

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

В.Ф. МОНАСТЫРСКИЙ, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины им Н.С. Полякова),

В.С. ВОРОНЦОВ

(Россия, Мирный, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛЬНИЦ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Полнота раскрытия ценного компонента на обогатительных фабриках в значительной мере зависит от стабильности характеристик технического состояния применяемого оборудования. В то же время тяжелые условия эксплуатации оборудования рудоподготовки приводят к ухудшению этих характеристик. Так, существенное влияние на техническое состояние мельниц мокрого самоизмельчения (ММС) оказывают входные факторы: крупность руды, суммарное содержание крупных кусков в общем объеме, абразивность, прочность, хрупкость пород, которые, комплексно воздействуя на элементы ММС, подвергают их износу, вибрации и, как результат, постепенному выходу из строя лифтов, разгрузочных решеток, подшипников и др.

Непостоянство технического состояния ММС приводит к изменению ее выходных параметров, к которым относятся удельная производительность, удельные затраты электроэнергии на одну тонну измельченного материала и размер кусков на выходе из ММС. Для определения влияния показателей технического состояния на значения выходных параметров применяются методы системного анализа и имитационного моделирования [1, 2], а также надежности и диагностики [3, 4].

Целью статьи является определение закономерностей изменения выходных параметров ММС по моделям надежности и диагностики ее технического состояния.

Задачей исследований является обоснование моделей технического состояния ММС по данным эксплуатации и диагностики.

Изложение основного материала

При определении взаимосвязи между техническим состоянием ММС и выходными параметрами очень важно правильно выбрать модель функционирования ММС. Известные модели приведены в [5, 6]. Однако они не всегда адекватны реальным условиям эксплуатации мельниц.

В промышленных условиях техническое состояние ММС наиболее часто отображается показателями надежности и вибродиагностики, а именно:

- вероятность отказа;
- вероятность безотказной работы;
- коэффициент готовности;
- уровень виброускорения (пик-фактор);

Підготовчі процеси збагачення

– уровень вибрации.

Для обоснования моделей технического состояния ММС по показателям надежности на фабрике № 3 автоматизированной системой сбора информации в течение 72 месяцев были собраны данные эксплуатации. Общее число отказов узлов и механизмов ММС за указанное время составило для ММС 70*2,3, №1 – 1440, в том числе по причине аварийных отказов (ТХ) – 1332; ММС 70*2,3, №2 – 1008, в том числе по причине аварийных отказов (ТХ) – 924; ММС 70*2,3, №3 – 1656, в том числе по причине аварийных отказов (ТХ) – 1488.

Установлено, что суммарные наработки каждой из ММС в течение года отличаются друг от друга не более, чем на 10% (рис. 1), что указывает на принадлежность выборок одной генеральной совокупности, для которой техническое состояние ММС должно отображаться практически однотипными моделями функционирования. Результаты анализа и математической обработки выборок представлены в таблице 1 и на рисунках 2,3. По критериям Пирсона, Колмогорова, Мизеса, характеризующих согласие экспериментальных и теоретических зависимостей, наиболее вероятным является экспоненциальный закон распределения случайной величины и в меньшей степени – закон Вейбулла. Однако оценки параметров последнего ($\eta = 0,85-0,95$) и наличие внезапных отказов указывают на близость законов экспоненциального и Вейбулла [7].

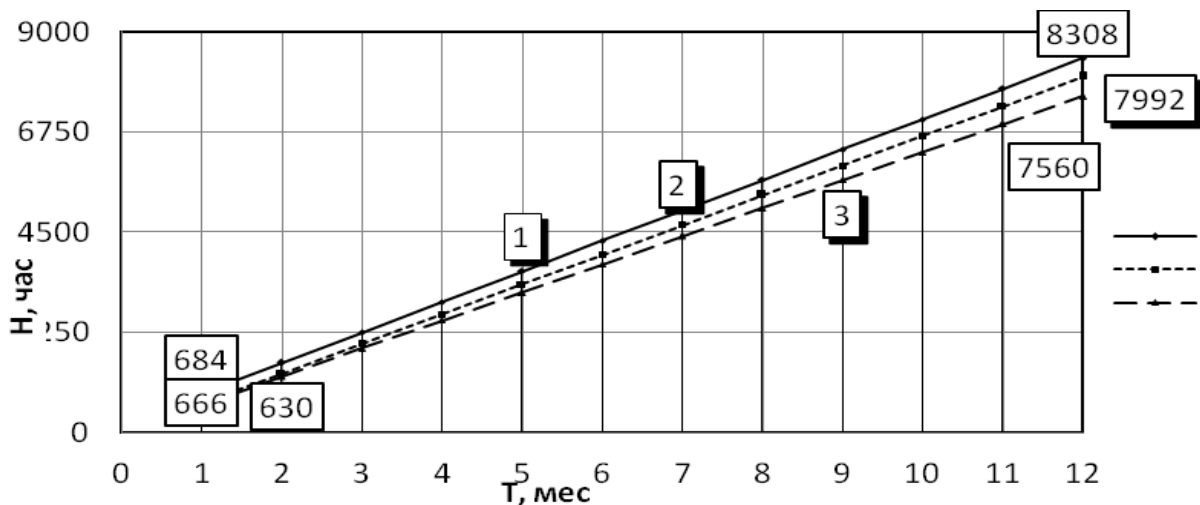


Рис. 1. Зависимость суммарной наработки ММС от времени (в течение года):
1, 2, 3 соответственно для ММС 70*2,3 №1, №2, №3

При экспоненциальном законе распределения случайной величины наработки на отказ модели технического состояния ММС будут иметь следующий вид: вероятность отказов: $P_{om}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$; вероятность безотказной работы: $P_{без}(t) = e^{-\lambda t}$; коэффициент готовности: $K_g = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$, где λ , μ – интенсивность отказов и восстановления элементов ММС; t – время работы.

Результаты обработки выборок наработки (восстановления)
на отказ (числитель – наработка, знаменатель – восстановление)

Наименование предприятия	Объекты наблюдений	Номер выборки	Наиболее вероятные законы	Значения критериев согласия			Значения оценок параметров закона, мин ⁻¹
				Пирсона	Колмогорова	Мизеса	
Мирнинский ГОК фабрика №3	ММС 70*2,3 №1	1	экспоненц.	0,58..0,65	0,78..0,85	0,45..0,52	$\lambda_1 = 5,0 * 10^{-4}$ $\mu_1 = 0,9 * 10^{-2}$
			экспоненц	0,68..0,75	0,75..0,86	0,55..0,63	
	ММС 70*2,3 №2	2	Вейбула	0,56..0,61	0,72..0,79	0,52..0,59	$\sigma_B = 5600 \text{ мин}, \eta = 0,85$ $\mu_2 = 0,75 * 10^{-2}, 1/\text{мин}$
			экспоненц.	0,56..0,62	0,89..0,94	0,48..0,51	
	ММС 70*2,3 №2	3	экспоненц.	0,65..0,88	0,97..1,60	0,68..0,75	$\lambda_2 = 0,75 * 10^{-2}, 1/\text{мин}$ $\mu_2 = 0,75 * 10^{-2}, 1/\text{мин}$
экспоненц.			0,43..0,52	0,61..0,65	0,48..0,52		
ММС 70*2,3 №3	4	Вейбула	0,51..0,57	0,68..0,72	0,32..0,38	$m = 5600 \text{ мин}, \eta = 0,95$ $\mu_3 = 0,69 * 10^{-2}, 1/\text{мин}$	
		экспоненц.	0,48..0,55	0,75..0,85	0,38..0,43		
ММС 70*2,3 №3	5	экспоненц.	0,82..0,90	0,99..1,0	0,64..0,75	$\lambda_3 = 5,6 * 10^{-4}, 1/\text{ми}$ $\mu_3 = 0,69 * 10^{-2}, 1/\text{мин}$	
		экспоненц.	0,71..0,75	0,81..0,85	0,70..0,73		

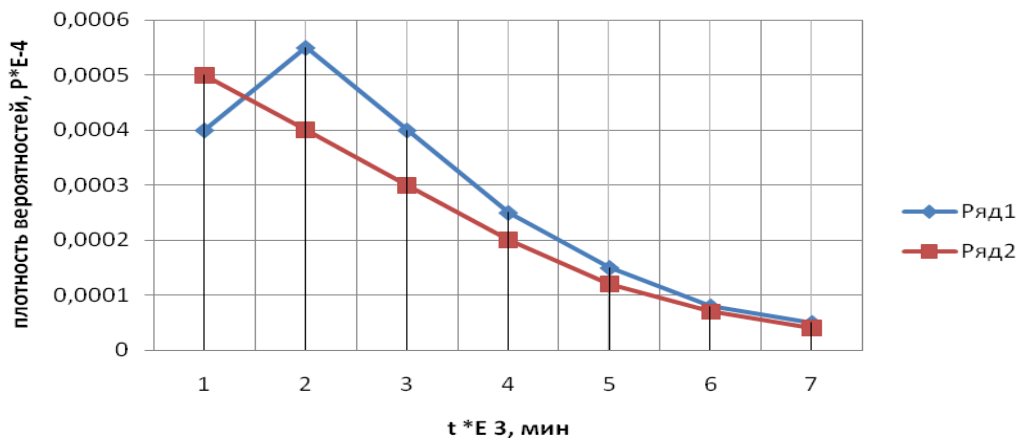


Рис. 2. Наиболее вероятные законы распределения случайной величины наработки на отказ, где ряд 1 – закон Вейбулла; ряд 2 – экспоненциальный закон

Учитывая характер изменения вышеуказанных моделей при предельных значениях $\lambda, \mu (0, \infty)$, техническое состояние восстанавливаемой системы, какой является ММС, достаточно полно отображается коэффициентом готовности, определяемым с учетом интенсивностей отказов λ и их восстановления μ .

Техническое состояние ММС и прогнозирование отказов ее узлов может быть отображено также моделями вибродиагностики: уровнем виброускорения (пик-фактор) и уровнем вибрации [4]. Ниже проанализированы результаты промышленной вибродиагностики подшипников привода мельниц фабрики №3 (рис. 4 а, б; 5 а, б; 6 а, б).

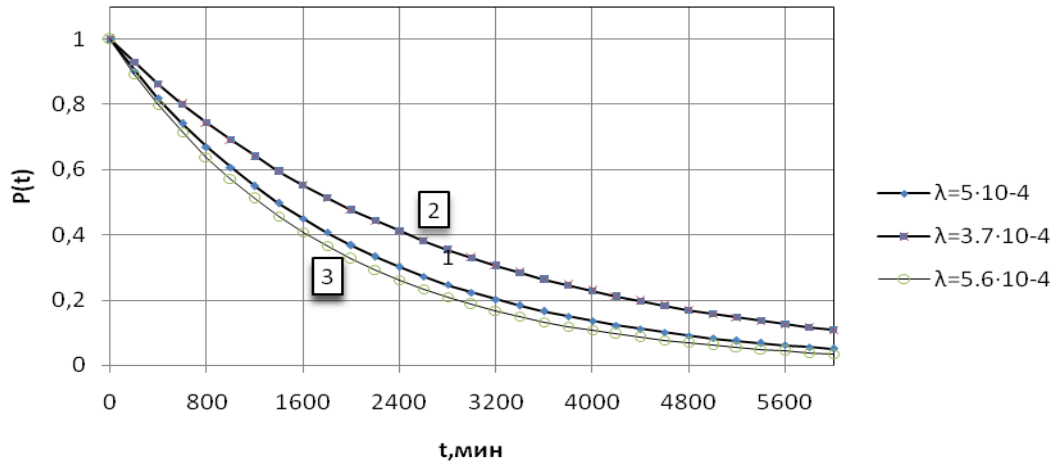


Рис. 3. Закономерности изменения вероятности безотказной работы

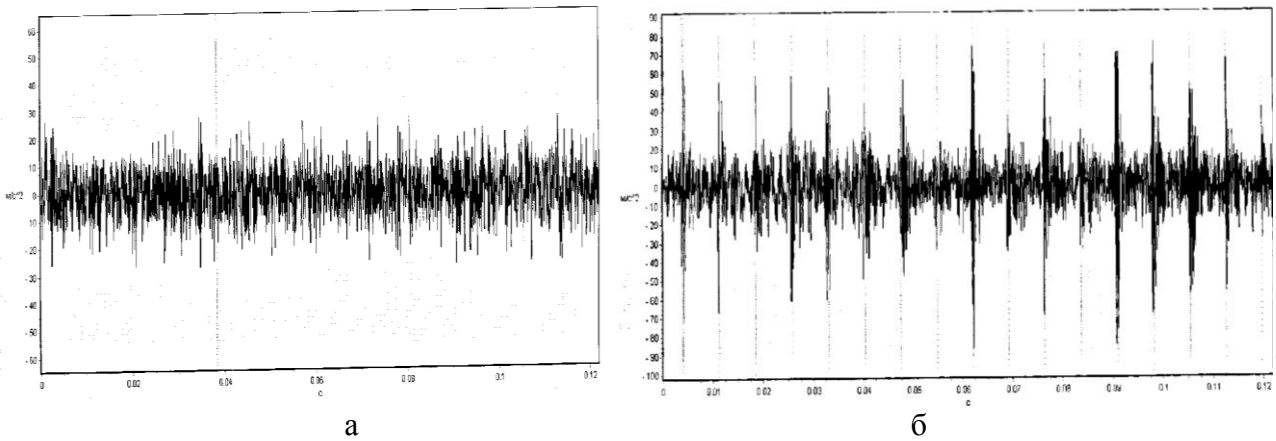


Рис. 4. Осциллограммы виброускорения подшипника качения ММС 70-2,3, №1 (а) и ММС 70-2,3, №3 (б)

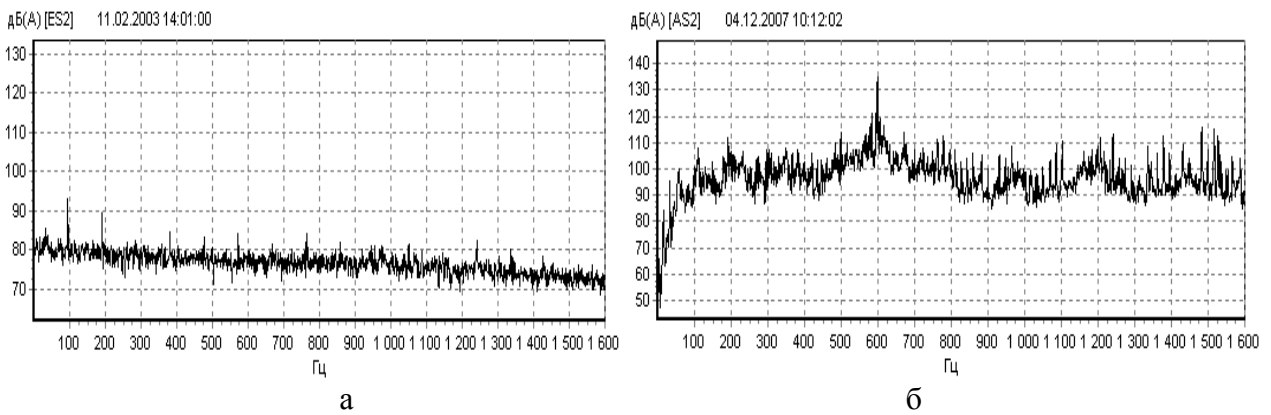


Рис. 5. Спектры огибающей (а) и мощности виброускорения (б) дефектного подшипника, ММС 70*2,3, №3, частотный диапазон 1600 Гц

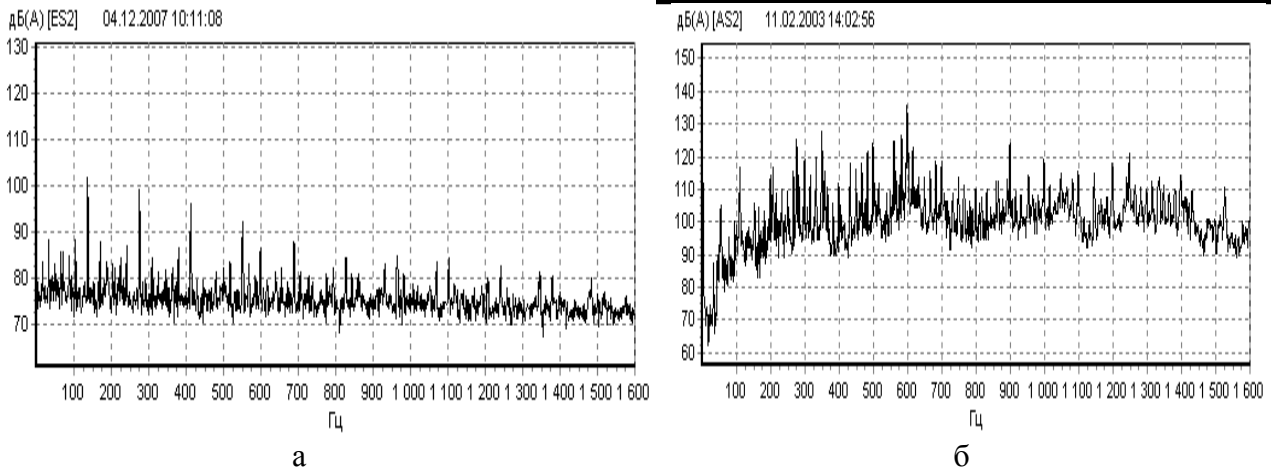


Рис. 6. Спектры огибающей дефектного подшипника ММС 70*2,3, №1, частотный диапазон 1600 Гц

Значения пик-фактора определялись как отношение максимальных амплитуд к среднеквадратическому значению (СКЗ) виброускорения. Более высокие значения пик-фактора (таблица 2) при сравнении их с допустимыми свидетельствуют о наличии дефектов у подшипниковых узлов, рост которых со временем может привести к отказу ММС. Реализация на рисунке 4б отличается от реализации на рисунке 4а наличием импульсов с более высокой амплитудой виброускорения (в 1,5-2 раза), что указывает на различие в динамике процессов и импульсный характер возбуждения. Значения пик-фактора от 3,26 (рисунок 4 а) увеличиваются до 5,9 (рисунок 4 б), так как амплитуды колебаний виброускорения возрастают значительно быстрее, чем СКЗ виброускорения.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные реализаций вибрации

Статистические параметры реализации	Рис. 1	Рис. 2
Максимум	27,4 м/с ²	75,9 м/с ²
Минимум	-27,4 м/с ²	-86,1 м/с ²
Среднее (X_i)	0,0429 м/с ²	0,0105 м/с ²
Среднеквадратическое отклонение	8,42 м/с ²	14,7 м/с ²
Средне выпрямленное Abs (X_i)	6,7 м/с ²	10,3 м/с ²
Пик-фактор	3,26	5,9
Коэффициент асимметрии	0	0
Экссесс	3	8

Определение зарождающегося дефекта в исследуемых подшипниках выполнялось также по уровню вибрации. При этом на спектрах огибающей и мощности виброускорения на частотах, кратных основным определялись амплитуды колебаний. Из рисунка 5 а, видно, что на спектре огибающей наблюдаются гармонические колебания, гармониками которых являются частоты 95, 190, 285, 381, 477, 572 Гц, кратные основной частоте 95 Гц перекачивания тел качения по наружному кольцу. Это позволяет сделать заключение о возникновении в местах перекачивания тел качения по наружному кольцу подшипника периодических

Підготовчі процеси збагачення

ударных импульсов из-за дефекта поверхности перекатывания. Выявленный дефект хорошо виден на спектрах мощности виброускорения (рисунок 5 б), на которых амплитуды колебаний имеют ярко выраженные пики на частотах 95, 190, 285, 381, 477, 572 Гц.

На рисунках 6 а и б приведен более сложный случай повреждения подшипника. Одновременно на спектрах указанных рисунков наблюдаются ударные импульсы от двух дефектов. В первом случае ударные импульсы возникают на частотах 104,6; 209,2; 313,8; 418,4; 523,0; 627,6 Гц (кратные 104,6 Гц), а во втором случае – 136,74; 273,34; 410,32; 546,75; 683,72; 820,36 Гц (кратные 136,74 Гц), а их амплитуды в 1,5...3,0 раза превышают допустимые, что указывает на наличие дефектов в наружном и внутреннем кольцах подшипника.

Ревизия подшипников подтвердила результаты вибродиагностики, так как был обнаружен значительный износ наружного кольца и раковины на внутреннем кольце подшипников. Следовательно, модели надежности и вибродиагностики отображают техническое состояние ММС в заданных условиях эксплуатации и могут быть использованы в качестве информативных параметров для прогнозирования потоков отказов элементов ММС.

Взаимосвязь между техническим состоянием ММС и значениями выходных параметров (удельной производительностью, затратами энергии на одну тонну измельченного материала и средневзвешенным диаметром частиц измельченного материала) определялась теоретически и экспериментально в промышленных условиях фабрики №3.

При выполнении теоретических исследований рассматривалась задача истечения пульпы через цилиндрические отверстия разгрузочных решеток ММС при длительной безотказной ее эксплуатации (установившейся режим). Мельница загружается рудой, крупность которой соответствует размерам барабана. В барабане руда измельчается до размера отверстий разгрузочных решеток и разгружается через них под действием сил гравитации и центробежных, а также тангенциальной составляющей силы тяжести материала, направленной в сторону решеток. Этим силам сопротивляются силы трения в слоях жидкости (вязкость), сопротивления (статическое и динамическое) и сжатия струи пульпы при прохождении через отверстие. При установившемся режиме работы ММС происходит обмен энергией между барабаном и рудой, имеющей отрицательную температуру на поверхности. Переносчиком энергии от нагретого барабана к руде в этом случае является вода. С повышением температуры пульпы уменьшается ее вязкость и повышается подвижность частиц диаметром менее отверстий разгрузочных решеток, увеличивается скорость протекания жидкости между частицами из-за снижения касательных напряжений, гидродинамических сопротивлений и стесненности движения частиц при входе в отверстия решеток.

В этом случае при определении расхода пульпы через отверстия разгрузочных решеток можно применить основное положение гидравлики для истечения жидкости через цилиндрическую насадку [8]:

$$Q = \mu S_{oms} V_1,$$

где $\mu=0,51$ – коэффициент расхода; S_{oms} – площадь отверстия; $V_1 = \varphi \sqrt{2gH}$ – скорость движения пульпы перед разгрузочными отверстиями решеток, значение которой определилось из уравнения Бернулли для свободной поверхности жидкости и сечения потока перед отверстиями решеток, H – высота заполнения барабана, φ – коэффициент скорости [6].

Скорость пульпы на выходе из отверстий решеток определилось из уравнения Бернулли для стесненного движения пульпы:

$$\frac{P_a}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} + H_1 + Z = \frac{P_a}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + H_2 + \frac{V_2^2 D}{2gd}.$$

Решая полученное уравнение относительно V_2 , получим:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gd(\alpha\varphi H + Z)}{\alpha d + D}},$$

где P_a – давление на поверхности пульпы; γ – плотность пульпы; α – коэффициент снижения скорости пульпы из-за местных потерь; $H_1=H_2$ – высота пульпы в барабане соответственно до и после разгрузочной решетки; $Z=P_1/F_m \gamma$ – напор материала на разгрузочную решетку от тангенциальной составляющей силы тяжести материала P_1 , F_m – площадь поверхности решеток, на которую действует сила P_1 , D, d – соответственно диаметр цилиндрической насадки и средне-взвешенный диаметр частицы на выходе из ММС; α – коэффициент снижения скорости пульпы из-за местных потерь.

Следовательно, для стесненного движения частиц производительность ММС определится из выражения:

$$Q_p = 3600\mu S_{раб} K_3 V_2,$$

где $S_{раб}$ – суммарная площадь рабочих отверстий разгрузочных решеток; K_3 – коэффициент, учитывающий количество неработоспособных отверстий в разгрузочных решетках.

При остановке ММС процесс теплопереноса от барабана к руде прекращается и руда, которая контактирует с водой, охлаждает ее, повышая вязкость пульпы. Подвижность отдельных частиц уменьшается, снижается величина тангенциальной составляющей силы тяжести материала; увеличиваются касательные напряжения и силы сопротивления, а производительность ММС изменяется от Q_p до нуля (рисунок 7 а.) Чем выше значения вязкости пульпы, тем продолжительнее происходит процесс ее разогрева, характеризующийся пониженной производительностью при вводе мельницы в режим нормальной экс-

Підготовчі процеси збагачення

плуатации. Техническое состояние ММС в этом случае учитывается уточненным коэффициентом готовности:

$$K_{гy} = \frac{T_q}{T_q + T_a + \sum_{i=1}^n \alpha_i (t_{pi} + t_{paz_i} + t_{di})},$$

где T_q – чистое время работы ММС с производительностью Q_p ; T_a – простои мельниц из-за аварийных отказов; $n=1,2,3\dots$ – количество отказов ММС в заданное время; $\alpha=(Q_p - Q_{эkv})/Q_p$ – коэффициент, учитывающий потери производительности за время достижения ее значений от нуля до Q_p , t_{pi} , t_{paz_i} , t_{di} – соответственно согласно диаграмме (рисунок 7а) время запуска ММС в работу, разогрева пульпы, достижения производительности установившегося режима работы Q_p , $Q_{эkv}$ – среднестатистическая производительность за время переходных процессов .

Эксплуатационная производительность ММС определится из выражения:

$$Q_э = Q_p K_{гy}.$$

Если вынужденные простои ММС продолжительные, то вязкость пульпы повышается еще более, частицы материала теряют подвижность и становятся центрами кристаллизации, а пульпа переходит в состояние жидкость-твердое. При длительном охлаждении пульпы наблюдаются дополнительные потери производительности из-за обледенения кромок отверстий, уменьшения их проходного сечения в решетках и закрупления смерзающихся частиц материала.

Экспериментальные исследования выполнялись в условиях фабрики №3.

Методикой экспериментальных исследований предусматривалось для заданного времени по потоку отказов с учетом поправок на продолжительные простои определить значения коэффициента готовности $K_{гy}$ и измерить соответствующие им выходные параметры. Вынужденные простои ММС фиксировались на протяжении года и для каждого календарного месяца определялись значения коэффициента готовности по данным эксплуатации и диагностики с учетом потерь времени на режимы работы с пониженной производительностью. При определении средневзвешенного диаметра частиц измельченного материала использовалась отраслевая методика. Опробование производилось при различных режимах работы ММС и простоях для восстановления отказов. Потребление энергии ММС теоретически определялось с привлечением регрессионных зависимостей [9], экспериментально – при помощи системы "Энергетик", а удельные затраты – как отношение суммарных затрат энергии к производительности на заданном периоде эксплуатации. Производительность ММС фиксировалась при помощи объемного датчика на протяжении года и для каждого календарного месяца рассчитывались ее потери от аварийных простоев и переходных режимов с учетом $K_{гy}$,

Підготовчі процеси збагачення

На рисунках 7 а,б,в,г представлені результати обробки даних промислових випробувань ММС, аналіз яких показав наступне:

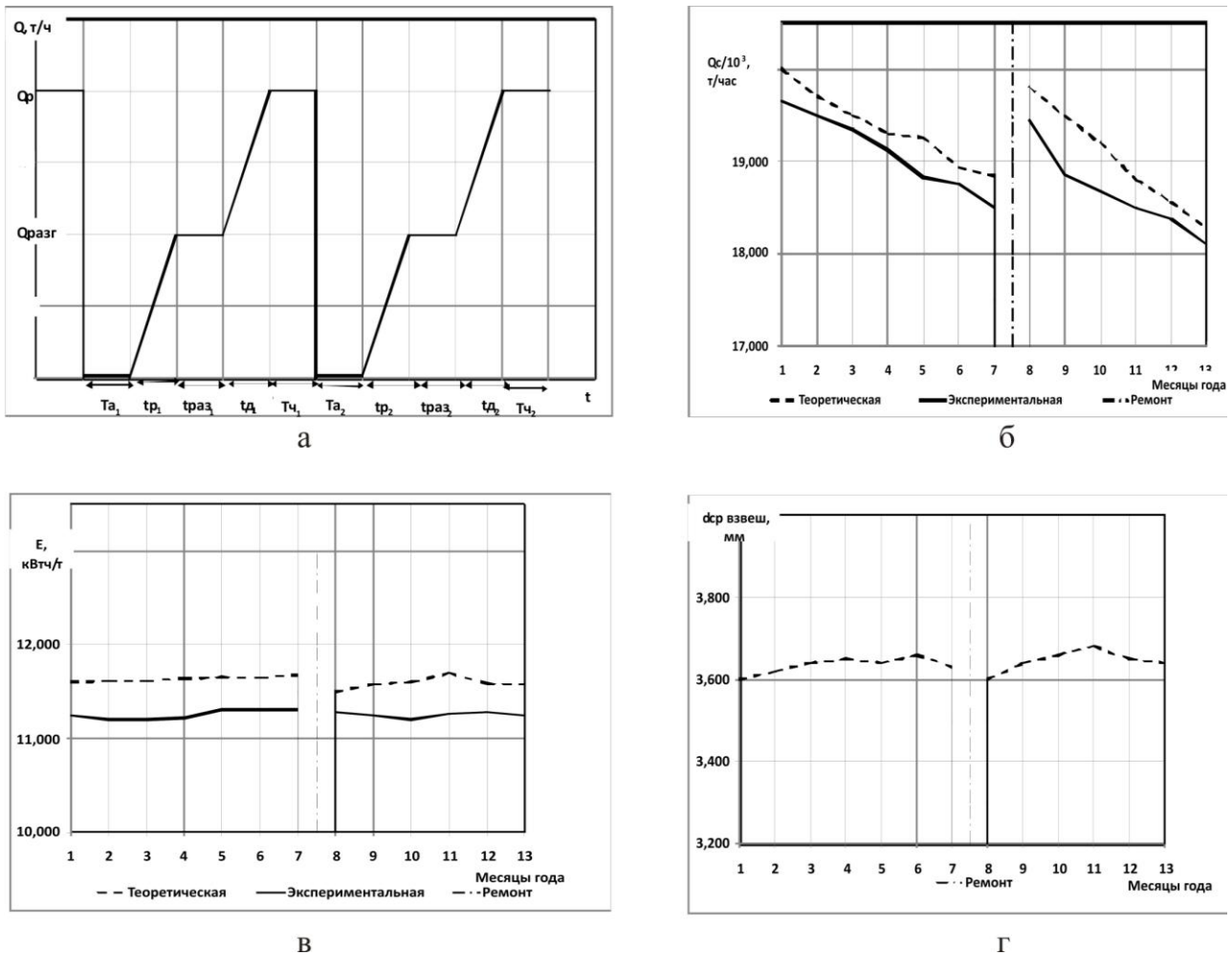


Рис. 7. Взаимосвязь технического состояния ММС и выходных ее параметров, где (а) – диаграмма изменения производительности после аварийного простоя; зависимости производительности (б), затрат энергии на одну тонну измельченного материала (в), средневзвешенного диаметра измельченного материала (г) от K_{cy} , значение которого принимались по данным эксплуатации для каждого месяца года соответственно:

1,0; 0,98; 0,97; 0,96; 0,96; 0,94; 0,93, плановый ремонт, 0,99; 0,97; 0,95; 0,93; 0,92; 0,90

Анализ промышленных испытаний ММС показал следующее:

1. Значения K_{cy} для каждого месяца года (рисунок 7), определяющие техническое состояние ММС в периоды между плановыми ремонтами, снижаются до допустимых пределов 0,90;

2. Удельная производительность ММС в течение переходного режима ее работы изменяется от нуля до Q_p ступенчато (рисунок 7а) и время достижения производительности установившегося режима существенно зависит от продолжительности простоя (охлаждения) и разогрева мельницы.

3. Периодичность возникновения процессов охлаждения ММС зависит от интенсивности отказов ее узлов и механизмов, а снижение производительности

Підготовчі процеси збагачення

от простоев, необходимых для выполнения аварийных ремонтов, и времени восстановления нормального режима эксплуатации мельниц.

4. Значения производительности в фиксированные моменты времени изменяются в пределах от 20000 до 18000 т/ч и пропорциональны значениям K_{2y} , а кривые, описывающие взаимосвязь между ними (рисунок 7б) представляют собой монотонно убывающую функцию.

5. Затраты энергии на одну тонну измельченного материала в фиксированные моменты времени зависят от отношения суммарных затрат энергии к производительности и изменяются в пределах от 11,6 до 11,8 кВт·ч/т, а кривые, описывающие взаимосвязь между ними (рисунок 7 в) представляют собой возрастающую функцию, так как снижение производительности ММС происходит значительно быстрее, чем потери энергии.

6. Экспериментальные кривые (рисунки 7 б, в) коррелируют с теоретическими и по абсолютным значениям отличаются между собой не более чем на 5%.

7. Экспериментальные данные по определению средневзвешенного диаметра частиц в фиксированные моменты времени текущего года показывают что их значения возрастают от 3,60 до 3,73 мм из-за износа отверстий разгрузочных решеток, а после продолжительных ремонтов – снижаются до 3,48 мм из-за повышения вязкости пульпы, обледенения кромок отверстий, смерзания частиц и уменьшения тангенциальной составляющей силы тяжести материала, направленной на разгрузочные решетки.

Список литературы

1. Комплексный подход к решению проблемы самоизмельчения кимберлитов // Горная промышленность. – 2001. – №3. – С. 35-37.
2. Рыжков П.А. Математическая статистика в горном деле. – М.: Высшая школа, 1983. – 286 с.
3. Методика выбора показателей надежности и качества горных машин для их адаптации к условиям предприятий АК "АЛРОСА" // Горная промышленность / В.Ф. Монастырский, В.С. Воронцов, В.Ю. Максютенко и др.– 2011. – №12. – С. 61-67.
4. Ширман А.П., Соловьев А.Б. Проектная вибродиагностика и мониторинг технического состояния механического оборудования. – М.: Библиогр, 1996. – 276 с.
5. Потураев В.Н., Сокур В.И. Мельницы самоизмельчения. – К.: Наукова думка, 1991. – 195 с.
6. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Пилов П.И. Измельчение, энергетика и технология. – М.: Руда и металлы, 2007. – 291 с.
7. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 579 с.
8. Латышенков А.М. Основы гидравлики. – Ленинград: Гидрометеорологическое из-во, 1971. – 334 с.
9. Савицкий Л.В. Разработка многокритериального метода выбора рациональных схем рудоподготовки и обогащения алмазосодержащих кимберлитов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2010. – 17 с.

© Пилов П.И., Монастырский В.Ф., Воронцов В.С., 2011

Надійшла до редколегії 29.11.2011 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.М. Младецьким