоне полигона эксплуатации (тренд); $e^{-\hat{\lambda}M(\mu,s)}$ – функция, определяющая вероятность того, что некоторое среднее число вагонов M , зависящее от количества отцепленных вагонов μ и расстояния s между ними и планируемым МПРВ в момент времени t , не будет проходить на нём ремонт (исходное ядро данного интегрального уравнения); $N(s)$ – функция, описывающая зависимость математического ожидания числа неотремонтированных в течение суток вагонов от расстояния между пунктами их обнаружения и МПРВ; s_1 – минимальное расстоя-

ние между ПТО и планируемым МПРВ; s_n – максимальное расстояние между ПТО и планируемым МПРВ.

Для решения интегрального уравнения воспользуемся методом последовательных приближений (итераций).

Определяем первое ядро:

$$K_1(\mu, s) = e^{-\hat{\lambda}M(\mu, s)} = e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(s)}.$$

Определяем второе ядро:

$$K_2(\mu, s) = \int_{s_1}^{s_n} e^{-\hat{\lambda}M(\mu, \theta)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(\theta, s)} d\theta.$$

Получаем

$$K_2(\mu, s) = e^{-\hat{\lambda}[M(\mu) + M(s)]} \int_{s_1}^{s_n} e^{-\hat{\lambda}M(\theta)} d\theta = e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(s)} \cdot (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)}).$$

Определяем третье ядро:

$$K_3(\mu, s) = \int_{s_1}^{s_n} e^{-\hat{\lambda}M(\mu, \theta)} e^{-\hat{\lambda}M(\theta, s)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(s)} \cdot (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)}) d\theta = e^{-\hat{\lambda}[M(\mu) + M(s)]} (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)}) \int_{s_1}^{s_n} e^{-\hat{\lambda}M(\theta)} d\theta.$$

Получаем

$$K_3(\mu, s) = e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(s)} \cdot (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)})^2.$$

Матрица значений функции $N(\mu)$

Вероятность возникновения аврала								
Вероятность потери заявки	P_{11}		P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{14}	P_{15}	P_{16}
	P_{21}	36,7	28,7	30,1	33,3	22,4	34,9	40,4
	P_{22}	35,4	40,3	20,4	22,7	34,4	25,8	30,5
	P_{23}	28,3	30,6	33,9	34,5	24,9	24,7	41,7
	P_{24}	29,6	42,2	35,1	26,5	42,5	20,3	19,8
	P_{25}	26,8	32,1	40,8	29,3	22,7	19,5	23,5
	P_{26}	23,6	30,4	35,2	42,8	18,3	26,9	15,5

Определяем и четвёртое ядро:

$$K_4(\mu, s) = e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} \cdot e^{-\hat{\lambda}M(s)} \cdot (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)})^3.$$

Анализируя получаемые результаты, выясняем, что резольвента интегрального уравнения является произведением $e^{-\hat{\lambda}M(\mu)}$ и суммы n первых членов геометрической прогрессии $K_1(\mu, s)$, $K_2(\mu, s)$, $K_3(\mu, s)$, $K_4(\mu, s)$, ..., $K_n(\mu, s)$. Знаменателем данной геометрической прогрессии выступает двучлен $e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)}$.

Получаем решение интегрального уравнения:

$$N(\mu) = f(\mu) + e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} \cdot \int_{s_1}^{s_n} \frac{e^{-\hat{\lambda}M(s)} [(e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)})^n - 1]}{e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)} - 1} ds.$$

Таким образом, в соответствии с уравнением (8) определяем критерий рационального размещения МПРВ на сети железных дорог при оценке вероятности аврала и потери заявки на пункте ремонта:

$$f(\mu) + (e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)}) \cdot \frac{e^{-\hat{\lambda}M(\mu)} [(e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)})^n - 1]}{e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} - e^{-\hat{\lambda}M(s_n)} - 1} = \min_N \max_\mu N(\mu). \quad (9)$$

4.

Поскольку наработка роликовой буксы до обнаружения отказа имеет экспоненциальное распределение, при использовании в расчётах критерия (9) выражение функции $f(\mu)$ может быть определено с помощью экспоненциального тренда, полученного при построении гистограммы, каждому столбцу которой, отображающему число неисправных вагонов (μ), соответствуют свои координаты $(x_j, x_2) \in X$. Значение

функции $M(\mu)$, отражающей зависимость математического ожидания общего числа неисправных грузовых вагонов, отправляемых со всех ПТО на МПРВ, от количества вагонов (μ), обнаруженных на каждом ПТО, может быть найдено как значение интеграла Лебега от функции $f(\mu)$ на некотором числовом отрезке $[\mu_j; \mu_n]$ [8]:

$$M(\mu) = \int_{[\mu_j; \mu_n]} f(\mu) d\mu = f(\mu_1)\mu_1 + f(\mu_2)\mu_2 + \dots + f(\mu_n)\mu_n. \quad (10)$$

При этом некоторое количество вагонов $M(\mu)$ будет находиться от МПРВ на расстоянии $s[s_1; s_n]$. Учитывая необходимость запаса надёжности при проследовании неисправного вагона до МПРВ и варьируя значениями расстояния s_1 и s_n , а также с учётом формулы (3) и среднесуточного пробега грузового вагона $l_{cc} = 500$ км/сут, принимаем условие:

$$s < \frac{30y^{PB}l_{cc}}{n}, \quad (11)$$

где n — число осмотров грузового вагона в пределах максимального интервала между глубокими диагностиками, включающими оценку остаточного ресурса роликовой буксы, одновременно являющееся решением квадратного уравнения [9]:

$$cP^2n^2 + cP(2-P)n + 2(c-PVy^{PB}) = 0, \quad (12)$$

где P — вероятность обнаружения неисправности роликовой буксы, определяемая с учётом экспоненциального распределения её наработки до обнаружения неисправности;

$$c = 0,16 \frac{S}{N} - \text{затраты на один контроль}$$

технического состояния вагона;

S — средние затраты на содержание ПТО;

N — среднестатистическое количество вагонов, прошедших через ПТО;

$$V = \frac{\Pi}{y^{PB}} R - \text{средняя величина потерь}$$





от пребывания вагона в скрытом аварийном состоянии в единицу времени;

P — ожидаемый ущерб от крушения;

R — риск крушения по вине вагонного хозяйства.

Рассмотрим пример. Пусть зона эксплуатации грузовых вагонов находится в пределах Западно-Сибирской железной дороги. Планируется размещение МПРВ, на который из нескольких пунктов технического обслуживания будут поступать грузовые вагоны для проведения текущего отцепочного ремонта. Основываясь на данных Главного вычислительного центра ОАО «РЖД» об отцепках грузовых вагонов по причине неисправности роликовых букс за предыдущие сутки, определяем выражение функции $f(\mu)$ (рис. 1).

С помощью формулы (10) находим значение $M(\mu)$ при определённом числе отпавляемых с ПТО вагонов — $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6$.

Используя среднестатистические данные о затратах и закладываемых уровнях риска, выражения (3), (7), условия (11) и уравнения (8) и (12), получаем матрицу значений функции $N(\mu)$ при оценке вероятности возникновения аврала на МПРВ

$$p_1 = e^{-\hat{\lambda}M(s_1)} \equiv e^{-\hat{\lambda}s_1}$$

и вероятности потери заявки

$$p_2 = e^{-\hat{\lambda}M(s_n)} \equiv e^{-\hat{\lambda}s_n} \text{ при } n=6 \text{ (таблица 2) [10].}$$

На основе критерия (9) определяем: $N(\mu) = 15,5$ при $s_1 = 105$ км и $s_n = 210$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показан метод рационального размещения МПРВ на сети железных дорог с учётом уровня отказов роликовой буксы грузового вагона.

Используемый в рамках метода критерий определения расстояния между ПТО и планируемым ремонтным пунктом учитывает влияние реального технологического уровня МПРВ.

МПРВ является простейшим вагоноремонтным предприятием, и при дальнейших исследованиях в области организации системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов основные принципы разработанного метода могут быть применены и для обоснования рациональных параметров производств гораздо большего объёма — депо и вагоноремонтных заводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устич П. А., Хаба И. И., Ивашов В. А. Вагонное хозяйство. — М.: Маршрут, 2003. — 560 с.
2. Кругликов Е. П. Анализ надёжности буксы: построение дерева событий // Мир транспорта — 2014. — № 2. — С. 82–89.
3. Кругликов Е. П. Построение вероятностной модели надёжности буксы // Мир транспорта — 2015. — № 3. — С. 218–225.
4. ГОСТ Р 27.607–2013. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов.
5. Петров С. В. Методы обоснования нормативов межремонтной наработки грузовых вагонов / Дис... канд. техн. наук. — М.: ВНИИЖТ, 2013. — 149 с.
6. Reliability Model Selection // Proceedings of the 28th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'04), 2004, pp. 534–539.
7. Гирлин С. К. Лекции по интегральным уравнениям. — Ялта: КГУ, 2012. — 168 с.
8. Водопьянов С. К. Интегрирование по Лебегу. — Новосибирск: НГУ, 2014. — 160 с.
9. Иванов А. А., Плотноков И. В., Устич П. А. Определение параметров безопасности грузового вагона. — М.: МИИТ, 2009–40 с.
10. IEC62278:2002. Railway applications — the specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) — 162 p.

Координаты автора: **Кругликов Е. П.** — kruuug@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 04.06.2018, принята к публикации 07.09.2018.