

Оценка оптимального значения вероятности безотказной работы деталей машин, на примере рукояти одноковшового экскаватора

Т.Н. Роговенко, М.М. Зайцева

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: в статье предложен метод поиска оптимального значения вероятности безотказной работы деталей машин при ограничениях на ресурс, характеристики конструкции и экономические показатели. Изложен алгоритм экономического расчета суммарных затрат на устранение отказа, реализованный в программном блоке ХХХ и алгоритм выбора оптимального варианта изготовления детали. В качестве примера рассмотрена рукоять одноковшового экскаватора ЕК-14. Оптимальное значение вероятности безотказной работы, равное 0,999, соответствует конструкции, которая на 7% дороже исходной, но имеет уменьшенные в 2,2 раза суммарные затраты на устранение отказов.

Ключевые слова: надежность, вероятность безотказной работы, ресурс, детали машин, одноковшовый экскаватор, рукоять, оптимизация, затраты на устранение отказа, моделирование, экономический расчет.

В современных условиях одной из основных инженерных проблем, которой всегда уделялось большое внимание, остается надежность техники. Основные условия обеспечения безотказной работы машин состоят в строгом выполнении правила «триады надежности»: надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается при эксплуатации [1-6,11].

Методы статистического моделирования интенсивно используются при оценке показателей надежности машин [1,4,8,9,10]. При этом требования достижения высокой надежности зачастую находятся в противоречии с другими необходимыми характеристиками, такими как уменьшение размеров, получение высокой точности, низкая стоимость и т.д. Поэтому на первый план выходит задача оптимизации вероятности безотказной работы (ВБР) детали или машины в целом для получения компромиссного решения.

Проведение оптимизации ВБР для заданного усталостного ресурса детали связано с возможностью получения экономического эффекта.

Задача поиска оптимального значения вероятности безотказной работы сводится к минимизации суммарных затрат на устранение отказа $Z_{\text{сум}}$, зависящих от затрат на ремонт Z_{p_i} , цены детали C_{d_i} и вероятности отказа $Q_i(T_p)$ по всем возможным вариантам конструктивных решений $i = 1, \dots, k$

$$Z_{\text{сум}}(C_{d_i}, Z_{p_i}, Q_i(T_p)) \xrightarrow{1 \leq i \leq k} \min$$

при ограничениях:

1. $T_p = T_{p3}$, где T_{p3} – заданный усталостный ресурс детали, ч.
2. $Q_i(T_p) > Q_{tr}$, где Q_{tr} – требуемая вероятность отказа;
3. Количество вариантов конструктивных решений конечно и равно k .

Определение цены детали проводится по цене изделия на продажу C_c учетом НДС, общезаводской себестоимости изготовления детали C_c и плановой прибыли P , которые в свою очередь зависят от цеховых $R_{\text{цех}}$ и заводских $R_{\text{зав}}$ расходов:

$$\begin{aligned} C_{d_i} &= C_c + \text{НДС}, \\ C_c &= C_c + P, \\ P &= \varphi_2 C_c, \\ C_c &= R_{\text{цех}} + R_{\text{зав}}, \\ R_{\text{зав}} &= \varphi_3 R_{\text{цех}}, \end{aligned}$$

Цеховые расходы могут быть определены в зависимости от затрат на сырье и материалы $C_{\text{см}}$, возвратных отходов $C_{\text{в}}$, отчислений на социальное страхование $C_{\text{соц}}$, расходов на подготовку и освоение производства $C_{\text{п}}$, расходов на подготовку, содержание и эксплуатацию производственного оборудования $C_{\text{э}}$, затрат на топливо и энергию $C_{\text{тэ}}$.

$$R_{\text{цех}} = C_{\text{см}} + C_{\text{в}} + C_{\text{тэ}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{п}} + C_{\text{э}}$$

Часть параметров, влияющих на цеховые расходы, зависят от затрат на основную $C_{\text{посн}}$ и дополнительную $C_{\text{пдоп}}$ заработную плату производственных рабочих:

$$\begin{aligned}Цэ &= \varphi_4 Цзп, \\Цп &= \varphi_5 Цзп, \\Цсоц &= \varphi_6 Цзп, \\Цзп &= Цзп_{осн} + Цзп_{доп}, \\Цзп_{доп} &= \varphi_7 Цзп_{осн}.\end{aligned}$$

Затраты на топливо и энергию $Цтэ$ учитывают расход электроэнергии на изготовление одного изделия $Рэл$, расход других энергоносителей на одно изделие (сжатого воздуха, инертных газов, пара, воды и т.д.) $Рэн$, суммарную мощность действующих электроустановок $\Sigma М$, действительный годовой фонд времени работы оборудования $Fд$, коэффициенты загрузки оборудования по времени $Кз$, спроса $Кс$, потерь в сетях $Кпс$, годовую программу выпуска изделий $Vг$, норму расхода энергоносителей на один час работы оборудования $Нрэн$.

$$\begin{aligned}Цтэ &= Рэл + Рэн, \\Рэл &= \frac{\Sigma М Fд Kз Kс}{Кпс Vг}, \\Рэн &= \frac{Нрэн Fд Kз}{Кпс Vг},\end{aligned}$$

Возвратные отходы $Цв$ определяются как доля от цены стружки $Цстр$ на массу заготовки m_3 , а затраты на сырье и материалы $Цсм$ зависят от цены инструмента $Ци$ и цены заготовки $Цз$:

$$\begin{aligned}Цсм &= Цз + Ци \\Цв &= \varphi_8 m_3 \cdot Цстр \\Ци &= \varphi_9 Цз \\Цз &= m_2 \cdot Цстр\end{aligned}$$

Коэффициенты φ_l ($l = 2, \dots, 9$) задают соотношение между параметрами и устанавливаются в зависимости от конкретного вида детали, ремонта и в соответствии с законодательством.

Затраты на ремонт Z_p определяют в зависимости от затрат на восстановление, цены детали и ущерба от простоев D_p .

$$Z_p = Z_v + Ц_d + D_p$$

Затраты на восстановление зависят от заработной платы на выполнение всех технологических операций восстановления детали, стоимости материалов, стоимости электроэнергии и накладных расходов $Z_{накл}$:

$$Z_v = \sum_{j=1}^s t_j R_j + \sum_{j=1}^s g_j \alpha_j + \sum_{j=1}^s \mathcal{E}_j \alpha_e + Z_{накл},$$

где s —число операций; t_j —трудоемкость выполнения j -й операции, чел-час;
 R_j —тарифная ставка производителя, выполняющего j -ю операцию, руб/ч;
 g_j —приведенное количество материалов, идущих на операцию под номером j , кг;
 α_j —средняя стоимость 1 кг материалов, идущих на операцию, руб.;
 \mathcal{E}_j —энергоемкость операции j -го вида, кВт-ч; α_e —стоимость 1 кВт-ч электроэнергии, руб.

$$Z_{накл} = \beta \cdot Z_{сп}$$

где β — коэффициент, принимаемый для ремонтных предприятий равным 2,0...2,5. Ущерб от простоев $D_p = C_d \cdot Об \cdot Д$, где C_d — среднедневная стоимость одной машино смены, руб.; $Об$ — объем ковша, м³; $Д$ — количество дней простоя, дн.

Блок-схема алгоритма экономического расчета суммарных затрат на устранение отказа представлена на рис.1. Алгоритм реализован в программном блоке «Расчет суммарных затрат» программного комплекса MRM, разрабатываемый на кафедре «Автотранспортных, строительных и дорожных машин» АСА ДГТУ и объединяющего в себе разные модели оценки параметров надежности машин (рис. 2).

Выбор варианта изготовления детали проводится по алгоритму, который предусматривает возможность изменения исследователем марки стали и величины опасного сечения (рис. 3). Данный алгоритм не является полностью автоматизированным.

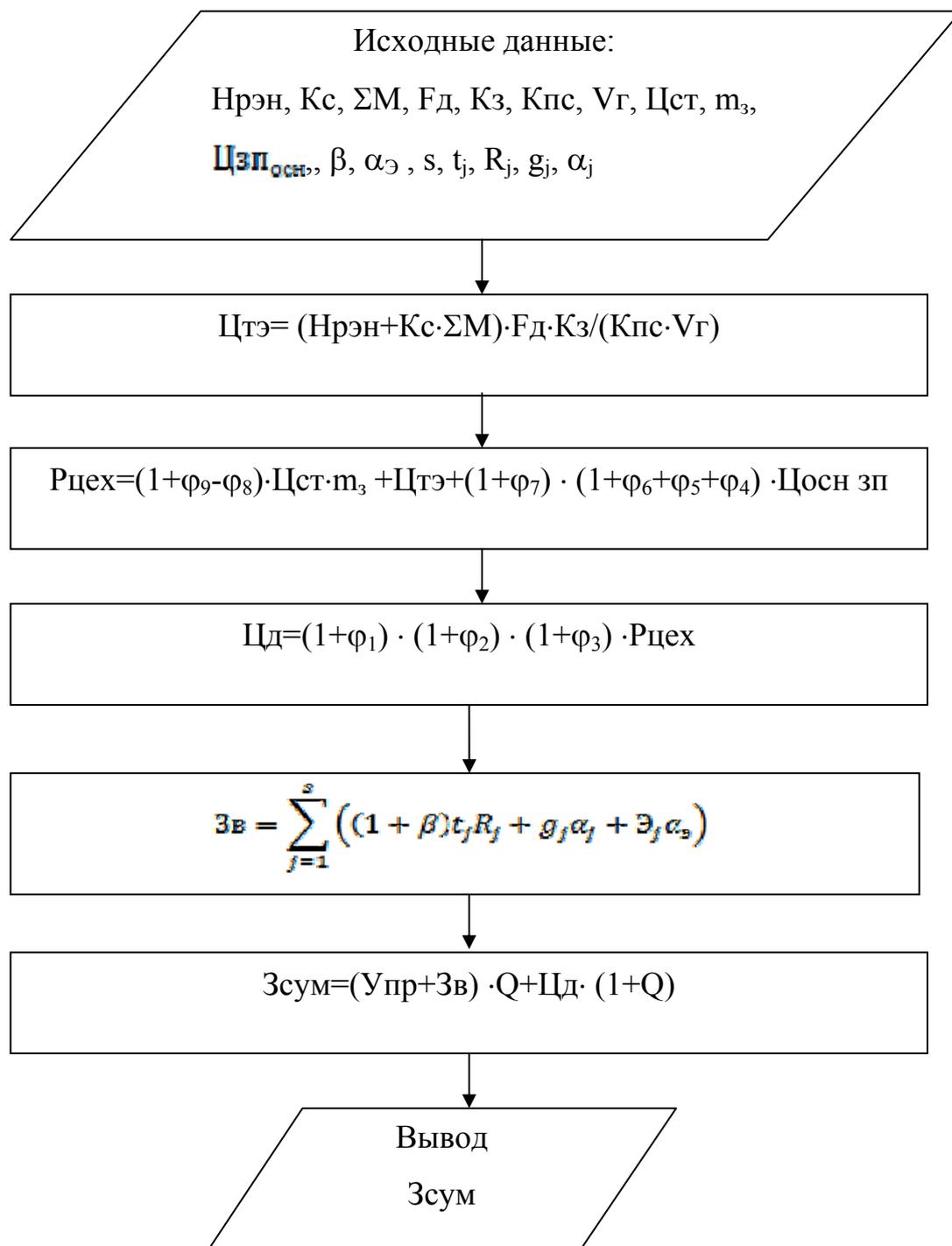


Рис.1. – Алгоритм экономического расчета суммарных затрат на устранение отказа

Цена Детали | Затраты на ремонт | Сводная

Исходные данные для расчета ЦЕНЫ ДЕТАЛИ

Основная заработная плата производственных рабочих Цосн зп, руб.

Суммарная мощность действующих электроустановок N, кВт

Действительный годовой фонд времени работы оборудования Fд, ч

Коэффициент загрузки оборудования по времени Кз

Коэффициент спроса Кс

Коэффициент потерь в сетях Кпс

Годовая программа выпуска изделий Vг, шт.

Норма расхода энергоносителей на один час работы оборудования Нрэн, куб.м.

Масса заготовки m_з, кг

Цена стружки за 1 т Цстр, кг

Цена Детали Цд = 100550,87

а)

Цена Детали | Затраты на ремонт | Сводная

Исходные данные для расчета ЗАТРАТ НА РЕМОНТ

Число операций s

№	t _i , чел-час	R _i , руб/ч	g _i , кг	a _i , руб	Э _i , кВт-ч
1	4	180	1	200	0,5
2	8	180	5	200	0,5
3	4	180	1	200	0,5

Стоимость 1 кВт-ч электроэнергии Аэ, руб.

Коэффициент накладных расходов

Среднедневная стоимость одной машиносмены Сд, руб.

Объем ковша Ок, куб.м.

Количество дней простоя Д, дн.

Затраты на Ремонт Зр = 139238,37

б)

Рис. 2. – Окно программного блока «Расчет суммарных затрат»: а – страница расчета Цд; б – страница расчета Зр

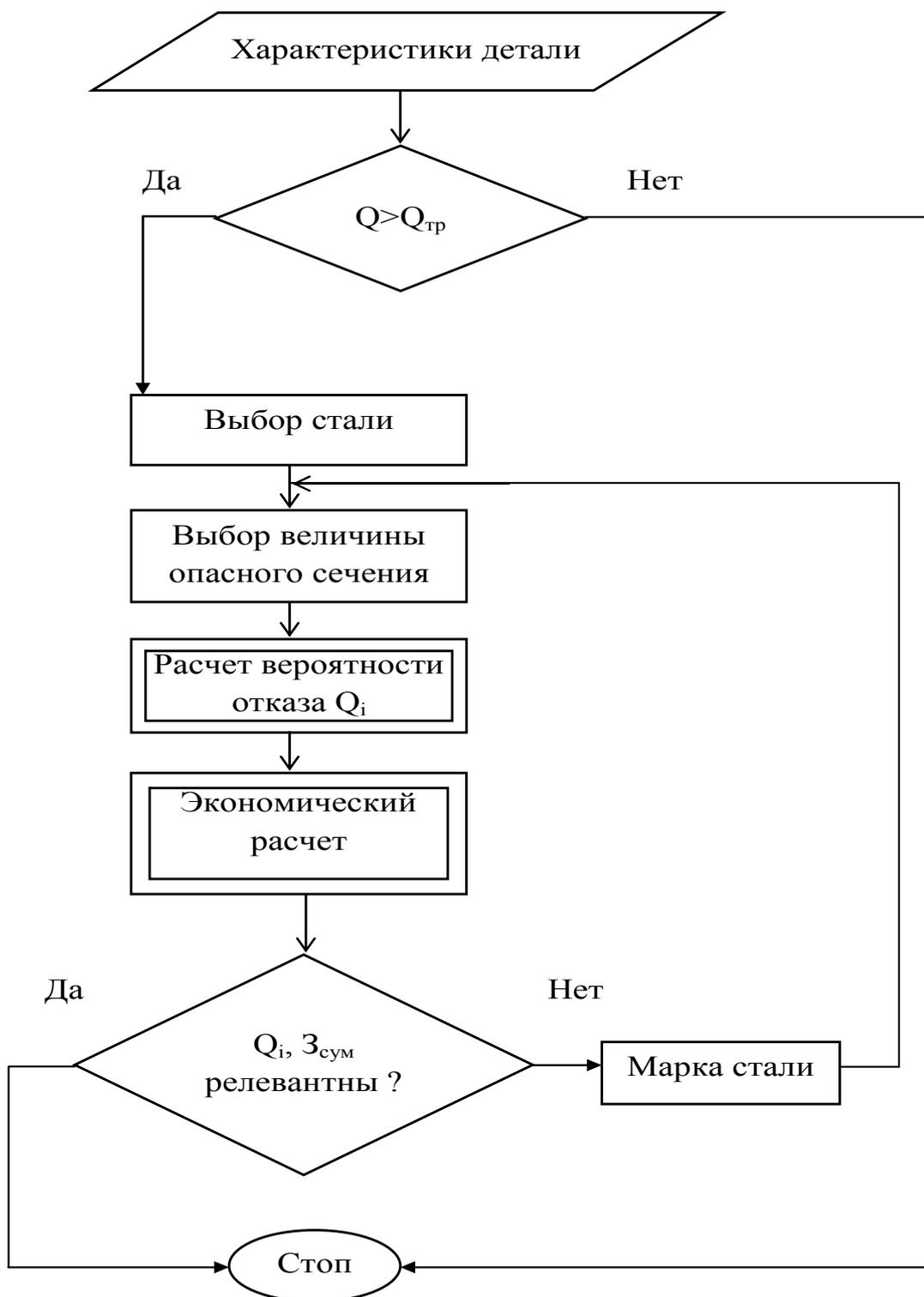


Рис. 3. – Алгоритм выбора оптимального варианта изготовления детали

В качестве примера в данной работе рассмотрена рукоять одноковшового экскаватора ЕК-14 (рис. 4).



Рис. 4. – Общий вид одноковшового экскаватора ЕК-14

Оценка ресурса T_r проводилось с применением метода статистического моделирование в соответствии с моделью, разработанной в [8]. При этом величина заданного ресурса T_{r3} составляла 20 тыс. часов.

В качестве возможных вариантов, связанных с изменением прочностных характеристик и действующего напряжения в опасном сечении детали, рассмотрены:

1. Увеличение толщины стенки детали с 8 до 12 мм.
2. Изменение марки стали. Рассматривались Ст3, 09Г2С, 15ХСНД.
3. Увеличение опасного сечения детали на 20%.

Коэффициенты φ_l ($l = 2, \dots, 9$) равны соответственно: 0,08; 0,1; 0,3; 0,12; 0,1; 0,1; 0,25; 0,01. Для реализации алгоритма выбора оптимальной детали результаты расчетов по всем вариантам конструкционных решений заносятся в сводную таблицу. В полученном массиве реализован поиск минимального значения $Z_{\text{сум}}$ и соответствующих ему номера варианта конструкции, цены детали, затрат на ремонт, ресурса и вероятности безотказной работы. Часть результатов расчетов приведена в таблице 1. Решение о целесообразности внедрения выбранного варианта конструкции должно быть принято отдельно.

Таблица 1

Значения минимального ресурса T_{pi} , цены детали C_{di} , затрат на ремонт Z_{pi} , суммарных затрат $Z_{суми}$

№ варианта	T_{pi} , ч	C_{di} , руб.	Z_{pi} , руб.	$Z_{суми}$, руб.
1	655	94039,56	132727,06	226760
2	2676	95402,6	134090,1	228420
3	8276	96776,36	135463,86	166269
4	691	95365,95	134053,45	229418
5	2593	96861,63	135549,13	231326
6	9446	98368,03	137055,53	165799
7	740	96692,35	135379,85	231531
8	3123	98320,66	137008,16	228204
9	11661	99959,7	138647,2	142108
10	1612	95402,6	134090,1	229359
11	6797	96776,36	135463,86	191195
12	13942	97279,1	135966,6	116994
13	2449	96861,63	135549,13	194050
14	7307	98368,03	137055,53	187180
15	17144	98914,99	137602,49	105658
16	3325	98320,66	137008,16	188472
17	8977	99959,7	138647,2	165540
18	19880	100550,87	139238,37	100913

Таким образом, предложенный метод поиска оптимального значения вероятности безотказной работы деталей машин при ограничениях на ресурс, характеристики конструкции и экономические показатели, успешно применен для рукояти одноковшового экскаватора ЕК-14. Наилучшим вариантом является конструкция рукояти из стали 15ХСНД с толщиной стенки 12 мм и увеличенным радиусом момента инерции на 20%. Цена такой детали составит 100550,87 руб. что на 7% дороже исходной, но снижает суммарные затраты на устранение отказов в 2,2 раза. Оптимальное значение вероятности безотказной работы для ресурса 19880 часов составит 0,999.

Литература

1. Kas'yanov V.E., Rogovenko T.N. Probabilistic-statistical estimation of the gamma-life of a machine chassis // Russian Engineering Research. 1999. V.6. p. 10.
2. Касьянов В.Е., Роговенко Т.Н., Шулькин Л.П. Основы теории и практики создания надежных машин // Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 3.
3. Роговенко Т.Н., Топилин И.В. Основы теории надежности машин и комплексов. Учебное пособие. Изд. Ростов-на-Дону: Ростовский гос. строит. ун-т, 2014. С. 25-30.
4. Komissarov A.P., Lagunova Y.A., Lukashuk O.A. Evaluation of Single-bucket Excavators Energy Consumption// Procedia Engineering, 2016, Volume 150, pp. 1221-1226.
5. Сергеев В.Ю. Зависимость технической готовности одноковшовых экскаваторов и затрат на их техническое обслуживание от выбора тактики проведения планово-предупредительных ремонтов // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 10. С. 20-23.
6. Иванов В.Н., Салихов Р.Ф., Груснев М.Г. Оптимальное планирование функционирования систем производственной, технической эксплуатации и развития парков дорожно-строительных машин. Монография. изд. Омск. СибАДИ, 2013. – 196 с.
7. Зайцева М.М. Обоснование и выбор схемы комплексной механизации работ при строительстве блочного щита управления №2 в г. Березовске Красноярского края // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1900.
8. Зайцева М.М. Обеспечение заданного усталостного ресурса деталей одноковшового экскаватора с использованием малых выборок

- исходных данных: дисс. ... канд. техн наук: 05.02.02, 05.05.04. Ростов-на-Дону, 2010. С. 55-60.
9. Зайцева М.М., Котесова А.А., Котесов А.А. Анализ вариантов изготовления стрелы одноковшового экскаватора // Депонированная рукопись. 07.04.2011. № 164-в2011. С. 1-3.
10. Касьянов В.Е., Зайцева М.М., Котесова А.А., Котесов А.А., Котова С.В. Расчетно-экспериментальное определение гамма-процентного ресурса стрелы одноковшового экскаватора для генеральной совокупности конечного объема // Инженерный вестник Дона, 2012, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/624.
11. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Веремеенко А.А. Диагностика технического состояния транспортных средств // Строительство и архитектура-2015. Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВПО "Ростовский государственный строительный университет", Союз строителей Южного Федерального округа, Ассоциация строителей Дона, 2015. С. 124-126.

References

1. Kas'yanov V.E., Rogovenko T.N. Probabilistic-statistical estimation of the gamma-life of a machine chassis. Russian Engineering Research. 1999. V.6. p. 10.
2. Kas'yanov V.E., Rogovenko T.N., Shchul'kin L.P. Vestnik mashinostroeniya. 2003. №10. p. 3.
3. Rogovenko T.N., Topilin I.V. Osnovy teorii nadezhnosti mashin i kompleksov. [Fundamentals of machines and systems reliability theory]. Uchebnoe posobie izd. Rostov-na-Donu: Rostovskiy gos. stroit. un-t, 2014. pp. 25-30.
4. Komissarov A.P., Lagunova Y.A., Lukashuk O.A. Evaluation of Single-bucket Excavators Energy Consumption. Procedia Engineering, 2016, Volume 150, pp. 1221-1226.

5. Sergeev V.Yu. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2012. № 10. pp. 20-23.

6. V.N. Ivanov, R.F. Salikhov, M.G. Grusnev. Optimal'noe planirovanie funktsionirovaniya sistem proizvodstvennoy, tekhnicheskoy ekspluatatsii i razvitiya parkov dorozhno-stroitel'nykh mashin. [Optimal functioning of the production planning, the technical operation of systems and development of road-building machinery parks]. Monografiya. izd. Omsk. SibADI, 2013. 196 p.

7. Zaitseva M.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine.archive.n3y2013.1900](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive.n3y2013.1900).

8. Zaitseva M.M. Obespechenie zadannogo ustalostnogo resursa detaley odnokovshovogo ekskavatora s ispol'zovaniem malykh vyborok iskhodnykh dannykh. [Providing a given fatigue life shovel parts with the use of small samples of input data] diss. ... kand. tekhn nauk: 05.02.02, 05.05.04. Rostov-na-Donu, 2010. pp. 55-60.

9. Zaitseva M.M., Kotesova A.A., Kotesov A.A. Analiz variantov izgotovleniya strely odnokovshovogo ekskavatora.[Analysis of the manufacturing boom options shovel] Deponirovannaya rukopis'.07.04.2011. № 164-v2011. pp. 1-3.

10. Kas'yanov V.E., Zaitseva M.M., Kotesova A.A., Kotesov A.A., Kotova S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine.archive.n1y2012.624.

11. Zaitseva M.M., Megera G.I., Veremeenko A.A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya transportnykh sredstv. [Diagnostics of technical condition of vehicles]. Stroitel'stvo i arkhitektura - 2015. Rostov-na-Donu: FGBOU VPO "Rostovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet", Soyuz stroiteley Yuzhnogo Federal'nogo okruga, Assotsiatsiya stroiteley Dona, 2015.pp. 124-126.