

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РУКОЯТИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы прогнозирования показателей надежности рукояти карьерного экскаватора. В качестве основного показателя надежности принят показатель долговечности – средний ресурс. Целью исследования явилось обоснование расчетных зависимостей, позволяющих определить числовые характеристики ресурса рукояти экскаватора методами физической теории надежности. Разработаны расчетные формулы для определения среднего ресурса рукояти на основании измерений или расчетов действующих на нее нагрузок и, следовательно, возникающих в рукояти напряжений. Величина последних, отражая условия эксплуатации карьерных экскаваторов, является случайной величиной, что обусловило случайный характер и ресурса рукояти. В связи с этим возникла необходимость оценки возможного отклонения значения ресурса от среднего значения. Для оценки рассеяния ресурса рукояти карьерного экскаватора предложена методика расчета его дисперсии и среднего квадратического отклонения методом линеаризации функции случайных аргументов. В результате получена методика для расчета численных значений ресурса рукояти карьерного экскаватора с учетом случайной природы этого параметра и изменяющихся эксплуатационных условий. В качестве примера определен ресурс рукояти карьерного экскаватора ЭКГ-5А. Исходными данными для расчета послужили результаты тензометрических измерений напряжений в рукоятях карьерных экскаваторов в условиях горно-обогатительного производства Магнитогорского металлургического комбината. На основании аналогичных исходных данных организован и проведен численный машинный эксперимент по методу Монте-Карло. Числовые характеристики ресурса рукояти карьерного экскаватора, определенные методом линеаризации функции случайных аргументов и методом Монте-Карло, соответствуют статистическим данным о наработках рукоятей в условиях горно-обогатительного производства Магнитогорского металлургического комбината.

**Ключевые слова:** надежность, долговечность, ресурс, экскаватор, рукоять, отказ, напряжение.

### Введение

Условия горного производства требуют своевременного проведения обслуживания и плановых ремонтов машин и оборудования в связи с тем, что любая внеплановая остановка в результате аварийной ситуации крайне негативно оказывается на ритмичности работы предприятия [1, 2]. С другой стороны, под рациональной эксплуатацией горных машин и оборудования подразумевается, в том числе, полное использование их ресурса. Это накладывает ограничение на сокращение межремонтных периодов [3, 4]. Карьерные экскаваторы являются важнейшей составляющей транспортно-технологических комплексов горнодобывающих предприятий. В качестве примера на **рис. 1** и 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие отказы экскаваторов в условиях разных горных предприятий. Отказы систематизированы по признаку принадлежности отказавшего элемента к тому или иному узлу [5]. Различия в диаграммах свидетель-

ствуют о заметном влиянии на показатели надежности условий эксплуатации машин.

При планировании срока выполнения ремонтов и технического обслуживания машин и оборудования, как правило, используют рекомендации завода-изготовителя [6]. Из диаграмм на **рис. 1** и 2 следует, что в зависимости от условий эксплуатации оборудования рекомендованные предприятием-изготовителем сроки могут быть скорректированы. Организация постоянного контроля над техническим состоянием деталей и узлов может быть весьма затруднительна, т.к. зачастую для этого требуется остановка машины. Аналитический прогноз ресурса узлов изделий, составляющих различные структурные единицы оборудования, позволяет решить обозначенную проблему [7–23].

Из диаграмм на **рис. 1** и 2 очевидно, что значительная доля отказов связана с нарушением работоспособного состояния рабочего оборудования. Одним из распространенных видов отказов является усталостное разрушение рукояти карьерного экскаватора.

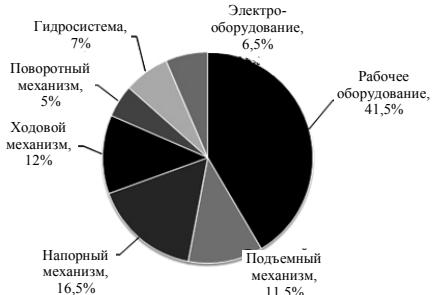


Рис. 1. Распределение отказов экскаваторов по узлам за 2010–2015 гг. на Магнитогорском металлургическом комбинате (Челябинская область)

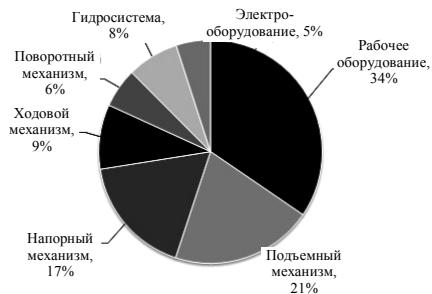


Рис. 2. Распределение отказов экскаваторов по узлам за 2010–2015 гг. на Учалинском горно-обогатительном комбинате (Республика Башкортостан)

#### Структурно-функциональный метод декомпозиции машин на группы элементов со схожими причинами отказов

Любая машина содержит структурные элементы, каждый из которых выполняет собственную функцию. Любой из элементов можно отнести к одной из трех групп: основные звенья, связи строения или связи функционирования (приводы) [24]. К основным звеньям относятся металлоконструкции, к связям строения – пары трения, подшипники и оси, а к элементам приводов – подшипники, валы и зубчатые передачи. Рукоять карьерного экскаватора, очевидно, относится к основным звеньям.

Структурно-функциональный подход позволяет выделить в структуре любой, в том числе и многодвигательной, машины три функциональ-

ные системы: механическую с силовыми приводами, которая выполняет основные функции машины; систему вспомогательных устройств, служащих для улучшения свойств машины, и систему управления [24].

Подсистемы, входящие в структуру механической системы многодвигательной машины [24]:

- основные исполнительные звенья. К ним относятся элементы, для движения которых предназначена машина. На структурной схеме они обозначаются треугольной рамкой, а неподвижное основание – прямоугольной;

- связи строения. К ним относятся элементы, образующие архитектуру механической системы. Под ними понимаются кинематические пары различных классов и типов и их сочетания, а также кинематические соединения основных звеньев. При снятии этих связей механическая система машины распадается на отдельные звенья [25]. На структурной схеме они обозначаются линиями без стрелок;

- связи функционирования. К ним относятся элементы, обеспечивающие действие системы и ее функционирование; например, приводы основных звеньев, включающие в себя двигатель с силовым редуктором и кинематические цепи передаточных механизмов. При снятии этих связей машина сохраняет свое строение, но не может выполнять свои функции [26]. На структурной схеме они обозначаются линиями со стрелками. Начало линии показывает, на каком звене расположжен двигатель.

На рис. 3 представлена структурная схема карьерного экскаватора. В структуре выделены основные звенья – ходовая рама 1, поворотная платформа 2, стрела 3, рукоять 4 и ковш 5. Связи строения соединяют основные между собой – поверхность контакта гусениц с грунтом (a), подвижное соединение поворотной платформы с рамой (b), а также шарниры, соединяющие стрелу с платформой, рукоять со стрелой и ковш с рукоятью (c, d и e соответственно). Связи функционирования представлены приводами хода (I), поворота платформы (II), напора рукояти (III), поворота рукояти (IV) и ковша (V).

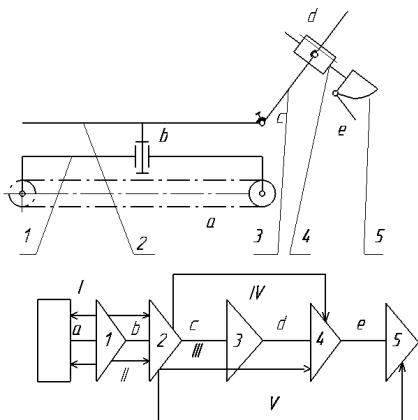


Рис. 3. Карьерный экскаватор: *a* – схема основной кинематической цепи; *б* – структурная схема; 1 – ходовая рама; 2 – поворотная платформа; 3 – стрела; 4 – рукоять; 5 – ковш

#### Методика расчета ресурса рукояти как функции случайных аргументов

Для некоторых деталей, входящих в состав структурных элементов оборудования, таких как подшипники качения, существуют зависимости для расчета ресурса. Для других деталей эти зависимости могут быть получены на основе известных методик на основании условий их прочности [27].

Средний ресурс рукояти  $T$  при условии ее отказа в результате усталостного разрушения зависит от продолжительности цикла нагружения, следовательно, от количества воздействий изгибающего момента в единицу времени.

$$T = \frac{n_{\sigma}}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество циклов нагружения рукояти в единицу времени, т.е. число циклов экскавации в единицу времени;

$n_{\sigma}$  – число циклов нормальных напряжений до разрушения рукояти,

$$n_{\sigma} = \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m \cdot N_G. \quad (2)$$

Зависимость (2) получена из уравнения кривой усталости для условия  $\sigma_a \geq \sigma_{-1}$  [27]:

$$\sigma_a^m \cdot n_{\sigma} = \sigma_{-1}^m \cdot N_G, \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала рукояти;

$\sigma_a$  – расчетное или измеренное значение амплитуды нормальных напряжений, зависит от действующих нагрузок и геометрических параметров;

$m$  – показатель наклона левой ветви кривой усталости;

$N_G$  – абсцисса точки перелома кривой усталости.

Данные расчетные формулы позволяют корректировать время межремонтных периодов для рабочего оборудования карьерных экскаваторов с учетом как условий эксплуатации каждой машины, так и влияния производственной программы на ресурс рукояти. Представленные зависимости содержат аргументы, которые характеризуют условия эксплуатации экскаватора, – напряжения, возникающие в рукояти и количество циклов нагружения в единицу времени. Величины этих параметров зависят от усилий, действующих на механизмы экскаватора. Усилия, в свою очередь, обусловлены, в частности, плотностью и крепостью разрабатываемой экскаватором горной массы.

В состав предложенных зависимостей входит переменная, учитывающая количество циклов нагружения в единицу времени и отражающая, таким образом, скорость выполнения экскаватором рабочих операций. Скорость, в свою очередь, обусловлена требуемой в соответствии с производственной программой производительностью, квалификацией персонала и другими изменяющимися факторами [7–11].

Для типового оборудования, эксплуатируемого в схожих условиях, продолжительность межремонтных периодов может быть определена опытным путем. Однако использование карьерных экскаваторов в разных горно-геологических условиях затрудняет применение статистики отказов, накопленной на предприятиях, в других условиях. В этом случае расчет ресурса производится по детерминированной математической модели [12, 27]. Случайная природа факторов (кинематических, силовых, геометрических и др.), влияющих на ресурс, как на случайную величину, при этом не учитывается [27].

Поскольку ресурс – случайная величина, для его определения необходимо помимо математического ожидания вычислять среднее квадратическое отклонение. При наличии информации об отказах задача решается методами математической статистики.

При отсутствии достоверной статистической информации для расчета числовых характеристик рукояти карьерного экскаватора возможно применение метода линеаризации функций случайных аргументов [28]. Математическое ожидание функции рассчитывается по зависимости

$$m_y = f(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}), \quad (4)$$

где  $m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_x$  – математические ожидания аргументов.

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение функции определяются по зависимостям:

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i} + 2 \sum_{i < j} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_m K_{ij}; \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_m r_{ij} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}}, \quad (6)$$

где  $\left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m = f'_i(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n})$  – производная функции по  $i$ -му аргументу;

$D_{x_i}, \sigma_{x_i}$  – дисперсия и среднее квадратическое отклонение  $i$ -го аргумента;

$K_{ij}$  – корреляционный момент  $i$ -го и  $j$ -го аргументов;

$r_{ij}$  – коэффициент корреляции  $i$ -го и  $j$ -го аргументов.

Принимая допущение о независимости аргументов друг от друга ( $K_{ij} = 0$  и  $r_{ij} = 0$ ), получаем упрощенные зависимости для определения дисперсии и среднего квадратического отклонения функции [14]

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i}; \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_m^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (8)$$

Таким образом, зависимости (1) и (2) должны быть дополнены уравнениями для определения дисперсий соответственно ресурса рукояти и числа циклов до ее разрушения:

$$D_T = \left( \frac{1}{n} \right)^2 \cdot D_{n_\sigma} + \left( -\frac{n_\sigma}{n^2} \right)^2 \cdot D_n; \quad (9)$$

$$D_{n_\sigma} = \left( \frac{m}{\sigma_{-1}} \cdot \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \right)^2 \cdot D_{\sigma_{-1}} + \left( \frac{m}{\sigma_a} \cdot \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \right)^2 \cdot D_{\sigma_a} + \left( \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_a^m} \cdot \ln \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right) \right)^2 \cdot D_m. \quad (10)$$

### Расчет ресурса рукояти экскаватора ЭКГ-5А

Для экскаваторов типа ЭКГ-5А, эксплуатирующихся в условиях ГОП ПАО «ММК», в качестве исходных данных при расчете ресурса рукояти принимаются следующие математические ожидания:

$n = 109$  ч<sup>-1</sup> (при продолжительности цикла экскавации 33 с [15]);

$\sigma_{-1} = 290$  МПа (предел выносливости стали 10ХСНД [29]);

$\sigma_a = 204$  МПа (получено тензометрическими измерениями [15]);

$m = 3,57$  (для стали 10ХСНД) [16];

$N_G = 10^5$  циклов (для стали 10ХСНД) [16].

В соответствии с зависимостями (1) и (2) математическое ожидание ресурса рукояти при таких исходных данных составляет 3218 ч.

Средние квадратические отклонения и дисперсии исходных данных и ресурса рукояти приведены в табл. 1. Нулевые значения отклонений приняты для справочных величин.

Другой способ, позволяющий определить аналогичные числовые характеристики, – метод Монте-Карло [21, 30]. Эта методика обеспечивает возможность выполнить машинный эксперимент по измерению величины наработки элемента на основе известных зависимостей для расчета ресурса. Для каждого случайного аргумента, влияющего на значение ресурса, составляется совокупность возможных значений по принятому закону распределения. Далее из каждой совокупности случайным образом выбираются значения, по которым рассчитывается ожидаемый ресурс. После многократного повторения расчета образуется выборка значений ресурса, исследуемая в дальнейшем методами математической статистики.

Для рукояти экскаватора определено математическое ожидание и дисперсия ресурса по методу Монте-Карло. Принято допущение, что каждый из аргументов имеет нормальный закон распределения. По результатам численного экс-

перимента математическое ожидание ресурса составило 3262 ч, дисперсия 7930877, а среднее квадратическое отклонение 2816 ч.

Таблица 1  
Числовые характеристики, полученные  
методом линеаризации

Параметр	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение
$n, \text{ч}^{-1}$	109	4,7	2,2
$\sigma_1, \text{МПа}$	290	0	0
$\sigma_a, \text{МПа}$	204	2025	45
$t$	3,57	0	0
$N_G, \text{циклов}$	$10^5$	0	0
$T, \text{ч}$	3218	6426327	2535

Для подтверждения адекватности полученных результатов были обработаны статистические данные о наработках до отказа рукояти экскаваторов типа ЭКГ-5 в условиях ГОП ПАО «ММК» [15]. Сравнение числовых характеристик ресурса, полученных методами линеаризации и Монте-Карло, со статистическими данными об отказах рукояти приведено в табл. 2.

Таблица 2  
Сравнение числовых характеристик ресурса,  
полученных различными методами,  
с экспериментальными данными

Метод	Математическое ожидание	Дисперсия
Линеаризация	3218	6426327
Монте-Карло	3262	7930877
Статистика отказов	3069	9195012

Сопоставление полученных результатов показывает, что расхождение среднего значения ресурса, определенное методом линеаризации функции случайных аргументов, превышает среднестатистическое значение на 4,8%. Математическое ожидание, полученное методом Монте-Карло, также несколько выше статистического значения, расхождение составляет 6,2%. Некоторое превышение расчетными значениями статистических связано с наличием в статистических данных наработок до отказов, вызванных не усталостным разрушением, а другими причинами. Например, к таким отказам относится мгновенное разрушение рукояти в результате действия нагрузки, превышающей предел прочности материала. Предлагаемые расчетные методики не учитывают отказы подобного характера.

Расхождение расчетных средних квадратических отклонений со статистическим составляет 16 и 7% соответственно для методов линеаризации и Монте-Карло. При этом среднее квадратическое отклонение, определенное по статистическим данным, превышает расчетные значения. Это также связано с наличием в статистической выборке наработок до отказов, вызванных случайными событиями, не связанными с усталостным разрушением рукояти.

### Заключение

Метод линеаризации отражает как физическую природу возникновения отказов, так и их случайный характер и является приемлемым для оценки надежности горнотранспортного оборудования. Помимо оценки показателей надежности существующего и эксплуатируемого оборудования, он может применяться на стадии проектирования, т.к. не требует проведения экспериментов. Разброс значения ожидаемого ресурса при этом получается несколько большим, чем при расчете методом Монте-Карло. Это ведет к занижению гамма-процентного ресурса (при  $\gamma < 50\%$ ), т.е. дает более осторожный прогноз, что позволяет снизить риск возникновения отказа.

Другим преимуществом метода линеаризации является возможность оценить степень влияния рассеяния каждого из аргументов на дисперсию функции. Это позволяет отказаться от учета разброса некоторых величин в случае, если их влияние на результат незначительно. В этом случае расчетная дисперсия ресурса принимает несколько меньшее значение, чем при учете дисперсий всех аргументов. При этом расхождение между методами линеаризации и Монте-Карло уменьшается.

Таким образом, представленный структурно-функциональный подход позволяет осуществлять научно обоснованную декомпозицию горного оборудования. Такая декомпозиция дает возможность группировать элементы со схожей природой возникновения отказов и рассчитывать показатели их надежности. Разработанная методика позволяет определить числовые характеристики ресурса деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Она применима как для карьерных экскаваторов, так и другого горнотранспортного оборудования, дает возможность учитывать условия его эксплуатации. Адекватность предложенных математических моделей подтверждается сходимостью результатов расчета с результатами машинного эксперимента по методу Монте-Карло и статистическими данными о наработках до отказа.

## Список литературы

1. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды Matlab / В.С. Великанов, И.Г. Усов, А.А. Абдрахманов, И.И. Усов // Горный журнал. 2017. №12. С.78–81.
2. Олизаренко В.В. Основы эксплуатации горных машин и оборудования. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2008. 188 с.
3. Оптимальное динамическое управление сроком эксплуатации горных машин. Ч.1. Модели с интервалом неограниченной продолжительности / С. Вуйч, В. Зайич, И. Милянович, А. Петровски // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. №4. С.66–74.
4. Модельные подходы к оценке жизненного цикла вспомогательных машин на примере угольного карьера в Сербии / Д.Я. Крунич, С. Вуйч, М. Танасевич, Б. Димитриевич, Т. Шубаранович, С. Илич, С.Максимович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. №3. С.51–61.
5. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин / О.Р. Панфилова, В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Макро, И.М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
6. Герике Б.Л., Герике П.Б., Козловский Г.И. Диагностика горных машин и оборудования. М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. 400 с.
7. Летова Т.И., Петинов С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку // Инженерно-строительный журнал. 2013. №3 (38). С.51–58.
8. Petinov S.V., Guchinsky R.V. Fatigue assessment of ship super-structure at expansion joint // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering. 2013. Т. 155. №A4. С. A201-A209.
9. Guchinsky R.V., Petinov S.V. Fatigue design of expansion joint in ship superstructure // Proceedings of the International Summer school-conference «Advanced problems in mechanics 2013» 2013. С. 420–431.
10. Прогнозирование усталостной долговечности металлов с учетом неоднородности микроструктуры / Р.В. Гучинский, С.В. Петинов, Ш. Сидик, М. Имран, Ф. Вальтер // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4 (231). С. 134–143.
11. Petinov S.V., Guchinsky R.V., Sidorenko V.G. The damage identity in fatigue assessment of structures // Инженерно-строительный журнал. 2016. №1 (61). С.82–88.
12. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Бергнер, Э.Д. Брауни и др. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
13. Машиностроение. Энциклопедия. Т IV-3. Надежность машин / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др. М.: Машиностроение, 2003. 592 с.
14. Халикова О.Р. Методология построения и ведения базы данных металлургического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2009. 128 с.
15. Шарипов Р.Х. Изучение влияния скорости подъема ковша на долговечность рукояти с зубчато-реечным напором (на примере ЭКГ-5А): дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2011. 131 с.
16. Ракицкий А.А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термоанализированными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения / сжатия // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2016. №4. С. 62–67.
17. Ракицкий А.А. Прогнозирование эксплуатационного ресурса конструкций мобильных машин по результатам рандомизированных стендовых испытаний // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Технические науки. 2016. №3. С.38–43.
18. Velikanov V.S., Dyrina N.V., Panfilova O.R. Stability of a mine excavator with a variable cab position // MATEC WebConf., 224 (2018) 02010. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822402010>
19. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №5 (45). С. 62–66.
20. Структурное представление многодвигательных машин для определения показателей надежности / И.М. Кутлубаев, А.Н. Макаров, И.Г. Усов, О.Р. Панфилова // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Н.Н. Огаркова. ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 83–87.
21. Электронная база данных для организации технического обслуживания и ремонта металлургического оборудования / И.М. Кутлубаев, А.Н. Макаров, И.Г. Усов, О.Р. Халикова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. №3. С.37–41.
22. Макаров А.Н., Халикова О.Р. Оценка ожидаемого ресурса подшипников с учетом случайной природы условий эксплуатации // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. №11. С.43–45.
23. Горные и строительные машины: [Электронный ресурс] / В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Макро, О.Р. Панфилова. Магнитогорск, 2018. Т. 2.
24. Макаров А.Н. Теоретические основы построения, методы расчета и конструирования манипуляционных устройств металлургического производства: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1996. 350 с.
25. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М., Усов И.Г. Основы механики многодвигательных машин. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. 194 с.
26. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. Синтез структур многодвигательных машин с кинематической связью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №1 (13). С.37–42.
27. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-1. Детали машин Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка / гл. ред. Д.Н. Решетов. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
28. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2002. 575 с.

29. Петинов С.В., Гуинский Р.В. О расчетах долговечности трубычатых конструкций (англ.) // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1 (36). С.39-47.
30. Крамаренко Т.Г. Особливості вивчення методу Монте-

Карло в теорії ймовірностей та математичній статистиці // Новые компьютерные технологии. 2016.Т 14. №1 (14). С. 28-29.

Поступила 26.11.18

Принята в печать 03.12.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-17-24>

## ANALYSIS OF THE DIPPER HANDLE DURABILITY INDICATORS

Vladimir S. Velikanov – PhD (Eng.), Associate Professor, Professor  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Olga R. Panfilova – PhD (Eng.), Associate Professor  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: halikova@inbox.ru

Igor G. Usov – PhD (Eng.), Associate Professor  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** This paper considers the issue of predicting the reliability parameters of the dipper handle. Durability – or, mean life – was taken for the main indicator of reliability. The aim of this research was to substantiate the calculated dependences that help determine the numerical characteristics of the dipper handle life by means of physical reliability theory. The authors developed formulas to calculate the average handle life on the basis of measured or calculated loads and, consequently, the stresses arising in the handle. The latter are represented by a random value, which reflects the operating conditions of mining excavators and determines the random nature of the handle life. Accordingly, it was necessary to estimate possible deviation of the service life value from the average value. To estimate the spread of the service life values, the authors proposed a method for calculating the dispersion and the mean square deviation by linearization of the random arguments function. This resulted in a method for calculating the numerical values of the dipper handle life accounting for the random nature of this parameter, as well as the changing operating conditions. The authors provide an example of calculated service life of the EKG-5A excavator handle. The measured stresses experienced by the dipper handles at the mining site of Magnitogorsk Iron and Steel Works were taken as the initial data for the calculations. The authors used similar data to carry out a numerical computer experiment following the Monte Carlo method. The numerical characteristics of the dipper handle life determined through linearization of the random arguments function and by the Monte Carlo method prove to be consistent with the respective statistics referring to the mine excavators operated by the mining site of Magnitogorsk Iron and Steel Works.

**Keywords:** Reliability, durability, life, excavator, handle, failure, stresses.

### References

1. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdurakhmanov A.A., Usov I.I. Modeling and optimization of mining machine operation modes with MATLAB. *Gornyj zhurnal* [Mining journal]. 2017, no. 12, pp. 78-81. (In Russ.)
2. Olizarenko V.V. Osnovy eksploatatsii gornykh mashin i obrudivaniya [Basic operation of mining machinery and equipment]. Magnitogorsk: NMGTU, 2008, 188 p. (In Russ.)
3. Vujich S., Zajich V., Milyanovich I., Petrovski A. Optimal dynamic management of the operating life of mining machinery. Part I. Models with an interval of unlimited duration. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and technical problems of mining]. 2010, no. 4, pp. 66-74. (In Russ.)
4. Krunich D.Ya., Vujich S., Tanasievich M., Dimitrievich B., Shubarovich T., Illich S., Maksimovich S. Simulation approaches to assessing the life cycle of auxiliary machines with the case study of a coal mine in Serbia. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and technical problems of mining]. 2018, no. 3, pp. 51-61. (In Russ.)
5. Panfilova O.R., Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Kutlubaev I.M. Service life design for the structural and functional elements of mining machines. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and technical problems of mining]. 2018, no. 2, pp. 43-51. (In Russ.)
6. Gerike B.L., Gerike P.B., Kozlovsky G.I. *Diagnostika gornyh mashin i obrudivaniya* [Diagnostics of mining machines and equipment]. Moscow: IPO "U Nikitskikh vorot", 2012, 400 p. (In Russ.)
7. Letova T.I., Petinov S.V. Assessing the fatigue life of cruciform weld joints transmitting loads. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2013, no. 3 (38), pp. 51-58. (In Russ.)
8. Petinov S.V., Guchinsky R.V. Fatigue assessment of ship superstructure at expansion joint. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*. 2013. V. 155. No. A4, pp. A201-A209.
9. Guchinsky R.V., Petinov S.V. Fatigue design of expansion joint in ship superstructure. *Proceedings of the International Summer school-conference "Advanced problems in mechanics 2013"* 2013, pp. 420-431.
10. Guchinsky R.V., Petinov S.V., Siddik Sh., Imran M., Valter F. Predicting the fatigue life of metals taking into account the microstructural heterogeneity. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saint Petersburg State Polytechnic University]. 2015, no. 4 (231), pp. 134-143. (In Russ.)

11. Petinov S.V., Guchinsky R.V., Sidorenko V.G. The damage identity in fatigue assessment of structures. *Inzhenerno-stroitelnyj zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2016, no. 1 (61), pp. 82–88.
12. Chichinadze A.V., Berliner E.M., Brauni E.D. et al. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnology)]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 576 p. (In Russ.)
13. V.V. Klyuev, V.V. Bolotin, F.R. Sosnin et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T IV-3. Nadezhnost mashin* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-3. Machine reliability]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 592 p. (In Russ.)
14. Khalikova O.R. *Metodologiya postroeniya i vedeniya bazy dannyh metallurgicheskogo oborudovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology: How to build and maintain a database of metallurgical equipment. PhD dissertation]. Magnitogorsk, 2009, 128 p.
15. Sharipov R.Kh. *Izuchenie vliyaniya skorosti podiema kovsha na dolgoechnost rukoyati s zubchato-reechnym naporom (na primere EHKG-5A): dis. ... kand. tekhn. nauk* [Understanding how the bucket lifting speed can impact the durability of the handle with a rack and pinion head (case study of the EKG-5A model): PhD dissertation]. Ekaterinburg, 2011, 131 p.
16. Rakitsky A.A. Fatigue strength of machine parts with thermal spray powder coatings under cyclic tension / compression. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Baranovichi State University. Series: Engineering sciences]. 2016, no. 4, pp. 62–67. (In Russ.)
17. Rakitsky A.A. Predicting the operational life of mobile machines based on the results of randomized bench tests. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series B: Industry. Engineering sciences]. 2016, no. 3, pp. 38–43. (In Russ.)
18. Velikanov V.S., Dyrina N.V., Panfilova O.R. Stability of a mine excavator with a variable cab position. MATEC Web Conference, 224 (2018) 02010 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822402010>
19. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 62–66.
20. Kutlubaev I.M., Makarov A.N., Usov I.G., Panfilova O.R. Structural representation of multi-engine machines for defining the reliability indicators. *Sovremennye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: Mezhdunarodnyj sb. nauch. tr. pod red. N.N. Ogarkova* [Advanced design techniques and metallurgical engineering technology: International research papers, ed. by N. N. Ogarkov]. Magnitogorsk: GOU VPO "MGTU", 2006, pp. 83–87. (In Russ.)
21. Kutlubaev I.M., Makarov A.N., Usov I.G., Khalikova O.R. Electronic database for maintenance and repair of metallurgical equipment. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Rebuilding. Revamping]. 2008, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
22. Makarov A.N., Khalikova O.R. Estimating the service life of bearings accounting for the random nature of operating conditions. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Rebuilding. Revamping]. 2008, no. 11, pp. 43–45. (In Russ.)
23. Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Panfilova O.R. *Gornye i stroiteльnye mashiny. Elektronnyj resurs* [Mining and construction machines. E-source]. State registration no. 0321802907. Magnitogorsk, 2018, volume 2. (In Russ.)
24. Makarov A.N. *Teoreticheskie osnovy postroeniya, metody rascheta i konstruirovaniya manipulacionnyh ustroystv metallurgicheskogo proizvodstva: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Design of handling machinery for metallurgical application: Theoretical basis and methods. Doctoral dissertation]. Magnitogorsk, 1996, 350 p.
25. Makarov A.N., Kutlubaev I.M., Usov I.G. *Osnovy mekhaniki mnogodvigatelnyh mashin* [Basic mechanics of multi-engine machines]. Magnitogorsk: NMGU, 2006, 194 p. (In Russ.)
26. Makarov A.N., Kutlubaev I.M. Synthesized structure of multi-engine machines with kinematics of the key functional elements. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 1 (13), pp. 37–42. (In Russ.)
27. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-1. Detali mashin. Konstruktionsnaya prochnost. Trenie, iznos, smazka* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-1. Machine parts. Structural strength. Friction, wear, lubrication]. Editor-in-chief: D.N. Reshetov. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 864 p. (In Russ.)
28. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostej: ucheb. dlya vuzov* [Probability theory: Textbook for university students]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 575 p. (In Russ.)
29. Petinov S.V., Guchinsky R.V. On calculating the durability of tubular structures (eng). *Inzhenerno-stroitelnyj zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2013, no. 1 (36), pp. 39–47.
30. Kramarenko T.G. Understanding the Monte Carlo method in application to probability theory and mathematical statistics. *Novye kompyuternye tekhnologii* [New computer technologies]. 2016, vol. 14, no. 1 (14), pp. 28–29.

Received 26/11/18  
Accepted 03/12/18

#### Образец для цитирования

Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукояти карьера экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 13–20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20>

#### For citation

Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G. Analysis of the dipper handle durability. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13–20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20>