

УДК 622.73:519.718:519.22

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ И ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Геворгян Эрмине Михайловна,
hermine79@rambler.ru

Капанский филиал «Национального политехнического университета Армении»,
Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.

Актуальность работы обусловлена необходимостью идентифицировать законы распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления оборудования технологической системы измельчения руды (ТСИР), используемые при построении компьютерной модели для оценки и анализа эффективности ее функционирования с учетом надежности оборудования.

Цель работы: идентификация законов распределения времени работы между соседними отказами, времени восстановления и оценки эксплуатационной надежности измельчительного оборудования на основании статистических данных об отказах и восстановлениях отказавшего оборудования ТСИР Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Методы исследования: теория надежности, методы прикладной статистики, методы моделирования.

Результаты. Обоснована необходимость идентификации законов распределения вероятностей времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования по экспериментальным данным. Проведен сбор статистических данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования ТСИР ЗММК за трехлетний период их эксплуатации. С использованием непараметрических критериев Вилкоксона и Крускала–Уоллиса проверены гипотезы об однородности статистических выборок для однотипного оборудования. На основании статистических данных, с применением критерия согласия Пирсона выявлены и математически описаны функции плотности распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования. При этом на основании построенных гистограмм времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования автор выдвигает гипотезы о законах их распределения, рассматривая в качестве гипотетических законов распределения экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение и распределение Релея. Идентифицированные законы распределения необходимы для построения компьютерной модели ТСИР, позволяющей исследовать влияние показателей надежности измельчительного оборудования на эффективность ее функционирования. Определены оценки параметров выявленных функций распределения, среднего времени работы между отказами, среднего времени восстановления и построены их доверительные границы. Определены также оценки основных количественных показателей надежности измельчительного оборудования – коэффициентов их готовности.

Ключевые слова:

Измельчение руды, отказ, восстановление, гистограмма, критерий Пирсона, готовность.

Введение

Измельчение руды является важнейшим технологическим процессом рудоподготовки, непосредственно предшествующим процессу флотации руды и в значительной мере предопределяющим его эффективность [1–3]. Как показывает практический опыт эксплуатации обогащительных фабрик, эффективность флотации заметно снижается в результате ухудшения выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования [4–8]. В связи с этим вопросы исследования и обеспечения эксплуатационной надежности функционирования измельчительного оборудования и ТСИР приобретают особую важность.

Наиболее удобным, а нередко единственно возможным методом исследования надежности и эффективности функционирования сложных технологических систем, в том числе и ТСИР, является компьютерное (имитационное) моделирование [9–13]. Используемая при этом имитационная модель представляет собой композицию из трех моделей [8–9]. Одна из них воспроизводит процесс возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования ТСИР, вторая имитирует процесс

ее функционирования под воздействием указанного процесса, а третья служит для формирования значений условного показателя эффективности. Очевидно, что для построения первой из указанных моделей необходимо иметь функции распределения $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_v)$ времени работы между соседними отказами (τ_p) и времени восстановления (τ_v) отказавшего оборудования ТСИР.

Знание указанных функций распределения позволит также прогнозировать отказы оборудования, оценить их эксплуатационную надежность, определить оптимальные количества запасных частей, правильно организовать профилактическое обслуживание и ремонт отказавшего оборудования.

Постановка задачи

В настоящее время отсутствуют работы, посвященные идентификации функций распределения вероятностей $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_v)$ измельчительного оборудования [4–6]. В технических документациях оборудования информация относительно указанных функций распределения также отсутствует. Поэтому для их выявления необходимо использовать метод пассивного эксперимента, который

предполагает сбор и обработку статистических данных, полученных при эксплуатации оборудования.

Целью настоящей работы является выявление и математическое описание (идентификация) законов распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования путем обработки статистических данных об их надежности, полученных при эксплуатации ТСИР ЗММК.

Технологическая система измельчения руды ЗММК состоит из 21 мельницы шарового измельчения, 3 мельниц самоизмельчения, 6 двуспиральных классификаторов типа 2КСН-2,4, 10 односпиральных классификаторов типа КСН-2,0, 11 блоков гидроциклонов $\varnothing 750$ мм, 12 восьмидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40, 10-двенадцатидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50, 24 систем смазки. Цикл шарового измельчения включает одну шаровую мельницу 1-й стадии типа МШР-3200 \times 3100, 2 шаровые мельницы 2-й стадии типа МШР-3200 \times 3100 стандартного размера и 18 удлиненных шаровых мельниц типа МШР-3200 \times 3800. Шаровые мельницы работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 1:1 и 2:1. Цикл самоизмельчения руды включает 3 мельницы самоизмельчения типа ММС 70-73, работающие по схеме сопряжения 1:1 с шаровыми мельницами.

Все мельницы 1-й стадии работают с замкнутом циклом со спиральными классификатором, то есть пески классификаторов возвращаются в мельницы 1-й стадии как циркулирующая нагрузка. Слив классификаторов и разгрузка мельниц 2-й стадии объединяются и поступают в зумпфы грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения.

Шаровые мельницы 2-й стадии работают по замкнутой схеме с грунтовым насосом и батареей гидроциклонов, причем некоторые мельницы 2-й стадии измельчения одновременно подпитываются рудой из бункеров дробленой руды, что позволяет им при отказе или ремонте мельниц 1-й стадии работать в одностадийном режиме (1:0).

В измельчительных комплексах (ИК), работающих по схеме сопряжения 2:1, установлены грунтовые 12-дюймовые насосы, зарезервированные методом замещения 8-дюймовыми насосами, обеспечивающими работу ИК по схеме сопряжения 1:1 при отказе основного насоса. В ИК, работающих по схеме сопряжения 1:1, установлены грунтовые 8-дюймовые насосы, зарезервированные однотипными насосами методом замещения.

Сбор статистической информации о надежности измельчительного оборудования

С целью выявления функций $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_v)$ для элементов системы измельчения совместно с сотрудниками ЗММК в течение трех лет был проведен сбор статистической информации об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования.

С целью рациональной организации сбора статистических данных в ТСИР были выделены следующие группы однотипных элементов, работающих в одинаковых режимах и условиях эксплуатации:

- 1) мельницы 1-й стадии типа МШР-3200 \times 3800;
- 2) мельницы 2-й стадии типа МШР-3200 \times 3800;
- 3) мельница 1-й стадии типа МШР-3200 \times 3100;
- 4) мельницы 2-й стадии типа МШР-3200 \times 3100;
- 5) двуспиральные классификаторы типа 2КСН-2,4;
- 6) системы смазки мельниц;
- 7) грунтовые насосы типа ГраК 350/40;
- 8) грунтовые насосы типа ГраК 1600/50;
- 9) мельницы самоизмельчения типа ММС-70-23;
- 10) односпиральные классификаторы типа КСН-2,0;
- 11) блоки гидроциклонов;
- 12) питатели;
- 13) транспортеры.

Сбор статистических данных продолжался до регистрации 100 отказов для групп наиболее надежных элементов. Выбор указанного объема наблюдений основывался на том, что после $n=100$ точность оценки параметров распределений увеличивается незначительно [14–17]. Собранный статистический материал подвергался предварительному анализу и систематизации, в результате чего из исходного материала были исключены явно ошибочные данные, данные об отказах, вызванных отказами других систем и нарушением правил эксплуатации. Заметим, что суммарное число отказов элементов каждой из последних трех групп элементов за три года их работы составило, соответственно, 10, 8 и 12, что недостаточно не только для выявления функций распределения, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок.

Обработка статистической информации о надежности измельчительного оборудования

С целью объединения статистических данных однотипных элементов была проведена проверка отдельных выборок на однородность. При этом были использованы непараметрические критерии Вилкоксона [14, 16] (при двух выборках) и Крускала–Уоллиса [15] (при числе выборок больше двух). Гипотезы об однородности выборок для всех групп элементов были приняты при общем уровне значимости $\alpha=0,05$.

Для проверки согласия эмпирических и теоретических распределений, то есть гипотезы о соответствии эмпирического распределения предполагаемому теоретическому распределению $F(x)$, использовался критерий χ^2 Пирсона [14–23], который особенно мощен при больших выборках ($n \geq 100$). Критерий применим для любых видов функции $F(x)$, даже при неизвестных значениях их параметров, в чем заключается его универсальность. Использование критерия χ^2 предусматривает разбиение размаха $[x_{\min}, x_{\max}]$ варьирования выборки на интервалы длиной $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/l$ и определение числа наблюдений m_j для каждого из l интервалов. Для удобства оценок параметров распре-

деления интервалы выбирают одинаковой длины. Число интервалов зависит от объема выборки. В [14, 17, 20–23] предложены несколько формул («формула Стерджесса» и др.) для определения числа интервалов. На практике обычно принимают: $l=10\ldots15$ (при $n=100$), $l=15\ldots20$ (при $l=200$). Интервалы, содержащие менее пяти наблюдений, объединяют с соседними.

Статистикой критерия Пирсона служит величина

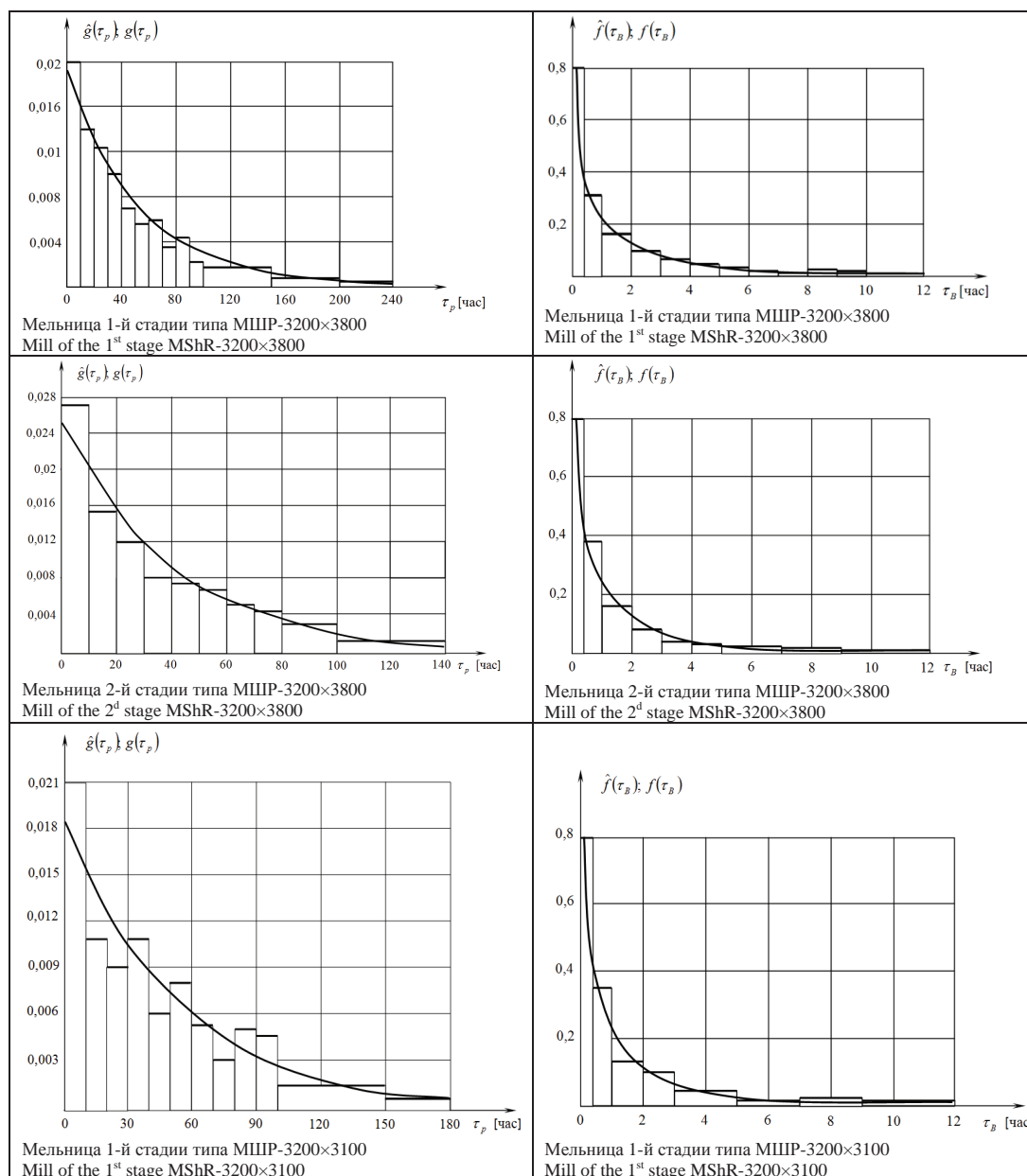
$$\chi^2 = \sum_{j=1}^l \frac{(m_j - np_j)^2}{np_j}, \quad (1)$$

где p_j – вероятность попадания исследуемой случайной величины в j -й интервал, вычисляемая в соответствии с гипотетическим законом распределением $F(x)$.

Нулевую гипотезу о соответствии выборочного распределения теоретическому закону $F(x)$ проверяют путем сравнения вычисленной по формуле (1) величины с критическим значением (квантиля) $\chi^2_{k,\alpha}$, найденным из таблицы квантилей распределения χ^2 для уровня значимости α и числа степеней свободы $k=l-r-1$. Здесь l – число интервалов после объединения; r – число параметров, оцениваемых

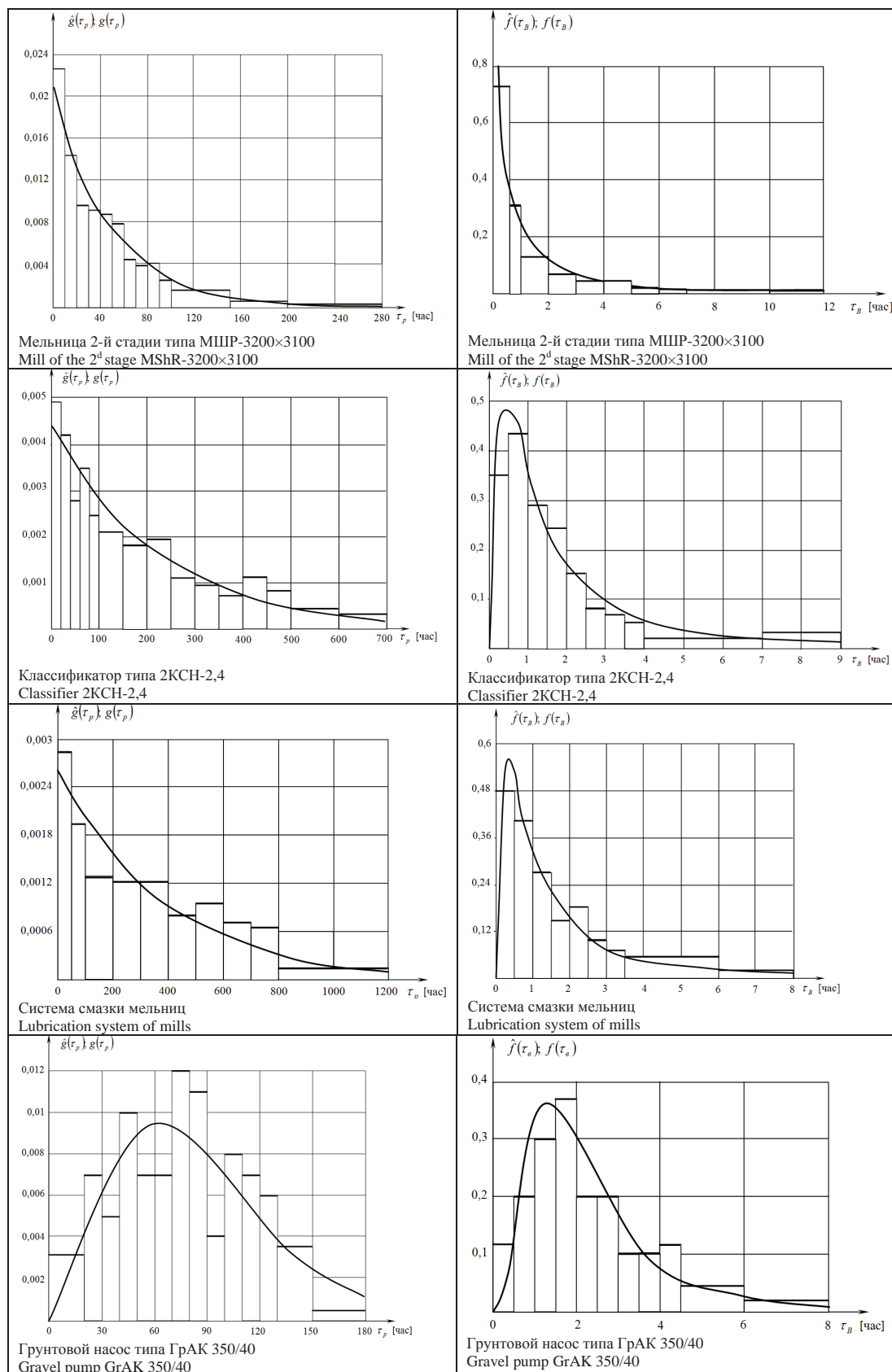
Таблица 1. Гистограммы $g(\tau_p), f(\tau_p)$ и графики теоретических функций плотности распределения времени работы $g(\tau_p)$ и времени восстановления $f(\tau_p)$ измельчительного оборудования

Table 1. Histograms $g(\tau_p), f(\tau_p)$ and graphics of theoretical functions of distribution density of operation time $g(\tau_p)$ and recovery time $f(\tau_p)$ of grinding equipment



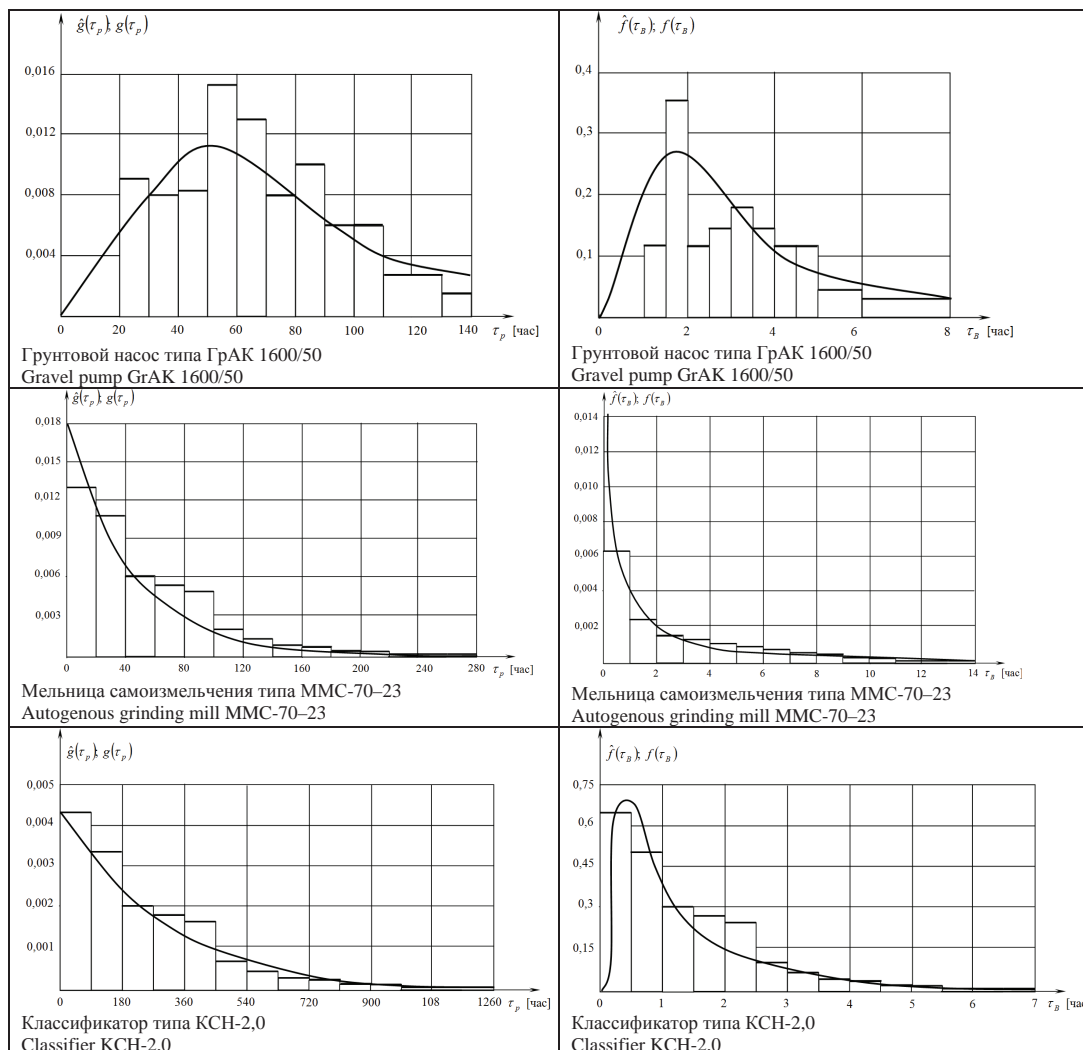
Продолжение табл. 1

Table 1



Окончание табл. 1

Table 1



по рассматриваемой выборке. Если выполняется неравенство $\chi^2 \leq \chi^2_{k,\alpha}$, то нулевую гипотезу не отвергают. При несоблюдении указанного неравенства принимают альтернативную гипотезу о принадлежности выборки неизвестному распределению.

Блок-схема алгоритма определения значений $m_j, j=\overline{1, l}$, статистических оценок функций плотностей распределения $\hat{f}_j = \hat{f}_j(x), j=\overline{1, l}$ а также оценок математического ожидания \bar{x} и дисперсии $\hat{\sigma}_x^2$ случайной величины x приведена на рис. 1.

На основании объединенных выборок, в соответствии с реализованным на компьютере алгоритмом (рис. 1), были построены гистограммы времени работы между отказами и времени восстановления для каждой группы элементов (табл. 1).

Исходя из вида каждой гистограммы, было выдвинуто несколько гипотез о законах распределения времени работы между отказами и времени восстановления соответствующих элементов. При этом в качестве гипотетических распределений бы-

ли рассмотрены: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение и распределение Релея.

В табл. 2 приведены оценки параметров выявленных распределений, среднего времени работы между отказами ($\bar{\tau}_p$), среднего времени восстановления ($\bar{\tau}_в$) и их доверительные границы. При вычислении перечисленных величин использовались формулы, приведенные в [14–23].

Ниже приведены аналитические выражения для идентифицированных функций плотности распределения времени работы между отказами $g(\tau_p)$ и времени восстановления $f(\tau_в)$ измельчительного оборудования:

1) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,925 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_в) = \frac{k \cdot \tau_в^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_в^k}{\alpha}} = 0,469 \cdot \tau_в^{-0,3} \cdot e^{-0,67 \cdot \tau_в^{0,7}};$$

2) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \cdot \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}} = 0,4956 \cdot \tau_b^{-0,4} \cdot e^{-0,826 \cdot \tau_b^{0,6}}.$$

3) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \cdot \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}} = 0,492 \cdot \tau_b^{-0,4} \cdot e^{-0,82 \cdot \tau_b^{0,6}};$$

4) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,05 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{k \cdot \tau_b^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_b^k}{\hat{\alpha}}} = 0,48 \cdot \tau_b^{-0,4} \cdot e^{-0,798 \cdot \tau_b^{0,6}};$$

5) классификатор типа 2КСН-2,4:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,14)^2 / 0,46}}{0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

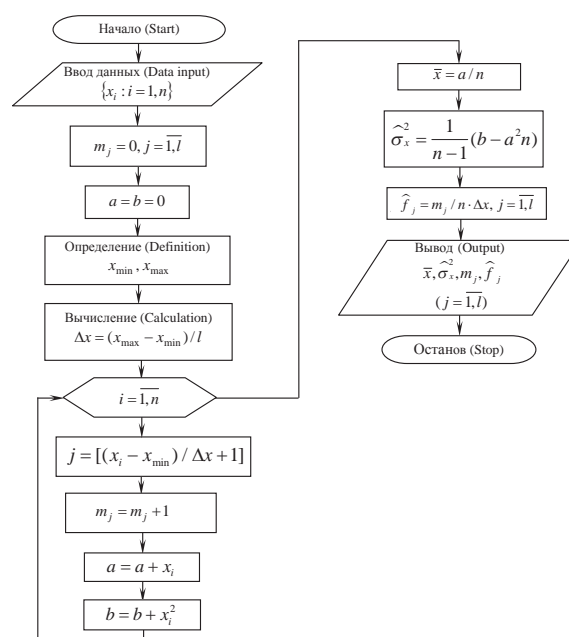


Рис. 1. Блок-схема алгоритма вычисления $m_j, f_j, j=\overline{1, l}$, оценок \bar{x} и $\hat{\sigma}_x^2$

Fig. 1. Block diagram for calculating $m_j, f_j, j=\overline{1, l}$, estimates of \bar{x} and $\hat{\sigma}_x^2$

Таблица 2. Оценки и доверительные границы для параметров распределений
Table 2. Estimates and confidence limits for distribution parameters

№ гр. эл. Group element	Закон распр. времени Law of time distribution τ_p/τ_b	Оценка параметров распредел. Estimation of distribution parameters τ_p	Оценка Assessment $\bar{\tau}_p$ [час]	Доверит. границы Confidence bounds for $\bar{\tau}_p$ [час]		Оценка параметр. распредел. Estimation of distribution parameters τ_b [час]	Оценка Assessment $\bar{\tau}_b$ [час]	Доверит. границы Confidence bounds for $\bar{\tau}_b$ [час]	
				нижн. lower	верх. upper			нижн. lower	верх. upper
1	эксп.(exp) Вейбулла (Weibull)	$\hat{\lambda}=1,925 \cdot 10^{-2}$	52	50	54,1	$k=0,7$ $\hat{\alpha}=1,772$	2,25	2,12	2,37
2	эксп.(exp) Вейбулла (Weibull)	$\hat{\lambda}=2,45 \cdot 10^{-2}$	40,85	39,2	42,5	$k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,373$	2,06	1,92	2,2
3	эксп.(exp) Вейбулла (Weibull)	$\hat{\lambda}=1,785 \cdot 10^{-2}$	56	52	60	$k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,3734$	2,05	1,83	2,3
4	эксп.(exp) Вейбулла (Weibull)	$\hat{\lambda}=2,05 \cdot 10^{-2}$	48,76	46,8	50,7	$k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,4534$	2,18	2,04	2,33
5	эксп.(exp) лог.норм. (log.norm)	$\hat{\lambda}=4,39 \cdot 10^{-9}$	227,6	212	243	$\hat{\mu}=0,14$ $\hat{\sigma}=0,48$	2,5	2,3	2,75
6	эксп.(exp) лог.норм. (log.norm)	$\hat{\lambda}=2,59 \cdot 10^{-3}$	386,2	351	420	$\hat{\mu}=0,12$ $\hat{\sigma}=0,52$	2,71	2,4	3,1
7	Релея (Rayleigh) лог.норм. (log.norm)	$\hat{\sigma}=65$	81,5	77,5	85	$\hat{\mu}=0,292$ $\hat{\sigma}=0,295$	2,48	232	2,62
8	Релея (Rayleigh) лог.норм. (log.norm)	$\hat{\sigma}=65,15$	70,5	66	72	$\hat{\mu}=0,4555$ $\hat{\sigma}=0,313$	3,69	3,45	3,95
9	эксп.(exp) Вейбулла (Weibull)	$\hat{\lambda}=1,81 \cdot 10^{-2}$	55,25	53,2	57,5	$k=0,7$ $\hat{\alpha}=1,591$	2,455	2,250	2,653
10	эксп.(exp) лог.норм. (log.norm)	$\hat{\lambda}=5,2 \cdot 10^{-3}$	192,3	180,5	204,1	$\hat{\mu}=0,18$ $\hat{\sigma}=0,52$	2,014	1,80	2,25

6) система смазки мельниц:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,12)^2 / 0,52}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

7) грунтовой насос типа ГрАК 350/40:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{4225} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{8450}},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,292)^2 / 0,174}}{0,295 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

8) грунтовой насос типа ГрАК 1600/50:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{3150} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{6300}},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,4555)^2 / 0,196}}{0,313 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

9) мельница самоизмельчения типа MMC-70-23:

$$g_i(\tau_p) = 1,81 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = 0,44 \cdot \tau_b^{-0,3} \cdot e^{-0,63 \cdot \tau_b^{0,7}},$$

10) односпиральный классификатор типа КСН- 2,0:

$$g_i(\tau_p) = 5,2 \cdot 10^{-3} e^{-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,18)^2 / 0,5}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b}.$$

С использованием полученных оценок $\bar{\tau}_{pi}$ и $\bar{\tau}_{bi}$, $i=1,10$ определены стационарные значения коэффициентов готовности измельчительного оборудования (табл. 3) по формуле [17, 19, 20]

$$K_{Gi} = \bar{\tau}_{pi} / (\bar{\tau}_{pi} + \bar{\tau}_{bi}).$$

Этот коэффициент характеризует готовность измельчительного оборудования к выполнению заданных функций и представляет собой вероятность того, что оборудование окажется работоспособным в произвольный момент времени, с учетом только внеплановых простоев.

Судя по значениям коэффициента готовности, сравнительно высокой надежностью обладают системы смазки мельниц и спиральные классификаторы. Показатели надежности мельниц невысокие и мало отличаются друг от друга. Как и ожидалось, надежность 8-дюймовых грунтовых насосов, работающих в сравнительно легких условиях, заметно выше надежности 12-дюймовых насосов.

Полученные оценки коэффициентов готовности измельчительного оборудования обуславливают необходимость проведения исследований, направленных на повышение их эксплуатационной надежности.

Таблица 3. Значения коэффициентов готовности измельчительного оборудования

Table 3. Values of availability ratio of grinding equipment

№ гр. эл. Group element	Наименование оборудования Name of equipment	Значение коэффициента готовности Value of availability coefficient
1	Мельницы 1-й стадии типа МШР-3200×3800 Mills of 1 st stage of type MShR-3200×3800	0,95852
2	Мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3800 Mills of 2 nd stage of type MShR-3200×3800	0,95199
3	Мельница 1-й стадии типа МШР-3200×3100 Mill of 1 st stage of type MShR-3200×3100	0,96468
4	Мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3100 Mills of 2 nd stage of type MShR-3200×3100	0,95720
5	Двухспиральные классификаторы типа 2КСН-2,4 Double-spiral classifiers of type 2КСН-2.4	0,98913
6	Системы смазки мельниц Lubrication systems of mills	0,99303
7	Грунтовые насосы типа ГрАК 350/40 Gravel pumps of type GrAK 350/40	0,97047
8	Грунтовые насосы типа ГрАК 1600/50 Gravel pump of type GrAK 1600/50	0,95026
9	Мельницы самоизмельчения типа MMC-70-23 Autogenous grinding mill type MMC-70-23	0,95745
10	Односпиральные классификаторы типа КСН-2,0 One spiral classifiers of type КСН-2,0	0,98963

Выводы

Обоснована необходимость идентификации законов распределения вероятностей времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования по экспериментальным данным. Совместно с сотрудниками ЗММК в течение трех лет был проведен сбор статистической информации об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования.

С использованием непараметрических критериев Вилкоксона и Крускала–Уоллиса проверены гипотезы об однородности выборок для однотипных оборудований. Из-за относительно высокой надежности гидроциклонов, питателей и транспортеров суммарное число отказов за трехлетний период их эксплуатации оказалось недостаточным не только для идентификации законов распределения вероятностей, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок.

Выявлены и математически описаны функции плотности распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования ТСИР ЗММК. Для проверки согласия эмпирических и теоретических распределений использовался критерий χ^2 Пирсона, который особенно мощен при

больших выборках. На основании построенных гистограмм времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования были выдвинуты гипотезы о законах их распределения. При этом в качестве гипотетических законов распределения были рассмотрены: экспоненциальное распределение, логарифмически-нормальное распределение и распределение Вейбулла и Релея.

Идентифицированные законы распределения были использованы при построении компьютерной модели ТСИР, позволяющей оценить и исследовать влияние показателей надежности измельчительного оборудования на эффективности функционирования системы [9].

Знание выявленных законов распределения предоставляет возможность прогнозировать отказы измельчительного оборудования, определить оптимальные количества запасных частей, правильно организовать профилактическое обслуживание и ремонт оборудования.

Определены оценки параметров выявленных функций распределения, среднего времени работы между отказами, среднего времени восстановления и построены их доверительные границы. Определены также оценки коэффициентов готовности, которые обуславливают необходимость проведения исследований, направленных на повышение эксплуатационной надежности измельчительного оборудования и эффективности функционирования ТСИР в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
2. Разработка и применение АСУ процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко, З. Ганбаатар, Л. Далгэрбат. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
3. Оптимизация процесса измельчения на основе применения алгоритма взаимосвязанного регулирования производительности и водных режимов / З. Ганбаатар, Л. Далгэрбат, А.Ф. Кузнецов, О.М. Дуда, В.В. Морозов // Горный журнал. – 2011. – № 10. – С. 79–82.
4. Курбатова О.А., Ксендзенко Л.С., Николайчук Д.Н. Надежность горных машин. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
5. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
6. Боярских Г.А. Надежность горных машин и оборудования. – Екатеринбург: УГТУ, 2009. – 116 с.
7. Баласания С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.
8. Баласания С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
9. Баласания С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
10. Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems / J. Faulin, A.A. Juan, S. Martorella, J.-E. Ramirez-Markes. – London: Springer, 2010. – 315 p.
11. Myers A. Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage. – New York: Springer, 2010. – 240 p.
12. Simulation and Modeling of Systems / Ed. by P. Cantot, D. Lutz-еaux. – Bagnеux, France: DGA, 2011. – 400 p.
13. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modeling and Analysis. – Boston: McGraw-Hill, 2007. – 768 p.
14. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Контроль качества. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
15. Браунли К. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1974. – 408 с.
16. Statistical Reliability Engineering / B. Gnedenko., I. Ushakov, I.V. Pavlov, S. Chakravanty. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1999. – 528 p.
17. Вентцель Е. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
18. Ushakov I. Handbook of Reliability Engineering. – Hoboken: Wiley, 1994. – 704 p.
19. Ushakov I. Probabilistic Reliability Models. – Hoboken: Wiley, 2012. – 248 p.
20. Бахрушин В.Е. Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 50–54.
21. Кузнецова О.С. Теория вероятности и математическая статистика. Краткий курс. – М.: Изд-во «Окей-книга», 2013. – 191 с.
22. Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – Т. 5. – № 1. – С. 66–72.
23. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б.Ю. Лемашко, С.Б. Лемашко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

Поступила 27.11.2015 г.

Информация об авторах

Геворгян Э.М., преподаватель кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении.

UDC 622.73:519.718:519.22

IDENTIFICATION OF DISTRIBUTION LAWS OF WORKING TIME AND RECOVERY TIME OF GRINDING EQUIPMENT

Hermine M. Gevorgyan,
hermine79@rambler.ru

National polytechnic university of Armenia,
Kapan branch, 28, Baghaberd Street, Kapan, 3307, Armenia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to identify distribution laws of working time between neighboring failures and recovery time of equipment of ore grinding technological system (OGTS), which are used when developing a computer model to assess and analyze its functioning efficiency, taking into account the equipment reliability.

The main aim of the study is to identify the distribution laws of working time between the neighboring failures, recovery time and to assess the exploitation reliability of grinding equipment based on statistic data on failures and recovery of the failed equipment of OGTS at Zangezur copper molybdenum combine (ZCMC, Armenia).

The methods used in the study: theory of reliability, methods of applied statistics, modeling methods.

The results. The author has substantiated the necessity of identifying the distribution laws of working time probability between neighboring failures and recovery time of grinding equipment based on the experimental data. The statistics on failures and recoveries of grinding equipment of OGTS ZCMC for three years of their exploitation was collected. Using a non-parametric Wilcoxon test and the Kruskal–Wallis test the author checked the hypotheses on homogeneity of statistical sampling for the same type of equipment. Based on statistic data, applying the Pearson's criterion of agreement the author identified and mathematically described the density functions of time distribution between the neighboring failures and recovery time of the failed grinding equipment. On the basis of the developed histograms of working time between neighboring failures and recovery time of grinding equipment the author put forward the hypotheses on the laws of their distribution, considering the exponential distribution, Weibull, lognormal and Rayleigh distributions as hypothetical distribution laws. The identified distribution laws are required to develop the OGTS computer model, which allows investigating the impact of reliability indicators of grinding equipment on the system functioning efficiency. The author determined the estimations of the parameters of the identified distribution functions, the average working time between the neighboring failures, the mean time to repair and built their confidence bounds. The estimates of the main quantitative indicators of grinding equipment reliability were determined as well.

Key words:

Ore grinding, failure, recovery, histogram, Pearson's criterion, availability.

REFERENCES

1. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
2. Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Development and application of automated systems for controlling mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2013. 512 p.
3. Ganbaatar Z., Delgerbat L., Kuznetsov A.F., Duda O.M., Morozov V.V. Grinding optimization on the basis of application of the algorithm of interconnected capacity control and water regimes. *Gornyy zhurnal*, 2011, no. 10, pp. 79–82. In Rus.
4. Kurbatova O.A., Ksendzenko L.S., Nikolaychuk D.N. *Nadezhnost gornykh mashin* [Reliability of mining machines]. Vladivostok, DVSTU Publ., 2005. 119 p.
5. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p.
6. Boyarskikh G.A. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 2009. 116 p.
7. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan H.M. Computer model for stochastic control of the ore flotation considering grinding equipment reliability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57. In Rus.
8. Balasanyan S.Sh. Computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86. In Rus.
9. Balasanyan S.Sh. A stratified model for evaluating and analyzing the efficiency of multistate complex technological systems functioning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30. In Rus.
10. Faulin J., Juan A.A., Martorella S., Ramires-Markes J.-E. *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*. London, Springer, 2010. 315 p.
11. Myers A. *Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage*. New York, Springer, 2010. 240 p.
12. *Simulation and Modeling of Systems*. Ed. by P. Cantot, D. Luzeaux. Bagneux, France, DGA, 2011. 400 p.
13. Law A.M., W.D. Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. Boston, McGraw-Hill, 2007. 768 p.
14. Shtorm R. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Kontrol kachestva* [The theory of probability. Mathematical statistics. Quality control]. Moscow, Mir Publ., 1970. 368 p.
15. Braunly K. *Statisticheskaya teoriya i metodologiya v nauke i tekhnike* [Statistical theory and methodology in science and technology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 408 p.
16. Gnedenko B., Ushakov I., Pavlov I., Chakravanty S. *Statistical Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1999. 528 p.
17. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [The theory of probability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 575 p.
18. Ushakov I. *Handbook of Reliability Engineering*. Hoboken, Wiley, 1994. 704 p.

19. Ushakov I. *Probabilistic Reliability Models*. Hoboken, Wiley, 2012. 248 p.
20. Bakhrushin V.E. The problem of identifying distribution models of random variables applying modern software. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, no. 1, pp. 50–54. In Rus.
21. Kuznetsov O.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Okey-kniga Publ., 2013. 191 p.
22. Rudakov I.S., Rudakov S.V., Bogomolov A.V. The method of identifying the type of distribution law of parameters when monitoring the state of complex systems. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 66–72. In Rus.
23. Lemashko B.Yu., Lemashko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V. *Statisticheskiy analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zavisimostey. Kompyuterny podkhod. Monografiya* [Statistical data analysis, modeling and studying the probability laws. Computer approach. Monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 888 p.

Received: 27 November 2015.

Information about the authors

Hermine M. Gevorgyan, Lecturer of the Department «Information technologies, computer and automated systems» Kapan Branch of «National Technical University of Armenia», National polytechnic university of Armenia.