



УДК 621.926.52

О.В. Бестужева
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет»
г. Белгород, Российская Федерация
E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru
Дата поступления 07.12.2019

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ ОПОРНЫХ ЦАПФ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА

Аннотация

В статье рассмотрена эксплуатационная надежность крупногабаритного оборудования промышленности строительных материалов – шаровой мельницы, которая характеризуется параметрами долговечности: средний и гамма-процентный остаточный ресурс. Определен выходной контролируемый параметр при оценке остаточного ресурса с его предельным критическим значением. Получены статистические данные замеров диаметров загрузочной и разгрузочной цапф шаровой мельницы, произведена их предварительная обработка: оценена величина дисперсии измеряемого параметра технического состояния и ее однородность. Определен остаточный ресурс опорных цапф шаровой мельницы, согласно порядку прогнозирования остаточного ресурса при линейном законе изменения параметра технического состояния. Произведен сравнительный анализ статистических и практических данных остаточного ресурса опорной цапфы шаровой мельницы с рассчитанным значением остаточного ресурса по примененной методике прогнозирования. Подтверждена правомерность применения методики прогнозирования для определения остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы.

Ключевые слова: методика прогнозирования, остаточный ресурс, шаровые мельницы, опорные цапфы, долговечность, деформация, отклонение от номинального диаметра, параметр технического состояния.

Введение

При производстве строительных материалов в различных отраслях промышленности для измельчения твердых материалов применяют шаровые мельницы [1]. При производстве цемента помольное оборудование является основным звеном технологической линии [2]. Значительное динамическое воздействие нагрузки на мельницу приводит к потере работоспособности, что способствует длительным простоям в ремонте. Повышение производительности оборудования достигается либо заменой его более производительным, либо увеличением надежности существующего [3].

Согласно ГОСТ 27.003–2016 [4], эксплуатационная надежность объекта непре-

рывного длительного применения с возможностью восстановления и обслуживания, которым и является шаровая мельница, характеризуется показателями долговечности. Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта, согласно ГОСТ 27.002–2015 [5].

Согласно таблице Б.2 ГОСТ 27.003–2016 [4], показателем долговечности для объекта, переход которого в предельное состояние при применении по назначению может привести к последствиям, с основным процессом, определяющим переход в предельное состояние – изнашивание и старение одновременно, являются средний и гамма-процентный (гарантированный) оста-

точный ресурс и средний, и гамма-процентный (гарантированный) срок службы. Для оценки долговечности от выбранного начала отсчета до наступления предельного состояния оборудования применяют средний и гамма-процентный (гарантированный) остаточный ресурс.

Остаточный ресурс – это суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния, при этом средний ресурс – математическое ожидание ресурса, гарантированный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах, согласно ГОСТ 27.002–2015 [5].

Основы расчета

Прогнозирование остаточного ресурса оборудования осуществляется на основе РД 26.260.004–91 «Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации» [6].

Для подтверждения правомерности применения статистической методики прогнозирования остаточного ресурса, согласно РД 26.260.004–91 [6], требуется проведение ряда экспериментальных исследований, проведенных на физическом объекте.

Выходным контролируемым параметром при оценке остаточного ресурса цапфы шаровой мельницы являются деформации внешней поверхности – величина отклонения от номинального диаметра внешней поверхности цапфы Δ , мм.

Измерения проводились на ЗАО «Белгородский цемент» холдинга «ЕВРОЦЕМЕНТ ГРУП». На заводе были исследованы загрузочная и разгрузочная цапфы цементной мельницы № 13 типоразмером $\varnothing 3,2 \times 15$ м, эксплуатируемая с 2012 года после капитального ремонта. Периодичность измерений выходных параметров проводилась следующим образом: t – в данный момент (2014 год), $t+0,5$ – через полгода, $t+1$ – через год. Оценка величины отклонения проводилась по 6 сечениям цапфы, указанным на рисунке 1 [7].

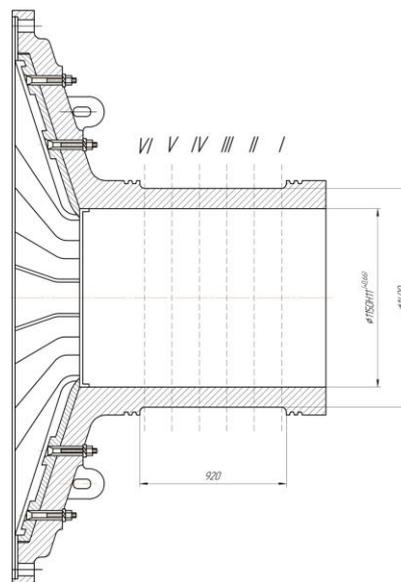


Рисунок 1. Схема расположения участков для расчета напряжения на поверхности цапфы

Для оценки остаточного ресурса цапфы шаровой мельницы по деформациям внешней поверхности – величине отклонения от номинального диаметра внешней поверхности, требуется определить их предельное значение. Для деформаций условием прочности является критерий многоциклового усталости – предельный размах полных деформаций ε_a , определяемый по формуле [8]:

$$\varepsilon_a = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} + \frac{2\sigma_{-1}}{E} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right), \quad (1)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения материала; σ_{-1} – предел при изгибе; E – модуль упругости; σ_m – среднее напряжение.

Исходные данные для определения предельного размаха полных деформаций для опорных цапф шаровой мельницы, выполненных из распространенного материала – из стали 35Л:

- относительное сужение поперечного сечения материала $\psi = 0,23$;
- предел при изгибе $\sigma_{-1} = 200$ МПа;
- модуль упругости;
- σ_m – среднее напряжение $\sigma_m = 0,5\sigma_B = 245,5$ МПа.

Тогда подставляя значения в (1):

$$\varepsilon_a = 4,48 \text{ мм.} \quad (2)$$

Результаты измерений величины отклонения от номинального диаметра внешней поверхности по длине цапф показаны в таблице 1. Как видно из таблицы 1, максимальные значения деформаций достигают в VI сечении, при этом во времени эти значения возрастают.

Оценка остаточного ресурса цапфы шаровой мельницы по изменению выходных параметров производится в соответствии с [6]. Измерение выходных параметров в соответствии с [9] должно прово-

диться в процессе эксплуатации или ремонта. Цель технического диагностирования шаровой мельницы - определение вида технического состояния оборудования, прогнозирование технического состояния шаровой мельницы, поиск отказа или неисправности оборудования, поддержка установленного уровня надежности с обеспечением требований безопасности и эффективности использования изделий.

Таблица 1

Результаты измерений величины отклонения от номинального диаметра внешней поверхности цапфы

Сечение	Загрузочная цапфа			Разгрузочная цапфа		
	Начало испытаний $t = 0$	Продолжение испытаний $t + 0,5$ лет	Окончание испытаний $t + 1$ лет	Начало испытаний $t = 0$	Продолжение испытаний $t + 0,5$ лет	Окончание испытаний $t + 1$ лет
I	0,81	1,05	1,19	1,21	1,35	1,35
II	1,78	2,11	2,32	2,10	2,32	2,60
III	2,37	3,17	3,45	2,75	3,52	4,36
IV	3,21	4,23	4,58	3,71	4,72	5,76
V	4,08	5,29	5,71	4,51	5,92	7,23
VI	5,14	6,35	6,84	5,89	7,12	8,35

На основе вышесказанного, подготовлены статистические данные замеров диаметров загрузочной и разгрузочной цапф шаровой мельницы в 6 точках через одинаковый промежуток времени [10].

Результатом эксплуатационного наблюдения параметров технического состояния цапфы шаровой мельницы является график измерений с отмеченным предельно допустимым уровнем значения параметра, согласно выражению (2), по данным таблицы 1 (рисунок 2).

На рисунке 2 представлены аппроксимированные графики зависимости отклонения от номинального диаметра внешней поверхности цапфы загрузочной и разгрузочной цапфы по сечениям I – VI в разные периоды времени:

- $t = 0$ – начало измерений;
- $t + 0,5$ – продолжение измерений через полгода;
- $t + 1$ – окончание измерений через год;

Как видно из рисунка 2, превышение допустимого значения деформаций наблюдается как на загрузочной, так и разгрузочной цапфе во все периоды времени, при

этом значительные превышения деформаций наблюдаются в сечениях V – VI.

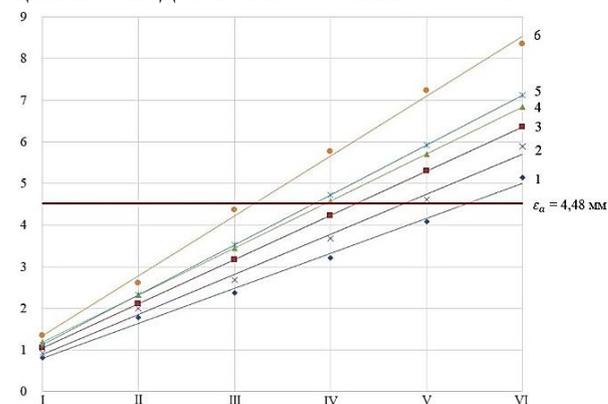


Рисунок 2. Схема изменения параметра технического состояния – деформаций внешней поверхности загрузочной и разгрузочной цапфы в разные моменты времени по сечениям I – VI:

- 1 – Загрузочная цапфа в момент времени $t = 0$;
- 2 – Загрузочная цапфа в момент времени $t + 0,5$, лет;
- 3 – Загрузочная цапфа в момент времени $t + 1$, лет;
- 4 – Разгрузочная цапфа в момент времени $t = 0$;
- 5 – Разгрузочная цапфа в момент времени $t + 0,5$, лет;
- 6 – Разгрузочная цапфа в момент времени $t + 1$, лет

Согласно [6], требуется качественная оценка результатов измерений, нанесенных на график, представленный на рисунке 2:

- отсутствие перегибов графика и колебаний значений деформаций свидетельствует о стабильной скорости изменения параметра технического состояния;
- положительное приращение параметра технического состояния – деформаций, указывает на монотонно возрастающий характер графика;
- стационарность процесса изменения деформаций указывает о линейной зависимости параметра технического состояния.

Следующим этапом прогнозирования остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы является предварительная обработка полученных статистических данных (таблица 1), заключающаяся в оценке величины дисперсии измеряемого параметра технического состояния и их однородности [11].

Для определения средней скорости изменения отклонения воспользуемся формулой [12]:

$$W = \frac{\Delta Y_i}{N \cdot \Delta t_i}, \quad (3)$$

где ΔY_i – среднее значение приращения параметра технического состояния за интервал наработки Δt_i ; N – число интервалов наблюдений.

Среднее квадратическое отклонение скорости изменения отклонения определяется по формуле [12]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta t_i} - W \right)^2}{N-1}}. \quad (4)$$

Коэффициент вариации скорости изменения отклонения в соответствии с [12]:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{Y}}, \quad (5)$$

где \bar{Y} – среднее арифметическое значение параметра технического состояния в выборке.

Значение средней скорости изменения параметра, среднего квадратического отклонения скорости и коэффициента вариации скорости изменения величины отклонения от номинального диаметра внешней поверхности цапфы по выборкам представлены в таблице 2.

Для проверки однородности дисперсии применяется критерий Кохрена, так как выборки имеют одинаковый объем. Статистика критерия Кохрена рассчитывается как:

$$G = \frac{\sigma_{max}^2}{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}. \quad (6)$$

Табличное значение этого критерия для уровня значимости $\gamma = 0,05$, при числе степеней свободы для каждой из дисперсий $m = 6$ и числе сравниваемых дисперсий $k = 2$, $G_{0,05;6;3} = 0,853$ [6].

Таблица 2

Предварительная обработка статистических данных

Характеристики	Загрузочная цапфа			Разгрузочная цапфа		
	Начало испытаний t=0	Продолжение испытаний t+0,5 лет	Окончание испытаний t+1 лет	Начало испытаний t=0	Продолжение испытаний t+0,5 лет	Окончание испытаний t+1 лет
\bar{Y} , мм	2,90	3,70	4,02	3,36	3,77	4,94
ΔY_i , мм	0,87	1,06	1,13	0,99	1,20	1,40
Δt_i , лет	4,5					
W	0,048111	0,117778	0,047083	0,055222	0,133333	0,058333
σ	0,028867	0,023556	0,040806	0,033133	0,026667	0,050556
V	0,00996	0,006366	0,010163	0,010051	0,006472	0,010232

Значение статистики критерия Кохрена, в соответствии с уравнением (6), составит:

$$G = \frac{0,050556^2}{0,028867^2 + 0,023556^2 + 0,0040806^2 + 0,033133^2 + 0,026667^2} = 0,525663.$$

Так как при значении доверительной вероятности $P = 0,95: G < G_{\alpha;m;n}$, отклонения дисперсии можно признать несущественными, следовательно, все дисперсии однородны, то данные показания можно использовать для дальнейших расчетов при определении остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы.

Статистический анализ эксплуатационных параметров дает дополнительные возможности для выявления причин низкой надежности оборудования и разработки эффективных мер по их устранению: стабилизации наиболее влияющих параметров, созданию повышенных запасов до предельного состояния по этим параметрам и др.

Математическое описание процесса изменения параметра технического состояния основано на аппроксимации каждой реализации данного процесса случайной функцией [12]. Средний остаточный ресурс вычисляют на основе информации об изменении параметра ее технического состояния и о наработке к моменту контроля [13].

Для определения остаточного ресурса с заданной вероятностью безотказной работы и оптимального остаточного ресурса используют уравнения, куда входит условная вероятность отказа, являющаяся функцией условного распределения остаточного ресурса [11].

Необходимую точность оценки данный метод обеспечивает в том случае, если изменение параметра технического состояния к моменту контроля составляет не менее половины предельного отклонения параметра [14]. При выполнении данного условия погрешность такого метода прогнозирования не превышает 8 – 9%.

Поскольку показатель технического состояния цапфы шаровой мельницы монотонно изменяется во времени, а дисперсия показателей не изменяется, для прогнозирования остаточного ресурса использован метод, изложенный в ГОСТ 23942-80 [4]. Теоретической основой рассматриваемого метода является оценка соответствующих показателей на базе общеизвестного метода наименьших квадратов.

Порядок оценки остаточного ресурса при линейном законе изменения параметра, согласно РД 26.260.004-91 [15]:

1. Проведение N измерений $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ контролируемого параметра в определенные моменты времени t_i .

2. Вычисление суммарных величин наработки:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N Y_i; Y_2 = \sum_{i=1}^N t_i Y_i; \quad (7)$$

$$X_1 = \sum_{i=1}^N t_i; X_2 = \sum_{i=1}^N t_i^2; \quad (8)$$

3. Вычисление случайных величин: так как периодичность измерений на всех заводах одинакова, то значения вычисляются общие:

$$D = N \sum_{i=1}^N t_i^2 - (\sum_{i=1}^N t_i)^2; \quad (9)$$

$$D_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{D}; \quad (10)$$

$$D_{12} = D_{21} = -\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{D}; \quad (11)$$

$$D_{22} = \frac{N}{D}. \quad (12)$$

4. Вычисление точечной оценки коэффициентов линейного закона:

$$C_1 = Y_1 \cdot D_{11} + Y_2 D_{21}; \quad (13)$$

$$C_2 = Y_1 \cdot D_{12} + Y_2 D_{22}. \quad (14)$$

5. Определение оценки среднего квадратического отклонения контролируемого параметра:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - C_1 - C_2 t_i)^2}{N-2}}. \quad (15)$$

6. Определение среднего квадратического отклонения коэффициентов C_1 и C_2 :

$$\sigma_1 = \sigma \sqrt{D_{11}}; \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \sigma \sqrt{D_{22}}. \quad (17)$$

7. Вычисление гарантированной оценки коэффициентов:

$$C_{1,2j} = C_j + K \cdot \sigma_j (j = 1; 2), \quad (18)$$

где (+) – так как возрастающий параметр при доверительной вероятности $\gamma = 0,95: K = 1,282$.

8. Вычисление среднего ожидаемого остаточного ресурса:

$$T_{cp} = \frac{(Y_n - C_{11})}{C_2} - t_k, \quad (19)$$

где Y_n – предельное значение контролируемого параметра; t_k – наработка на момент последнего контроля.

9. Определение гарантированного остаточного ресурса:

$$T_\gamma = \frac{(Y_n - C_{11})}{C_{22}} - t_k \quad (20)$$

Согласно порядку прогнозирования остаточного ресурса (7) – (20), рассчитаны значения среднего ожидаемого ресурса и гарантированного остаточного ресурса по исследуемым цапфам цементной мельницы типоразмером $\varnothing 3,2 \times 15$ м ЗАО «Белгородский цемент» (таблица 3).

Так как разгрузочная цапфа имеет больший износ, чем загрузочная, соответственно остаточный ресурс получается меньшим. Принимается меньшее значение остаточного ресурса шаровой мельницы:

- среднего ресурса $T_{\text{ср}} = 4,34$ года;
- гарантированного ресурса $T_{\gamma} = 4,15$ года.

Исследование технического состояния цапфы шаровой мельницы позволяет получить по значениям выходных параметров рекомендации для дальнейшей ее эксплуатации и ремонта. Решение данной задачи дает возможность определить рациональные и предпочтительные значения остаточного ресурса.

Выходным параметром для определения технического состояния оборудования является остаточный ресурс цапфы шаровой мельницы. В качестве фактора, определяющего воздействие на функции отклика выходных параметров: деформаций – отклонение от номинального диаметра цапфы [13].

Таблица 3
Результаты расчета остаточного ресурса цапф шаровой мельницы № 13 с типоразмером $\varnothing 3,2 \times 15$ м по данным ЗАО «Белгородский цемент»

Параметр	Мельница $\varnothing 3,2 \times 15$ м № 13	
	Загрузочная цапфа	Разгрузочная цапфа
Y_1	66,60	63,48
Y_2	171,31	159,60
X_1	33,00	33,00
X_2	365,00	365,00
C_1	-0,63	-0,58
C_2	0,16	0,14
σ	4,64	4,43
σ_1	0,36	0,34
σ_2	0,27	0,25
C_{11}	-1,22	-1,01
C_{22}	0,60	0,56
$T_{\text{ср}}$	4,65	4,34
T_{γ}	4,39	4,15

На основании экспериментальных данных (таблица 1), с помощью программы *Excel*, найдены аппроксимирующие уравнения различного вида с определением величины достоверности аппроксимации (таблица 4) [16]. Как видно из таблицы 4, наибольшая величина достоверности аппроксимации имеет полиномиальная функция.

Таблица 4

Уравнения аппроксимации остаточного ресурса

Вид функции	Уравнение аппроксимации $y(x)$	Величина достоверности аппроксимации R^2
Экспоненциальная	$T = 3,493e^{0,036\varepsilon}$	$R^2 = 0,966$
Линейная	$T = 0,147\varepsilon + 3,462$	$R^2 = 0,973$
Логарифмическая	$T = 0,491\ln(\varepsilon) + 3,460$	$R^2 = 0,937$
Полиномиальная	$T = -0,006\varepsilon^2 + 0,205\varepsilon + 3,366$	$R^2 = 0,981$
Степенная	$T = 3,486\varepsilon^{0,122}$	$R^2 = 0,950$

Таким образом, аппроксимирующее уравнение, характеризующее зависимость остаточного ресурса от отклонения от номинального диаметра цапфы будет иметь следующий вид:

$$T = -0,006\varepsilon^2 + 0,205\varepsilon + 3,366. \quad (21)$$

На рисунке 3 представлен график зависимости остаточного ресурса от отклонения от номинального диаметра (21): при увеличении деформаций внешней поверх-

ности – отклонения от номинального диаметра, остаточный ресурс цапфы шаровой мельницы сокращается.

Проверка статистической значимости полученных коэффициентов уравнения аппроксимации включает в себя расчет дисперсии воспроизводимости (ошибка опыта S_y), расчет остаточной суммы квадратов ($S_{\text{ост}}$) и числа степеней свободы ($f_{\text{ад}}$), дисперсии адекватности ($S_{\text{ад}}$), проверка адек-

ватности уравнения аппроксимации по критерию Фишера при уровне значимости 5% (таблица 5) [17].

Для расчета дисперсии воспроизводимости опыта воспользуемся формулой [16]:

$$S^2(y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (T - \bar{T})^2. \quad (22)$$

Следовательно, дисперсия воспроизводимости функций:

$$S^2(T) = 0,11805.$$

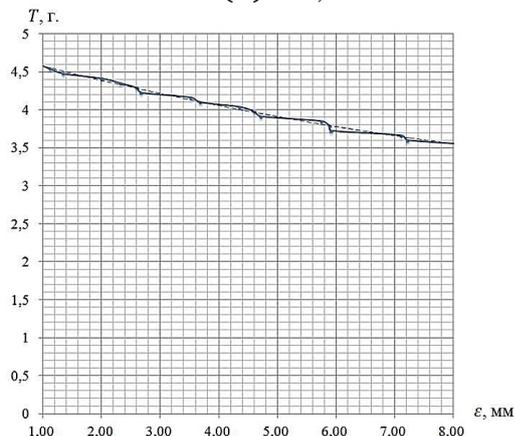


Рисунок 3. Аппроксимирующая функция зависимости остаточного ресурса от деформаций

Для нахождения остаточной дисперсии или дисперсии адекватности воспользуемся формулой [18]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i^2}{f}, \quad (23)$$

где ΔT_i^2 – остаточная сумма квадратов (таблица 5); f – число степеней свободы, которая выражается разностью между числом опытов и числом коэффициентов.

Дисперсия адекватности аппроксимирующей модели составляет:

$$S_{ад}^2(T) = 0,13379.$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели воспользуемся критерием Фишера, который определяется формулой [19]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2(y)}. \quad (24)$$

Отсюда находим расчетное значение критерия Фишера: $F(T) = 1,13$; сравнивая его с табличным значением при 5%-ном уровне значимости $F_{табл.} = 2,78$ [14], получаем:

$$F_{расч} < F_{табл.} \quad (25)$$

Так как рассчитанное значение критерия Фишера не превышает табличного, с доверительной вероятностью 5% модель можно считать адекватной.

Таблица 5

Расчет дисперсии функции

№ п/п	Значения функции отклика и дисперсии функции	
	T, г.	$(T - \bar{T})^2$
1	3,549522	0,281453816
2	3,588074	0,242034689
3	3,631815	0,200909067
4	3,752	0,107612742
5	3,809306	0,073299179
6	3,85844	0,049108249
7	3,872306	0,043155164
8	4,013258	0,004460398
9	4,039146	0,001672664
10	4,145742	0,004316305
11	4,183537	0,010710923
12	4,19993	0,014372602
13	4,347734	0,071658251
14	4,365297	0,08136961
15	4,369322	0,083681639
16	4,521434	0,194824946
17	4,534513	0,20654188
18	4,659415	0,335670975
	$\bar{T}=4,08$	$\sum_{i=1}^{18} (T - \bar{T})^2 = 2,00685$

Рассчитанный гарантированный остаточный ресурс по выходному параметру – отклонения от номинального диаметра цапфы шаровой мельницы, согласно РД 26.260.004–91 [6], равен $T_\gamma = 4,15$ лет.

Согласно документации на ремонтные работы, предоставленной ЗАО «Белгородский цемент», капитальный ремонт цементной мельницы № 13 типоразмером $\varnothing 3,2 \times 15$ м с обработкой цапфы произведен в феврале 2016 года. Предыдущий ремонт с обработкой цапфы задокументирован графиком капитального ремонта от 5 декабря 2011 года. Отсюда следует, что остаточный ресурс по практическим данным составляет $T_\gamma = 4,42$ лет.

Расхождение значений остаточного ресурса рассчитанного по методике прогнозирования остаточного ресурса, согласно РД 26.260.004–91 [6], и практическими данными составляет 7%, что подтверждает правомерность применения методики для определения остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы.

Заключение

Проведенные исследования позволяют заключить следующее:

- установлено, что эксплуатационная надежность оборудования характеризуется параметрами долговечности – средний и гамма-процентный (гарантированный) остаточный ресурс;
- определен выходной контролируемый параметр при оценке остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы – величина отклонения от номинального диаметра внешней поверхности цапфы;
- установлено условие прочности для деформаций – предельный размах полных деформаций, критическое значение которого составляет $\varepsilon_a = 4,48$ мм;
- подготовлены статистические данные замеров диаметров загрузочной и разгрузочной цапф шаровой мельницы в 6 точках через одинаковый промежуток и проведено эксплуатационное наблюдение параметров технического состояния цапфы шаровой мельницы;
- произведена предварительная обработка и однородность полученных статистических, оценена величина дисперсий измеряемого параметра технического состояния с применением критерия Кохрена;
- определен остаточный ресурс опорных цапф шаровой мельницы, согласно порядку прогнозирования остаточного ресурса при линейном законе изменения параметра: средний ресурс – $T_{cp} = 4,34$ года; гарантированный ресурс – $T_\gamma = 4,15$ года;
- построено уравнение аппроксимации по изменению выходного параметра, характеризующее зависимость остаточного ресурса от отклонения от номинального диаметра цапф, которое имеет вид полиномиальной функции с доверительной вероятностью в $R^2 = 0,981$; проведена оценка адекватности уравнения аппроксимации по критерию Фишера при уровне значимости 5%.

- произведен сравнительный анализ статистических и практических данных: остаточный ресурс опорной цапфы цементной мельницы типоразмером $\varnothing 3,2 \times 15$ м ЗАО «Белгородский цемент» по практическим данным составляет $T_\gamma = 4,42$ лет, расхождение с рассчитанным значением остаточного ресурса по статистическим данным, согласно методике прогнозирования, составляет 7%;
- подтверждена правомерность применения методики прогнозирования для определения остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы.

Библиографический список

1. Боганов А.И. Механическое оборудование цементных заводов. – М.: Машгиз, 1961. – 384 с.
2. Еремин, Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. – М.: Высшая школа, 1986. – 280 с.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требования по надежности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с. – 48
5. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с. - 47
6. РД 26.260.004–91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. – М., 1992. – 28 с. - 97
7. Маркова О.В. Исследование вибраций в системах вращающихся крупногабаритных мельничных агрегатов / О.В. Маркова, М.А. Федоренко // Наука и технологии: шаг в будущее: Сборник статей международной научно-практической конференции. – Чехия, 2014. – С. 12 – 14.
8. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

9. ГОСТ 27518–87 Диагностирование изделий. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2009. – 7 с. – 49
10. Бестужева О.В. Определение показателей долговечности элементов механических систем // Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Оренбург, 2018. – С. 13 – 15.
11. Бестужева О.В. Планирование эксперимента при моделировании прочностной надежности // Приднепровский научный вестник, Т. 6, № 4, 2018. – С. 14 – 16.
12. Дмитренко А.Г., Блинов А.В., Волков Д.В., Волков В.С. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов – Пенза: Изд-во Пенз. Гос. Ун-та, 2013. 62 с.– 55
13. Ерицков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента: учебное пособие. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
14. Плескунин В.И. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте. – Ленинград: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1979. – 232 с. – 84
15. РД 50–690–89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – М., 1989. – 35 с. – 99
16. Мухачёв В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. — 118 с. – 87
17. Хартман К. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 552 с. – 118
18. Красовский Г.И. Планирование эксперимента. – Минск.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с. – 73
19. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента – М.: Наука, 1976. – 223 с.

Information about the paper in English

O.V. Bestuzheva

Belgorod State National Research University
Belgorod, the Russian Federation
E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru

Received 07.12.2019

APPLYING A METHOD OF FORECASTING THE REMAINING OPERATING LIFE TO ASSESS THE LIFE TIME OF BALL MILL SUPPORTING TRUNNIONS SUBJECT TO CHANGES IN OUTPUT PARAMETERS

Abstract

The paper describes service reliability of large-size equipment used in the industry of construction materials, namely ball mills which are characterized by life time parameters: average and gamma-percentile remaining operating life. An output-controlled parameter used to assess the remaining operating life and its limit critical value was determined. Statistical data of measured feed and discharge trunnion diameters were obtained and tentatively processed: a dispersion value of the measured technical state parameter and its homogeneity were assessed. The remaining operating life of ball mill supporting trunnions was determined according to a procedure of forecasting the remaining operating life in view of the linear law of changes in the technical state parameter. The author compared statistical and practical data of the remaining operating life of ball mill supporting trunnions and the remaining operating life calculated by the applied method of forecasting. The method of forecasting applied to determine the remaining operating life of ball mill trunnions was justified.

Keywords: method of forecasting, remaining operating life, ball mills, supporting trunnions, life time, deformation, deviation from a nominal diameter, technical state parameter.
