

УДК 681.51: 622.73

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ РУДЫ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С.Ш. Баласанян, С.О. Симонян, Э.М. Геворгян

Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван

E-mail: suni-com@syunik.am

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения адекватности модели для управления процессом флотации руды. **Цель работы:** разработка обобщенной компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды, учитывающей влияние показателей надежности измельчительного оборудования и характеристик исходной руды.

Методы исследования: методы прикладной статистики (метод экспертных оценок, методы идентификации функции распределения вероятностей, методы регрессионного анализа), методы имитационного моделирования.

Результаты: обоснована постановка задачи оптимального управления процессом флотации руды как задача стохастического программирования. Разработана обобщенная компьютерная модель для стохастического управления процессом флотации руды. На основе этой модели построена компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовой руды, которая учитывает влияние показателей надежности измельчительного оборудования и характеристик исходной руды на эффективность флотации. Разработанная модель включает вероятностную имитационную модель процесса возникновения отказов и восстановления измельчительного оборудования, стратифицированную модель процесса функционирования технологической системы измельчения руды и модель формирования показателя эффективности процесса флотации. В результате проведения имитационных экспериментов с разработанной компьютерной моделью определены оптимальные значения расходов реагентов и технологических параметров флотации руды. Использование в составе компьютерной модели имитационной модели технологической системы измельчения руды, учитывающей надежность измельчительного оборудования, позволяет существенно повысить адекватность компьютерной модели в целом, предоставляя возможность получения с ее помощью более точных оптимальных решений задачи стохастического управления флотационным процессом.

Ключевые слова:

Оптимальное управление, флотация, стохастическое программирование, имитационное моделирование, надежность, измельчение руды, алгоритм.

Введение

Как показывает практический опыт эксплуатации технологической системы измельчения руды (ТСИР), на качество ее функционирования существенное влияние оказывает надежность измельчительного оборудования [1–3]. Вследствие частых отказов мельниц, классификаторов, грунтовых насосов и другого оборудования ухудшаются выходные характеристики системы – ее производительность, гранулометрическая характеристика и плотность выходной пульпы (готового продукта). Ухудшение этих характеристик и изменение характеристик исходной руды заметно снижают точность управления и эффективность конечного процесса обогащения руды – флотации.

Постановка задачи

Задача оптимального управления флотационным процессом традиционно сводится к детерминированной задаче математического, часто нелинейного программирования с поиском экстремума показателя эффективности – функции цели $y=f(u,x)$ по технологическим параметрам и параметрам реагентов (u), при заданных характеристиках исходной руды и пульпы (x), с ограничениями на нижние и верхние значения искомых параметров [4, 5]. Однако как характеристики исходной руды, так и характеристики пульпы, определяющие состояние внешней среды, вследствие влияния ненадежности измельчительного оборудования и воз-

действия других случайных факторов являются случайными величинами. Учитывая это обстоятельство, задачу оптимального управления процессом флотации необходимо рассматривать как задачу стохастического программирования, ибо при каждом конкретном значении вектора u значения случайной функции цели $\tilde{y}=f(u,\tilde{x})$ зависят от реализаций случайного вектора \tilde{x} . Если в результате эксперимента состояние внешней среды становится известным, т. е. $\tilde{x}=x$, то выбор решения $u(x)$ при данном фиксированном значении x сводится к обычной задаче математического программирования:

$$y = f(u, x) \rightarrow \underset{u}{ext} \quad (1)$$

при ограничениях $u \in U$.

В общем случае эксперимент полностью не определяет состояние внешней среды, поэтому этапы выбора решений могут чередоваться с этапами наблюдений над состоянием внешней среды. Если решение u детерминированное и принимается перед тем, как наблюдается состояние x , то соотношение (1) приобретает определенный вероятностный смысл, поскольку при фиксированном u для одних x , оно может выполняться, а для других нет. Исходя из сказанного, задача оптимального управления процессом флотации руды формулируется как задача стохастического программирования [6] и сводится к отысканию экстремума математического ожидания функции цели:

$$M[f(u, \tilde{x})] \rightarrow \text{ext} \quad (2)$$

при ограничениях $u \in U$.

Выбор показателя эффективности технологического процесса флотации медно-молибденовой руды является одним из важнейших этапов в исследовании эффективности функционирования технологической системы обогащения руды, поскольку он оказывает существенное влияние на интерпретацию свойств системы и результатов исследований.

Анализ известных в настоящее время критериев эффективности разделительных процессов [3–5] позволяет сделать вывод, что наибольшему числу требований, предъявляемых к критериям эффективности обогатительных процессов, удовлетворяет прибыль, получаемая от всего производства концентратов. Прибыль характеризует эффективность процесса флотации с точки зрения конечной цели производства концентратов, учитывает количественные характеристики выпускаемой продукции, производственные затраты, степень извлечения полезных компонентов, качество функционирования измельчительных и других агрегатов. Прибыль учитывает также изменение рыночных условий, поскольку чувствительна к изменению цен на концентраты.

Следует отметить, что наряду с прибылью (\hat{y}_1) эффективность флотации характеризуется рядом технологических показателей, важнейшими из которых являются среднесменное содержание Мо в молибденовом концентрате (y_2) и извлечение молибдена (y_3). На эти показатели, которые также зависят от векторов u и x , накладываются определенные ограничения: их значения не должны быть ниже плановых. Тогда задача оптимального управления процессом флотации, сформулированная как задача стохастического программирования (2), сводится к максимизации математического ожидания функции цели, при ограничениях, наложенных на u и на технологические показатели y_2, y_3 :

$$\begin{cases} M[\hat{y}_1] = M[f_1(u, \tilde{x})] \rightarrow \max_{u \in U}, \\ y_2 = f_2(u, \tilde{x}) \geq \beta_{Mo}, \\ y_3 = f_3(u, \tilde{x}) \geq \varepsilon_{Mo}, \end{cases} \quad (3)$$

где β_{Mo} и ε_{Mo} – плановые значения содержания Мо в молибденовом концентрате и извлечения Мо (в %).

Компьютерная модель для стохастического управления процессом флотации

Учитывая сложность поставленной задачи, для ее решения целесообразно использовать метод имитационного моделирования. Исходя из того, что эффективность флотации в большей мере предопределяется качеством функционирования ТСИР, с целью обеспечения высокой адекватности имитационной модели процесса флотации в данной работе предлагается для формирования возможных значений выходных переменных ТСИР

использовать ее имитационную модель, учитывающую влияние показателей надежности измельчительного оборудования на качество функционирования системы. Данная модель представляет собой композицию трех моделей [7]: вероятностной имитационной модели процесса изменения работоспособности элементов ТСИР, стратифицированной модели процесса ее функционирования и модели формирования выходных интервальных характеристик ТСИР.

В соответствии с (3) математическая модель процесса флотации руды представляется совокупностью следующих функций цели и ограничений:

$$\begin{cases} \hat{y}_1 = f_1(u, x), \\ \hat{y}_2 = f_2(u, x), \\ \hat{y}_3 = f_3(u, x). \end{cases} \quad (4)$$

Укрупненная блок-схема компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования приведена на рис. 1. Моделирующий алгоритм функционирует следующим образом.

После пуска имитационной программы блок 1 осуществляет ввод исходных данных моделирования, затем блок 2 в соответствии с планом компьютерного эксперимента генерирует очередное допустимое значение вектора $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{mj})$, а блок 3 устанавливает начальное значение счетчика-оператора количества реализаций модели (блок 13). После чего вступает в действие имитационная модель ТСИР, включающая вероятностную имитационную модель возникновения отказов и восстановления ее элементов (блок 4), трехуровневую иерархическую модель функционирования ТСИР (блок 5), которая формирует ее мгновенные выходные характеристики $x_1^*, x_2^*, \dots, x_l^*$ для текущего особого состояния системы (отказ или восстановление элементов). На основании мгновенных характеристик и длительностей нахождения системы в особых состояниях в течении i -й смены блок 6 формирует среднесменные значения выходных характеристик ТСИР $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{li}$ для реализованной в данной смене траектории ее функционирования. После блока 7, проверяющего условие окончания очередного прогона, вступает в действие блок 8, который в соответствии с заданными оценками математических ожиданий μ_i и среднеквадратических отклонений σ_i ($i = \overline{k+1, l}$) нормально распределенных случайных величин – характеристик исходной руды $\tilde{x}_{k+1}, \tilde{x}_{k+2}, \dots, \tilde{x}_l$ и их корреляционной матрицей $\|r_{ij}\|$ ($i, j = \overline{k+1, l}$), формирует их очередные возможные значения $x_{(k+1)i}, x_{(k+2)i}, \dots, x_{li}$. Затем для заданных значений векторов u_j и $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{li})$ с помощью математических моделей (4) вычисляются значения технологических показателей $\hat{y}_{2i}, \hat{y}_{3i}$ (блок 9) и проверяются условия выполнения ограничений $\hat{y}_{2i} \geq \beta_{Mo}, \hat{y}_{3i} \geq \varepsilon_{Mo}$ (блок 10). Если условия не выполняются, вступают в действие блоки 4 и 5, которые имити-

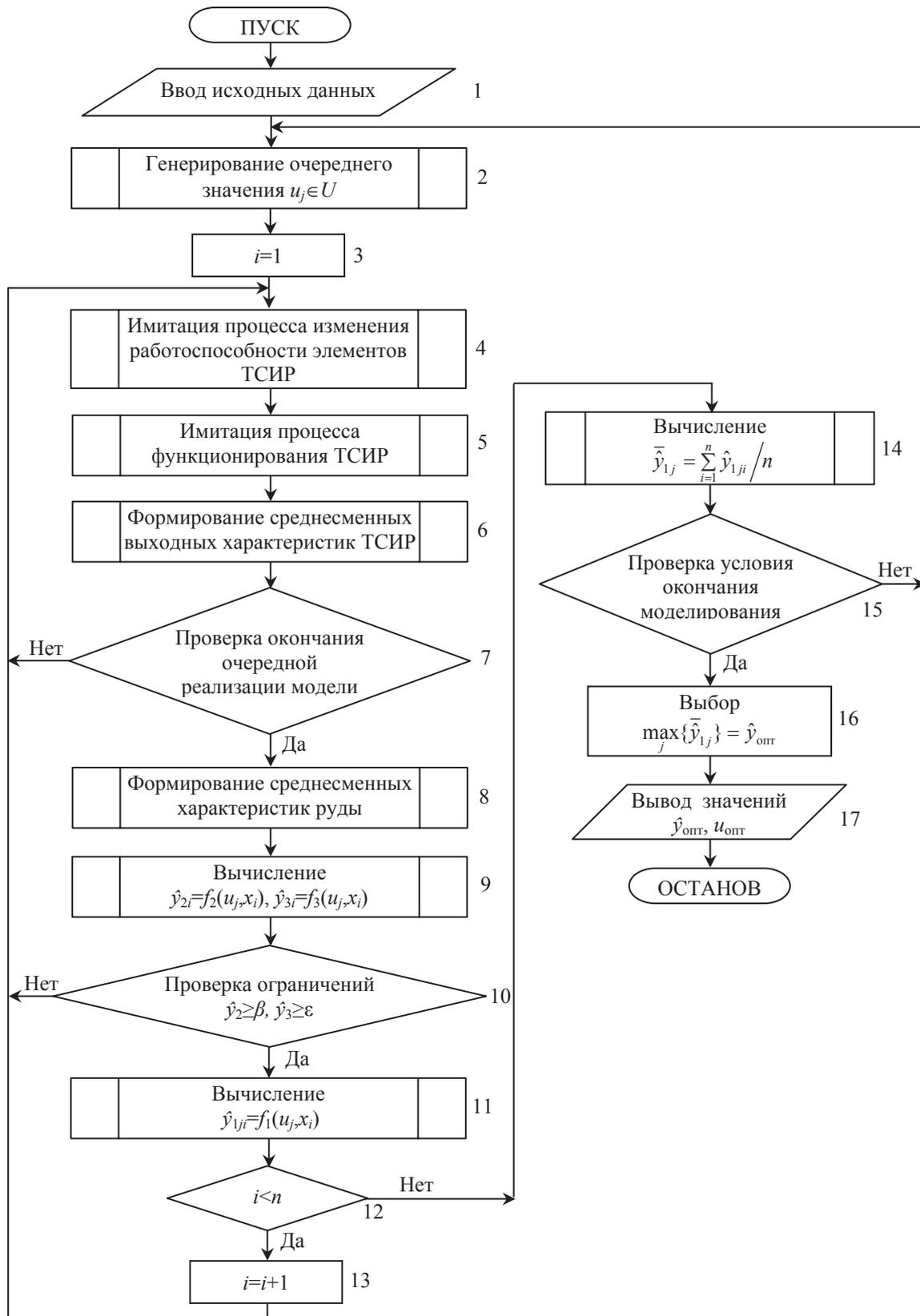


Рис. 1. Укрупненная блок-схема компьютерной модели

руют очередную реализацию процесса функционирования ТСИР в восьмичасовом интервале времени, а блок 6 формирует новые значения ее выходных интервальных характеристик. При выполнении ограничений блок 11 при заданных u_j и x_i с помощью математической модели (4) вычисляет значение прибыли (функции цели) \hat{y}_{ij} , получаемой от производства концентратов в течение i -й смены. Затем блок 12 проверяет условие окончания текущего прогона, включающего n выборочных точек – реализаций имитационной модели ТСИР в восьмичасовом интервале времени.

Затем проверяется условие окончания моделирования (блок 15). При его невыполнении управление передается блоку 2, который генерирует очередное допустимое значение вектора u . При окончании моделирования из полученных в результате значений $\{\hat{y}_{ij}\}$ выбирается максимальное значение $\bar{y}_{\text{опт}}$ и соответствующее им значение вектора $u_{\text{опт}}$ (блок 16), осуществляется их вывод (блок 17), а затем и останов модели.

Следует заметить, что рассмотренная имитационная модель предназначена для перспективного управления процессом флотации. Следовательно как модель процесса флотации (4), так и функция плотности совместного распределения вероятностей характеристик исходной руды и показатели надежности измельчительного оборудования периодически уточняются на основании накопленных статистических данных.

Генерация допустимых значений вектора u может быть осуществлена в соответствии с планом экстремального компьютерного эксперимента методами полного и направленного перебора вариантов, а также с использованием оптимизационных пакетов программ (например OptQuest, PROMODEL, WITNESS Optimizer и т. п. [8]), обеспечивающих нахождение глобальных оптимальных решений задач нелинейного программирования в составе имитационной модели.

Программная реализация компьютерной модели осуществлена с использованием языка C++.

Практическое применение модели

Разработанная компьютерная модель использовалась для решения задачи оптимального управления технологическим процессом флотации медно-молибденовой руды Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Построению входящих в состав компьютерной модели имитационных моделей процессов изменения работоспособности измельчительного оборудования, функционирования ТСИР и модели формирования ее выходных интервальных характеристик посвящены работы [2, 7, 9].

Имитационная модель процесса изменения работоспособности элементов ТСИР [2] построена на основании статистических данных об отказах и восстановлении измельчительного оборудования, эксплуатируемого в ЗММК. При этом были идентифицированы законы распределения времени ра-

боты между соседними отказами τ_p оборудования и времени их восстановления τ_b . Проверка согласия эмпирических и теоретических распределений проводилась с использованием критерия согласия Пирсона (при уровне значимости $\alpha=0,01$).

Аналитические выражения выявленных функций плотности распределения вероятностей $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_b)$ приведены в табл. 1, 2. Оценены также параметры распределений, и построены их доверительные границы.

При построения моделирующего алгоритма, учитывая сходство логической структуры и последовательности протекания во времени подпроцессов отказов и восстановления элементов, в системе выделены следующие группы элементов:

- мельницы, системы их смазки и классификаторы;
- грунтовые насосы, входящие в состав измельчительных комплексов с соотношением мельниц 1:1;
- грунтовые насосы, входящие в состав измельчительных комплексов со соотношением мельниц 2:1 и 3:1.

Выделение указанных групп позволило построить моделирующий алгоритм процесса изменения работоспособности элементов ТСИР и ее программную реализацию по модульному принципу, благодаря чему обеспечивается гибкость и компактность компьютерной модели.

Имитационная модель процесса функционирования ТСИР представляет собой трехуровневую строго-иерархическую стратифицированную систему (СИСС) [7], имитирующую функционирование системы измельчения руды на трех стратах (уровнях описания): на страте измельчительных агрегатов, на страте измельчительных комплексов и на системной страте.

Страта измельчительных агрегатов

На данной страте ТСИР представлена совокупностью $p_1=15$ подсистем первого уровня – измельчительных агрегатов E_i^1 , $i \in I^1 = \{1, 2, \dots, p_1\}$, полученных в результате декомпозиции системы, состоящей из элементов E_i^0 , $i \in I^0 = \{1, 2, \dots, 37\}$. Каждая подсистема E_i^1 первого уровня рассмотрена как объект с двумя возможными состояниями – работоспособным (1) и отказа (0). Случайный процесс $Y_i^1(t)$ изменения состояний каждой подсистемы E_i^1 вследствие изменения работоспособности элементов рассматривается как формализованный процесс ее функционирования.

Каждая подсистема E_i^1 формализована в виде временной статической системы без памяти S_i^1 [7, 10], описываемой множествами моментов времени T_i^1 , входных X_i^1 , выходных Y_i^1 сигналов и оператором H_i^1 , реализующим отображением $X_i^1 \rightarrow Y_i^1$. Множество X_i^1 представляет собой декартово произведение множеств $\{0, 1\}$ выходных сигналов входящих в состав подсистемы E_i^1 элементов E_i^0 , а T_i^1 представляет собой множество моментов времени изменения работоспособности этих элементов.

Таблица 1. Функции плотностей распределения времени работы между отказами и времени восстановления мельниц

Элемент	Время работы между отказами		Время восстановление отказавшего элемента	
	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $G(\tau_p)$	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $F(\tau_B)$
Мельницы				
I стадии типа МШР 32×38	Эксп.	$1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,9254 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$	Вейбулла	$0,469 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot \exp(-0,67 \cdot \tau_B^{0,7})$
II стадии типа МШР 32×38		$2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,4656 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,826 \cdot \tau_B^{0,6})$
II стадии типа МШР 32×31		$2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,48 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,798 \cdot \tau_B^{0,6})$
I стадии типа МШР 32×31		$1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,492 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,82 \cdot \tau_B^{0,6})$
Самоизмельчения типа ММС 70–23		$1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,44 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot \exp(-0,7 \cdot \tau_B^{0,7})$

Таблица 2. Функции плотностей распределения времени работы между отказами и времени восстановления оборудования ТСИР

Элемент	Время работы между отказами		Время восстановление отказавшего элемента	
	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $G(\tau_p)$	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $F(\tau_B)$
Классификаторы				
2КСН-24	Эксп.	$4,4 \cdot 10^{-3} \exp(-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$	Лог.-норм.	$\exp[-(\lg \tau_B - 0,14)^2 / 0,46] / 0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
КСН – 2.0		$5,2 \cdot 10^{-3} \exp(-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,18)^2 / 0,5] / 0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
Система смазки мельниц		$2,6 \cdot 10^{-3} \exp(-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,12)^2 / 0,52] / 0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
Грунтовые насосы	Релея		Лог.-норм.	
8ГРТ		$\tau_p / 4225 \exp(-\tau_p^2 / 8450)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,292)^2 / 0,174] / 0,285 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
12ГРТ		$\tau_p / 3150 \exp(-\tau_p^2 / 6300)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,4555)^2 / 0,196] / 0,313 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$

Множество Y_i^1 выходных сигналов включает два элемента (0 – состояние отказа, 1 – работоспособное состояние). Оператор H_i^1 представляет собой логическую функцию работоспособности подсистемы E_i^1 , описывающую условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав элементов.

Страта измельчительных комплексов

На этой страте ТСИР представлена в виде совокупности $p_2=5$ измельчительных комплексов – подсистем второго уровня $E_i^2, i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$.

Каждый измельчительный комплекс, в зависимости от работоспособности входящих в его состав или влияющих на его работу измельчительных агрегатов, может работать в одном из технологически возможных режимов, по определенной схеме измельчения. Каждый режим работы измельчительного комплекса E_i^2 характеризуется конкретным набором значений его выходных характеристик $y_i^2 = (y_{i,1}^2, y_{i,2}^2, y_{i,3}^2)$, где $y_{i,1}^2$ – производительность комплекса в т/ч, $y_{i,2}^2$ – процентное содержание класса ≤ 80 мкм в измельченном продукте (пульпе), $y_{i,3}^2$ – плотность выходной пульпы в г/л.

Обозначим через $x_i^2 = (x_{i,2}^2(t), \dots, x_{i,n}^2(t))$ совокупность выходных характеристик в момент t тех измельчительных агрегатов, от работоспособности которых зависит выбор структуры и режима работы измельчительного комплекса E_i^2 . В каждый момент $t \in T^1$, когда происходит изменение работоспособности измельчительных агрегатов, в соответствии со значением вектора $x_i^2(t)$ происходит перестроение структуры комплекса E_i^2 и переход в новый режим работы, характеризуемый новым значением вектора $n_i^2(t)$.

Каждый измельчительный комплекс E_i^2 , формализованный в виде временной статической сис-

темы без памяти S_i^2 , характеризуется четверкой $\langle T_i^2, X_i^2, Y_i^2, H_i^2 \rangle$. В соответствии с формальным описанием СИСС каждое множество $T_i^2, i \in I^2$ совпадает с множеством T^1 . Входной сигнал $x_i^2(t)$ каждой S_i^2 представляет собой упорядоченную совокупность выходных сигналов соответствующих подсистем первого уровня.

В качестве выходного сигнала любого элемента S_i^2 рассматривается вектор выходных характеристик $y_i^2 = (y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$ соответствующего измельчительного комплекса E_i^2 .

Множество Y_i^2 элемента S_i^2 представляет собой совокупность значений вектора выходных характеристик подсистемы E_i^2 , соответствующих всевозможным режимам ее работы.

Каждый оператор H_i^2 , реализующий отображение $X_i^2 \rightarrow Y_i^2$ представляет собой бинарную поисковую признаковую структуру – алгоритм, который по заданному входному сигналу $x_i^2(t) \in X_i^2$, описывающему работоспособность входящих в состав подсистемы E_i^2 , и влияющих на ее функционирование подсистем первого уровня, осуществляет поиск и выдачу соответствующего выходного сигнала $y_i^2(t) \in Y_i^2$.

Системная стратегия

На данной страте ТСИР рассматривается как одна крупная подсистема E^3 третьего уровня, представляющая собой смеситель (пульподелитель), входом которого является совокупность выходных продуктов (пульпы) всех измельчительных комплексов, а выходом – объединенная выходная пульпа, поступающая на флотацию.

Характеристики входных потоков подсистемы E^3 , которые представляют собой соответствующие характеристики выходных потоков измельчительных комплексов $E_i^2, i \in I^2$, обозначим через

$x_{i,1}^3(t)=y_{i,1}^2(t)$ (производительность), $x_{i,2}^3(t)=y_{i,2}^2(t)$ (процентное содержание класса ≤ 80 мкм в пульпе), $x_{i,3}^3(t)=y_{i,3}^2(t)$ (плотность пульпы).

Обозначим через $y_1^3(t), y_2^3(t), y_3^3(t)$ значения аналогичных выходных характеристик подсистемы E^3 в момент времени t . Показано [7], что общая производительность $y_1^3(t)$ подсистемы E^3 , процент содержания класса ≤ 80 мкм $y_2^3(t)$ в объединенной пульпе и ее плотность $y_3^3(t)$ связаны с характеристиками измельчительных комплексов следующими соотношениями:

$$y_1^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t), \quad (5)$$

$$y_2^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t) \cdot x_{i,2}^3(t) / \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t), \quad (6)$$

$$y_3^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} \frac{x_{i,1}^3(t) \cdot x_{i,3}^3(t)}{x_{i,3}^3(t) - 1000} / \sum_{i=1}^{p_2} \frac{x_{i,1}^3(t)}{x_{i,3}^3(t) - 1000}. \quad (7)$$

Соотношения (5, 6 и 7) соответственно описывают операторы H_1^3, H_2^3, H_3^3 , составляющие оператор H^3 , который реализует отображение $X^3 \rightarrow Y^3$.

Модель формирования выходных интервальных характеристик ТСИР [9] при заданных мгновенных значениях выходных характеристик системы измельчения и длительностей ее пребывания в особых состояниях (при возникновении отказов или восстановления оборудования) формирует среднесменные значения выходных характеристик ТСИР.

Математическая модель технологического процесса флотации (4) построена на основании статистических данных, полученных в результате технологического опробования (пассивного эксперимента) процесса флотации медно-молибденовой руды ЗММК методами пошаговой регрессии [11].

При построении математической модели технологического процесса флотации медно-молибдено-

вой руды (рис. 2) из 59 параметров процесса методом экспертных оценок [12] выбраны следующие, наиболее существенные переменные.

Входные переменные

Выходные характеристики ТСИР: расход (переработка) руды в течение смены (x_1 , в тоннах), среднесменные содержания (в %) классов ≤ 80 мкм (x_2) и ≥ 160 мкм (x_3) в измельченном продукте (пульпе), среднесменное значение плотности пульпы (x_4 , в г/л).

Характеристики исходной руды: среднесменные содержания в руде (в %) Мо общего (x_5), Мо сульфидного (x_6), Си общего (x_7) и Си сульфидного (x_8).

Управляющие переменные

Цикл коллективной флотации: среднесменные значения pH пульпы, поступающей на флотацию (u_1), среднесменное содержание класса ≤ 80 мкм в сливе гидроциклонов доизмельчения (u_2 , в %) и его плотности (u_3 , в г/л), расход воздуха (u_4 , в м³/мин), температура пульпы в флотомашине (u_5 , в °С), расходы реагентов (в г/т): извести (u_6), Na₂S (u_7), бутилового ксантогената (u_8), вспенивателя ОПСБ или Т 92 (u_9).

Цикл селективной (Мо) флотации: среднесменные значения температуры пропаривания (u_{10} , в °С), плотности пульпы (u_{11} , в г/л), расходов (в г/т) Na₂S (u_{12}) и керосина (u_{13}).

Выходные переменные модели

Выход массы Мо концентрата в течение смены (y_1 , в тоннах), среднесменные значения содержания Мо в молибденовом концентрате (y_2 , в %), и извлечения (y_3 , в %), выход массы Си концентрата (y_4 , в тоннах), среднесменные значения содержания Си в медном концентрате (y_5 , в %).

Статистические значения прибыли для каждой i -й смены вычисляется по формуле:

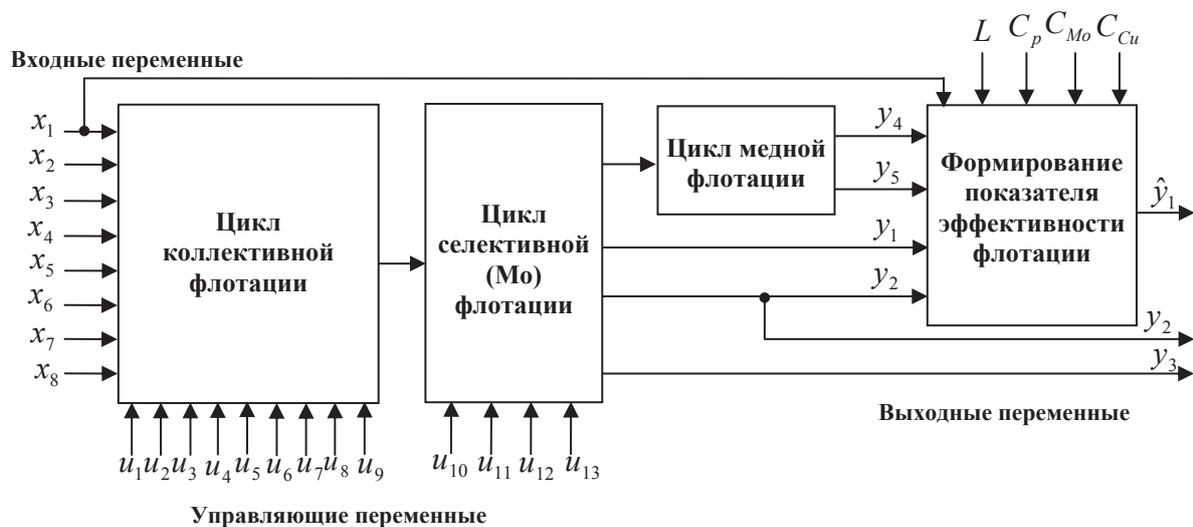


Рис. 2. Формализованная структурная схема флотационного процесса

$$\hat{y}_{1,i} = \frac{y_{1i} \cdot y_{2i}}{100} \cdot C_{Mo} + \frac{y_{4i} \cdot y_{5i}}{100} \cdot C_{Cu} - x_{1i} \cdot C_p - L,$$

где x_{1i} , y_{1i} , y_{2i} , y_{4i} , y_{5i} – значения соответствующих переменных для i -й смены, C_{Mo} и C_{Cu} – рыночные цены на молибден и медь, соответственно, C_p – затраты на переработку 1 т руды в течение смены, L – условно-постоянная часть затрат, приведенная к одной смене (в у.е.).

При использовании метода пошаговой регрессии получены линейные полиномальные регрессионные модели (4) второго порядка с коэффициентом детерминации $R^2=0,8-0,85$ и с расчетным значением F -критерия=81–92, что свидетельствует об адекватности построенных моделей.

С использованием известных методов [8] проведена верификация и валидация разработанной компьютерной модели, как по частям, так и в целом.

В результате проведения имитационных экспериментов с разработанной моделью решена задача (3) стохастического нелинейного программирования, т. е. определены оптимальные значения управляющих переменных (расходов реагентов и технологических параметров).

Установлено также, что вследствие ненадежности измельчительного оборудования и случайного

изменения характеристик исходной руды эффективность технологического процесса флотации руды снижается соответственно на 12 и 3 %.

Рекомендуемый оптимальный реагентный режим и оптимальные значения технологических параметров обеспечивают прирост извлечения Мо и прибыли, получаемой от производства концентратов на 3...4 %.

Выводы

Результаты компьютерного моделирования технологического процесса флотации медно-молибденовой руды показывают, что ненадежность измельчительного оборудования существенно снижает эффективность флотации, следовательно использование в составе компьютерной модели имитационной модели ТСИР, учитывающей надежность измельчительного оборудования, позволяет существенно повысить адекватность компьютерной модели в целом, предоставляя возможность получения с ее помощью более точных оптимальных решений задачи стохастического управления флотационным процессом.

Разработанная компьютерная модель может быть использована в составе математического (программного) обеспечения разрабатываемой АСУТП флотации медно-молибденовой руды ЗММК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hulbert D.G. Simulation, control and modeling of mineral processing // Proc. of XXII IPMC. – Cape Town, South Africa, September 28 – October 3, 2003. – P. 116–126.
- Баласанян С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
- Авдохин В.М. Технология обогащения полезных ископаемых. – М.: МГТУ, 2008. – 320 с.
- Дэлгэрбат Л. Исследование, моделирование и оптимизация процессов измельчения и коллективной флотации медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. – 2002. – № 6. – С. 213–220.
- Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
- Юдин Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования. – М.: КРАСАНД, 2010. – 392 с.
- Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
- Аверилл М. Лоу, Кельтон В. Девид Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа ВНУ, 2004. – 847 с.
- Баласанян С.Ш. Математическая модель формирования показателя экономической эффективности передела измельчения Каджаранской обогатительной фабрики // Обогащение руд. – 2012. – № 4. – С. 46–50.
- Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: Математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. 3-е изд. – М.: Диалектика, 2007. – 912 с.
- Орлов А.И. Теория принятия решений. – М.: Изд-во «Март», 2004. – 656 с.

Поступила 05.07.2013 г.

COMPUTER MODEL FOR STOCHASTIC CONTROL OF THE ORE FLOTATION PROCESS CONSIDERING GRINDING EQUIPMENT RELIABILITY

S.Sh. Balasanyan, S.O. Simonyan, E.M. Gevorgyan

State Engineering University of Armenia, Yerevan

The urgency of the discussed issue is caused by the necessity to improve the adequacy of the model for the ore flotation process control. **The main aim of the study:** to develop a generalized computer model for stochastic control of the ore flotation process considering the impact of reliability parameters of grinding equipment and features of the original ore.

The methods used in the study: methods of applied statistics (method of the expert evaluations, methods for identification of the probability distribution function, methods of regression analysis), methods of simulation modeling.

The results: The statement of optimal control problem of ore flotation process is substantiated as a problem of stochastic programming. The generalized computer model is developed for stochastic control of the ore flotation process. Based on this model the authors have developed a computer model for the stochastic control of copper-molybdenum ore flotation process which takes into account the impact of reliability parameters of grinding equipment and the characteristics of the initial ore on flotation efficiency. The developed model includes the probabilistic simulation model of failure occurrences and recovery of the grinding equipment, the stratified model of functioning of ore grinding technological system and the model of formation of efficiency parameter of flotation process. As a result of carried out simulation experiments with the developed computer model the optimal values of reagents consumptions and technological parameters of ore flotation are defined. The use of simulation model of ore grinding technological system in the computer model, taking into account the reliability of the grinding equipment, allows increasing essentially the adequacy of the computer model as a whole, providing a possibility of obtaining more accurate solutions to the problem of the stochastic optimal control of flotation process.

Key words:

Optimal control, flotation, stochastic programming, simulation, reliability, ore grinding, algorithm.

REFERENCES

- Hulbert D.G. Simulation, control and modeling of mineral processing. *Proc. of XXII IPMC*. Cape Town, South Africa, September 28 – October 3, 2003. pp. 116–126.
- Balasanyan S.Sh. Kompyuternaya model protsessa vozniknoveniya otkazov i vosstanovleniya oborudovaniya sistemy izmelcheniya rudy [A computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86.
- Avdokhin V.M. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [The technology of mineral processing]. Moscow, MGGU Publ., 2008. 320 p.
- Delgerbat L. Issledovanie, modelirovanie i optimizatsiya protsessov izmelcheniya i kollektivnoy flotatsii medno-molibdenovykh rud [The research, modeling and optimization of the processes of grinding and bulk flotation of copper molybdenum ores]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten MGGU*, 2002, no. 6, pp. 213–220.
- Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [The development and application of automated process control of mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally, 2013. 512 p.
- Yudin D.B. *Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya* [The problems and methods of the stochastic programming]. Moscow, KRASAND, 2010. 392 p.
- Balasanyan S.Sh. Stratifitsirovannaya model dlya otsenki i analiza effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem so mnogimi sostoyaniyami [A stratified model for the evaluation and analysis of the functioning effectiveness of multi-state complex technological systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30.
- Averill M. Lou, Kel'ton V. *Devid Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS* [Simulation. Classic CS]. Saint-Petersburg, Piter; Kiev, gruppa BHV Publ., 2004. 847 p.
- Balasanyan S.Sh. Matematicheskaya model formirovaniya pokazatelya ekonomicheskoy effektivnosti peredela izmelcheniya Kadzharanskoy obogatitelnoy fabriki [Mathematical model of the grinding processing stage economic efficiency parameter forming at the Qadzharan concentrating plant]. *Obogashchenie rud*, 2012, no. 4, pp. 46–50.
- Mesarovich M., Takakhara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: Matematicheskie osnovy* [General Systems Theory: Mathematical Foundations]. Moscow, Mir, 1978. 311 p.
- Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz. Mnozhestvennaya regressiya* [Applied Regression Analysis. Multiple regression]. Moscow, Dialektika, 2007. 912 p.
- Orlov A.I. *Teoriya prinyatiya resheniy* [The decision making theory]. Moscow, Mart, 2004. 656 p.