Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов

Ирина В. Гадолина, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Петр А. Побегайло, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Дмитрий Ю. Крицкий, АО «СУЭК-КРАСНОЯРСК», Красноярск, Россия

Папич Любиша, Исследовательский центр по управлению качеством и надежностью (DQM), Приевор, Сербия

Ирина В. Гадолина

Петр А. Побегайло

Дмитрий Ю.
Крицкий

Папич Любиша

Резюме. Существование человека на Земле во многом зависит от находящейся в его распоряжении энергии. Ее львиная доля получается на базе переработки полезных ископаемых, извлекаемых из планетной коры открытым способом. При этом качественное и дешевое извлечение полезных ископаемых во многом определяется надежностью используемых при этом машин и механизмов, комплектов машин и применяемых технологических решений. Основу парка горнодобывающих машин составляют экскаваторы того или иного вида. При этом с окружающей средой (с грунтом) у них взаимодействуют в основном элементы рабочего оборудования – чаще всего ковши и детали ковша(-ей). Необходимо обратить внимание на то, что рабочие органы экскаваторов и их элементы в процессе взаимодействия с внешней средой (грунтом) испытывают действие так называемого абразивного износа. Поскольку абразивный износ элементов рабочего оборудования (особенно часто – зубьев ковша (-ей) экскаватора) приводит к необходимости их периодической замены, это не может не сказаться на эффективности работы всего экскаватора и тех технологических цепочек, в которые он включен. Ведь периодические остановки и ремонты снижают коэффициент готовности – важнейший комплексный показатель оценки надежности оборудования. С учетом всего вышесказанного целью данной работы являлось уточнение известной ранее формулы, предложенной более тридцати лет во ВНИИСДМ (Рейш А.К.), для оценки скорости абразивного износа зубьев ковшей экскаваторов. При этом нами впервые и с достаточной полнотой был рассмотрен вопрос учета многорежимности работы горного оборудования, а именно, работа экскаватора в различных горно-технологических условиях и, в частности, на разных грунтах. Кроме этого нами осуществлен перенос подхода Рейша с одноковшовых машин на многоковшовые, непрерывного действия. Для достижения указанной цели авторы настоящей работы использовали метод обобщения данных из известной литературы, метод натурного эксперимента в условиях эксплуатации конкретного экскаватора и метод математического моделирования (в варианте использования метода Монте-Карло). Все это позволило уточнить значения параметров, входящих в формулу Рейша. Уточненная нами зависимость теперь может быть использована при оценке надежности машин при варьировании вариантов эксплуатации оборудования, а также при назначении времени профилактических осмотров.

Ключевые слова: износ, скорость износа, роторный экскаватор, зубья ковша, горные породы, режимы работы.

Формат цитирования: Гадолина И.В., Побегайло П.А., Крицкий Д.Ю., Папич Любиша. Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов // Надежность. 2019. №1. С. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-18-23

Актуальность и современное состояние вопроса.

Стабильность развития топливно-экономического комплекса нашей страны напрямую зависит от надежной и высокопроизводительной работы сложившихся технологических цепочек – от единичных горных машин, их комплектов и до высокотехнологичного оборудования энергетических станций. При этом важнейшей задачей открытых горных разработок было и является обеспечение удобного, полного и максимально дешевого доступа к полезному ископаемому. Для этого используются различные машины, комплекты машин и технологические схемы.

В настоящей работе для конкретности рассмотрен в качестве объекта исследования вскрышной комплекс непрерывного действия SRs(k)-4000 (ГДР), работающий уже много лет в Красноярском крае (Назаровское бурогольное месторождение).

На рис. 1 приведен график планируемого и фактического коэффициентов $K_{гг}$ готовности указанного

Рисунок 1 – Плановый и фактический коэффициент готовности экскаватора SRs(k)-4000

оборудования. Видно, что фактический показатель надежности не достигает планового показателя, что указывает на необходимость разработки и внедрения мер по скорейшему исправлению сложившейся негативной картины.

При этом известно, что доступность машин к использованию во времени во многом обеспечивается надежной работой всех узлов и механизмов [1–5 и мн. др.]. Анализ отказов при этом показывает, что наибольшее количество часов простоя любого экскаватора (и рассматриваемого нами, в частности) связано с восстановлением работоспособности рабочего оборудования, а именно с заменой изношенных зубьев ковша. Это подтверждает и рис. 2. Основным фактором, приводящим к отказам зуба ковша (рис. 3) и его элементов является абразивный износ (рис. 4).

Исследованию проблемы абразивного износа посвящено большое количество работ (достаточно неплохой их обзор до 1980 года можно найти, например, в книге [6]).

Наиболее фундаментальными в области исследования абразивного износа сейчас принято считать труды Хрущева М.М. [7 и мн. др.], Крагельского И.В. [8 и мн. др.], Дроздова Ю.Н. [9 и мн. др.] и Костецкого Б.И. [10 и мн. др.].

В области горных и строительных машин этой темой в различных ее аспектах и в разное время занимались и занимаются следующие известные специалисты: Абезгауз В.Д. [11 и др.], Акильев С.А., Банатов П.С., Барон Л.И., Боголюбов Б.Н. [12 и др.], Валова Л.С., Ветров Ю.А. [13 и др.], Виноградов В.Н., Глатман Л.Б., Горюшкин Н.Н., Гринберг Н.А., Домбровская И.К., Евдокимов Ю.А., Зимин А.И. [14 и др.], Зорин В.А., Икрамов У. [6, 15 и др.], Кабашев Р.А., Ковальчук В.А., Колесов В.Г., Кох П.И., Ларионов В.П., Лещинер В.Б.,

Рисунок 2 – Диаграмма распределения отказов узлов экскаватора в 2013–2017 гг.

Рисунок 3 – Ковш роторного экскаватора

Рисунок 4 – Зуб экскаватора SRs до (вверху) и после эксплуатации (внизу)

Лифшиц Л.С., Львов П.Н., Метлин Ю.К., Новиков И.В., Папич Л. [16 и др.], Петров И.В., Пристайло Ю.П., Рейш А.К. [17 и др.], Смородинов М.И., Солод Г.И., Сорокин Г.М., Тененбаум М.М. [18 и др.], Ткачев В.Н. [19 и др.], Торопов В.А., Фаддеев Б.В., Фролов П.Т., Харач Г.М., Чудаков К.П., Шрейнер Л.А., Ямпольский Г.Я. [20] и мн. др.

Однако несмотря на многочисленные труды выполненные в области познания абразивного износа, многие практически важные задачи еще не нашли своего полного и законченного разрешения.

Так, до сих пор актуальной является проблема оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов – зубьев ковшей и их элементов [см., например, 17, 21–26 многие др.].

В работе [17], выполненной более тридцати лет назад, ее автором была предложена эмпирическая формула для оценки скорости износа зубьев ковша экскаватора. Однако из-за большого количества эмпирических коэффициентов, значения которых не были известны ее автору, использовать ее тогда и позднее было невозможно (при этом из всех известных нам практически интересных подходов этот представляется нам наиболее удачным).

Изменению этой негативной ситуации и посвящена настоящая работа.

Теория вопроса. Об уточнении формулы Рейша [17]. В работе [17] ее автором предложено соотношение для оценки ресурса зуба ковша экскаватора вида:

$$t_H = \frac{U_D}{\gamma}, \quad (1)$$

где U_D – допустимый износ зуба (этот параметр обычно рекомендуется брать для инженерных расчетов равным половине его рабочей длины); γ – скорость изнашивания, которую в свою очередь было предложено оценивать по эмпирической формуле вида:

$$\gamma = (A \cdot P \cdot K_{p0} \cdot K_{vp0} \cdot f \cdot s \cdot t_p \cdot K_y \cdot K_{ABP} \cdot \frac{1}{K_{ИЗН}}) \cdot K_{t20}, \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности; P – давление на рабочей поверхности зуба; K_{p0} – коэффициент, учитывающий влияние изменения давления; K_{vp0} – коэффициент, учитывающий влияние частоты изменения давления; f – коэффициент трения; s – путь трения зуба; t_p – продолжительность копания; K_y – коэффициент, учитывающий затупление зуба; K_{ABP} – коэффициент абразивности грунта; $K_{ИЗН}$ – коэффициент износостойкости; K_{t20} – коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды.

При взгляде на формулу (2) очевидно, что для ее успешного применения нужны весьма многочисленные экспериментальные данные. При этом часть таких данных известна с достаточной для инженерных расчетов точностью ($P, f, s, t_p, K_y, K_{ABP}, K_{ИЗН}, K_{t20}$) [2, 6–19, 22–26 и мн. др.], для части параметров сейчас известны лишь возможные диапазоны существования (K_{p0}, K_{vp0}), а для значения параметра A никаких данных сегодня не известно (о чем честно написал и автор книги [17]).

Таким образом, понятно, что обычным инженером формула (2) использована быть не может (заметим, что автор этой формулы допустил некоторую досадную неточность и с размерностью). Необходимо выполнить исследование, нацеленное на выяснение того, какие значения может принимать коэффициент A (хотя бы понять порядок этой величины).

Для этого мы предлагаем переписать формулу (2) в более удобном, на наш взгляд, виде:

$$\gamma = A \cdot K_1 \cdot K_2 = A \cdot \prod_{j=1}^m K_j \cdot \prod_{i=1}^k K_i, \quad (3)$$

где $K_1 = \prod_{j=1}^m K_j$ – первый обобщенный коэффициент износа, не зависящий от режима работы машины, очевидно, равный произведению ряда коэффициентов ($f, K_{ABP}, K_{ИЗН}$ и K_{t20}); $K_2 = \prod_{i=1}^k K_i$ – второй обобщенный коэффициент износа, зависящий от режима работы машины, также очевидно, равный произведению ряда иных коэффициентов ($P, K_{p0}, K_{vp0}, s, t_p, K_y$).

Такая новая запись позволяет нам при необходимости рассматривать отдельно поведение групп эмпирических коэффициентов и точнее учитывать непосредственные особенности работы конкретного экскаватора.

Отметим, что для указанного выше экскаватора нам известны как разброс величины износа зубьев, так и экстремальные значения коэффициентов уравнения (2) для конкретных условий эксплуатации.

Тогда, имея в виду в качестве опоры выполненные нами экспериментальные исследования, возможные значения коэффициента A мы будем оценивать по очевидному соотношению:

$$A = \frac{\gamma}{K_1 \cdot K_2}. \quad (4)$$

В табл. 1 и 2 приведены исходные данные для расчета.

Учет эксплуатации на разных режимах. Часть вышеприведенных коэффициентов зависят от типа грунта. С целью более точного учета этого фактора для условий работы конкретного экскаватора по данным его эксплуатационной надежности нами был сформирован так называемый обобщенный блок, учитывающий разнорежимность использования изделия. Это связано с тем, что вскрышной комплекс SRs(k)-4000 в течение рассматриваемого времени эксплуатации работал на разных грунтах.

Табл. 3 содержит в себе ряд характеристик условий эксплуатации рассматриваемого экскаватора, необходимых для формирования указанного обобщенного блока,

она сформирована нами на основании экспертных оценок и анализа известной литературы.

Отметим, что при этом собирались данные по указанным выше коэффициентам для каждого из режимов.

Далее, для каждого i -ого режима по формуле (3) определялась индивидуальная скорость изнашивания γ^i с учетом данных из наших таблиц. Поскольку накопление деградационных повреждений от износа происходит на всех режимах работы, для применения представленных выше соотношений требуется оценить среднюю скорость износа $\bar{\gamma}$ с учетом информации для построения обобщенного блока по данным наших таблиц.

Средняя скорость $\bar{\gamma}$ выражается как частное от деления суммарного расстояния на суммарное время, при этом расстояние U_{Σ} – это величина суммарного износа, мм:

$$\bar{\gamma} = \frac{U_{\Sigma}}{T} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \gamma^i \cdot T \cdot p_i = \sum_{i=1}^k \gamma^i \cdot p_i, \quad (5)$$

где T – общее время работы; k – число рассматриваемых режимов эксплуатации.

Заметим, что при получении формулы (5) мы использовали очевидные соотношения вида: $t_i = T \cdot p_i$, где t_i – время работы в i -ом режиме и $U_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k \gamma^i t_i$.

Итак, можно констатировать, что средняя скорость износа при задании долей режимов в отношении времени, является средней арифметической величиной по режимам с учетом долей p_i .

Таблица 1 – Коэффициенты, входящие во второй обобщенный коэффициент износа

K_{p0}	K_{vp0}	s , м	t_p , сек.	K_y^*	P , МПа
1	2	3	4	5	6
0,6 – 3	0,6 – 1,54	5 – 10	3600	1,088 – 1,132	0,1 – 2,0

* – этот параметр определяется по формуле вида [17]: $K_y = 1 + 0,44 \cdot Y$, где Y – проекция площадки износа (обычно от 0,2 до 0,3 м).

Таблица 2 – Коэффициенты, входящие в первый обобщенный коэффициент износа

f	K_{ABP}	$K_{изн}$	K_{t20}
1	2	3	4
0,25 – 0,8	0,7 – 6,6	1,0 – 2,1	$K_{t20} = (0,05 \dots 0,08) \cdot t_{\phi}^*$

* – параметр t_{ϕ} – фактическая температура меняющаяся от минус 60 до плюс 50 градусов (на наш взгляд его нужно брать по модулю, исключая значение равное нулю).

Таблица 3 – Распределение времени работы экскаватора по типу грунтов и некоторые их характеристики

Тип грунта	Средняя доля эксплуатации по времени, p_i	Удельный вес грунта, ρ , т/м ³	Коэфф. трения, f	Коэффициент абразивности грунтов, K_{ABP}
1	2	3	4	5
Торф	0,15	0,8 ... 1,2*	0,25	0,7
Суглинки	0,25	2,04	0,30	1,66
Ил	0,1	1,8 ... 2,0*	0,25	1,0
Алевриты	0,1	2,04 ... 2,15	0,50	1,0
Глина	0,15	2,03	0,35	1,2
Глинистые песчаники	0,25	2,4	0,30	6,6
	$\Sigma p_i = 1,0^{**}$			

* – точное значение существенно зависит от влажности.

О коэффициенте A . При известном из натурального эксперимента времени T , ч, варианты численных значений коэффициента пропорциональности A определяются из представленных выше формул и таблиц.

Выполненная нами оценка указанного коэффициента в среднем составила: $A = 8,1 \cdot 10^{-8}$ [1/(Па·ч)], при том условии, что γ имеет размерность м/ч.

Тем не менее, как нас учит теория надежности [27, 28 и мн. др.], лишь точечной оценки недостаточно. Для оценки доверительных интервалов по параметру A , предполагая у всех потребных для этого параметров (часть которых, напомним, существует в указанных выше диапазонах), которые, что очевидно, имеют в общем случае стохастический характер, нормальное распределение со средними значениями, соответствующими серединам интервалов и заданными коэффициентами вариации, воспользуемся методом Монте-Карло [29 и мн. др.] (пример этого описан в статье [30]).

В итоге, при вычислении распределения константы A с варьированием для нескольких переменных 90% доверительный интервал для A в предположении о нормальном распределении величин, представленных в таблицах выше, по предварительному расчету составили $6,8 \cdot 10^{-8} \dots 1,2 \cdot 10^{-7}$ [1/(Па·ч)].

Заключение. На основании как полученных нами экспериментальных данных по эксплуатации роторного экскаватора в различных горно-технологических условиях на протяжении длительного периода времени, так и с учетом выполненного нами анализа существующей литературы нами оценен коэффициент в выражении для вычисления скорости износа.

Это сопровождалось выполненной нами оценкой точности результатов.

По итогам наших исследований можно заключить, что теперь формула Рейша с успехом может быть использована при назначении времени осмотров, ремонтов и замен, а также для анализа влияния эксплуатационных факторов (задачи оптимизации при этом могут ставиться по аналогии со статьей [31], в частности, с учетом экономических критериев).

Кроме этого, теперь может быть поставлена и впоследствии успешно решена задача оптимизации комплектов ЗИП на карьерных экскаваторах и в отдельных ремонтных подразделениях, например, так, как предложено в работе [32].

Очевидно, что возможность использования формулы Рейша есть существенный позитивный сдвиг в деле построения методологии прогнозирования, поддержания и, по возможности, повышения надежности машин для открытых горных работ (в качестве примера можно указать на статью [33]).

В завершение работы заметим, что хотя исследование проводилось на основе данных определенного экскаватора, эксплуатировавшего в конкретных условиях, не будет потеряна общность получаемых результатов, т.к. условия Назаровского разреза и Красноярского края

в целом достаточно типичны для эксплуатации таких машин в РФ. Условия Украины или Казахстана и других районов, возможно, потребуют уточнения полученных в настоящем исследовании данных.

Подобная работа будет продолжена нами – с одной стороны с точки зрения дальнейшего уточнения значений коэффициента A , с другой – в рассмотрении иных видов экскаваторов. Будут также принципиально улучшены методы сбора и обработки экспертной информации (отталкиваясь, например, от работы [34 и мн. др.]).

Библиографический список

1. Федоров, Д.И. Надежность металлоконструкций землеройных машин [Текст] / Д.И. Федоров, Б.А. Бондарович, В.И. Перепонов. – М.: Машиностроение, 1971. – 217 с.
2. Федоров, Д.И. Надежность рабочего оборудования землеройных машин [Текст] / Д.И. Федоров, Б.А. Бондарович. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
3. Гаевская, К.С. Статистические исследования нагрузок рабочего оборудования и механизмов карьерных экскаваторов [Текст] / К.С. Гаевская; в кн. «Вопросы механизации открытых горных и землеройных работ». – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 190-197.
4. Шендеров, А.И. Надежность горнотранспортного оборудования [Текст] / А.И. Шендеров, О.А. Емельянов, И.М. Один. – М.: Недра, 1976. – 247 с.
5. Владимиров, В.М. Повышение производительности карьерных многоковшовых экскаваторов [Текст] / В.М. Владимиров, В.К. Трофимов. – М.: Недра, 1980. – 313 с.
6. Икрамов, У. Механизм и природа абразивного изнашивания [Текст] / У. Икрамов. – Ташкент: ФАН, 1979. – 136 с.
7. Хрущев, М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
8. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
9. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин [Текст] / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
10. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – М.-Киев: Машгиз, 1959. – 476 с.
11. Абезгауз, В.Д. Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов [Текст] / В.Д. Абезгауз. – М.: Машиностроение, 1965. – 280 с.
12. Боголюбов, Б.Н. Долговечность землеройных и дорожных машин [Текст] / Б.Н. Боголюбов. – М.: Машиностроение, 1964. – 224 с.
13. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами [Текст] / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.

14. Зимин, А.И. Повышение долговечности и прогнозирование сроков службы деталей машин [Текст] / А.И. Зимин. – Свердловск: КнПИИТпСОС НТО, 1982. – 64 с.
15. Икрамов, У. Расчет и прогнозирование абразивного износа [Текст] / У. Икрамов, К.Х. Махкамов. – Ташкент: ФАН, 1982. – 148 с.
16. Папич, Л. Износ зубьев роторного экскаватора [Текст] / Л. Папич, И. Гадолина, Р. Зайнетдинов // Proceedings of the 8th DQM International Conference Life cycle engineering and management ICDQM-2017. – 2017. – С. 84-89.
17. Рейш, А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин [Текст] / А.К. Рейш. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
18. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию [Текст] / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
19. Ткачев, В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания [Текст] / В.Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1995. – 336 с.
20. Ямпольский, Г.Я. Исследование абразивного износа элементов пар качения [Текст] / Г.Я. Ямпольский, И.В. Крагельский. – М.: Наука, 1973. – 64 с.
21. Колокольцев, В.М. Оценка эксплуатационной стойкости и моделирование технологии изготовления отливки «Зуб ковша экскаватора» [Текст] / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Синицкий, Н.А. Феоктистов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 4. – С. 61-64.
22. Хазанет, Л.Л. Эксплуатация карьерного оборудования непрерывного действия [Текст] / Л.Л. Хазанет, П.В. Остапенко, М.Г. Моисеенко. – М.: Недра, 1984. – 251 с.
23. Чудновский, В.Ю. Механика роторных экскаваторов [Текст] / В.Ю. Чудновский. – Иерусалим: Изд-во МИКА К.А., 2002. – 329 с.
24. Баловнев, В.И. Машины для земляных работ [Текст] / В.И. Баловнев, А.Н. Зеленин, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
25. Справочник механика открытых горных работ. Экскавационно – транспортные машины непрерывного действия [Текст] / Под ред. М.И. Щадова, В.М. Владимирова. – М.: Недра, 1989. – 237 с.
26. Рашевский, В.В. Качество углей ОАО «СУЭК» [Текст] / В.В. Рашевский, В.Б. Артемьев, С.А. Силютин. – М.: Кучково поле, 2010. – 464 с.
27. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
28. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
29. Соболев, И.М. Метод Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1968. – 64 с.
30. Papich, L. Interval Estimation of the Availability Factor of the Bucket-wheel Excavator Based on Bootstrap Modeling [Text] / L. Papich, I.V. Gadolina, R.I. Zainetdinov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2016. – Т. 45. – № 6. – Р. 531-537. DOI: 10.3103/S1052618816060091
31. Володарский, В.А. Оптимизация предупредительных замен и ремонтов в условиях неопределенности [Текст] / В.А. Володарский // Надежность. – 2013. – № 2. – С. 34-41. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-34-50
32. Черкесов, Г.Н. О критериях выбора комплектов ЗИП [Текст] / Г.Н. Черкесов // Надежность. – 2013. – № 2. – С. 3-18. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-3-33
33. Анцупов, А.В. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям [Текст] / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Надежность. – 2013. – № 3. – С. 5-14. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-3-5-23
34. Крянев, А.В. К вопросу о качестве и надежности экспертных оценок при определении технического уровня сложных систем [Текст] / А.В. Крянев, С.С. Семенов // Надежность. – 2013. – № 4. – С. 90-99. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-4-90-109

Сведения об авторах

Ирина В. Гадолина – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: gadolina@mail.ru

Петр А. Побегайло – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: petr214@yandex.ru

Дмитрий Ю. Крицкий – инженер, начальник отдела эксплуатации и ремонта ГТО, АО «СУЭК-КРАСНОЯРСК», Красноярск, Россия, e-mail: kritskijdy@suek.ru

Папич Любиша – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надежностью (DQM), Приевор, Сербия

Поступила: 31.10.2018