

С.Г. КЮРЕГЯН, Б.М. МАМИКОНЯН, В.К. ШМЕЛЕВ, С.В. АБГАРЯН,
С.Ш. БАЛАСАНИЯН

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ ФЛОТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ МОЛИБДЕНОВОЙ РУДЫ

Технологический процесс флотационного обогащения медно-молибденовой руды Каджаранской обогатительной фабрики представлен многомерным объектом управления с распределенными параметрами. С целью организации автоматизированного управления процессом построены математические модели, определены оптимальные настройки параметров процесса и функции автоматизированного рабочего места оператора.

Ключевые слова: флотация, молибден, руда, модель, оптимизация, управление.

Сущность флотационного обогащения руд ценных металлов заключается в извлечении раздробленных мелких крупиц металлов и их соединений из пульпы флотмашин на поверхность в пену для ее отбора в последующие операции и в завершение – для приготовления концентрата. С целью повышения эффективности этого извлечения до формирования конечного концентрата процесс многократно циклически повторяют. В случае извлечения нескольких ценных компонентов технологический процесс проводится по коллективно-селективной схеме [1].

На Каджаранской обогатительной фабрике (КОФ) в результате цикла коллективной флотации получают медно-молибденовый 1 (см. рис.), а по циклу селективной флотации – молибденовый 2 и медный (на рис. не показано) концентраты [2]. В свою очередь, каждый цикл состоит из трех операций: основной (1.1 и 2.1), контрольной (1.2 и 2.2) и перечистой (1.3 и 2.3) флотаций [2]. В результате основной коллективной и молибденовой флотаций извлекается большая часть полезного компонента в черновой концентрат, который подается на перечистную флотацию. Контрольная флотация служит для доизвлечения (контроля) оставшегося в пульпе компонента и возвращения на вход основной флотации, а пульпа сливается в отвальные хвосты (после молибденовой флотации – на медную селективную флотацию). Перечистная флотация состоит, как правило, из нескольких циклов и проводится с целью освобождения (очистки) чернового концентрата от пустой породы, дофлотации и получения готового концентрата. Коллективная основная и контрольная флотации состоят из нескольких параллельных линий (ниток), которые объединяются после основной и контрольной флотаций.

Управление процессом при постоянстве прочих физических параметров во флоткамерах (плотность и уровень пульпы, степень аэрации, отбор пены и др.) осуществляется поддержанием реагентных режимов, в состав которых входят регуляторы среды пульпы, пенообразователи, собиратели и депрессоры [1]. Собиратели, обладая избирательностью по отношению к сульфидам металлов,

служат для извлечения последних с помощью пузырьков воздуха на поверхность в пену. Депрессоры применяются для осаждения остальных металлических компонентов при селекции одного из них, а также осаждения пустой породы.

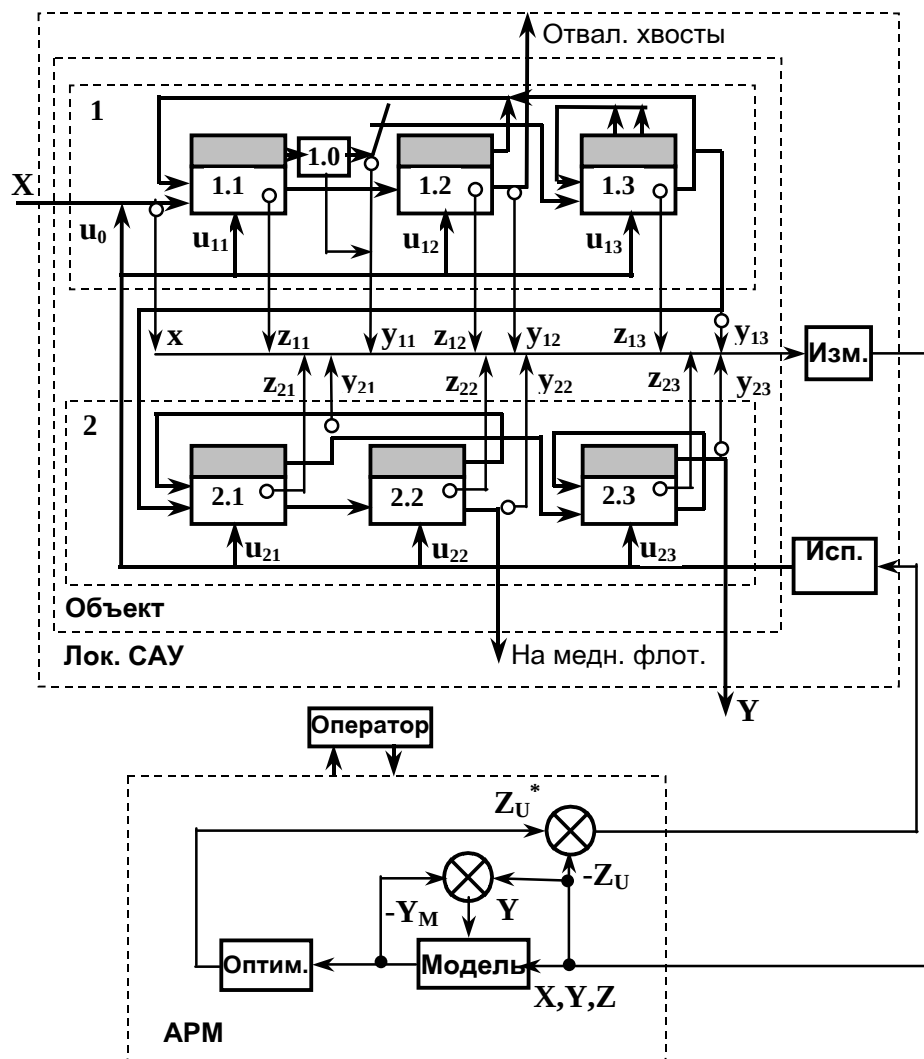


Рис. Функциональная схема системы распределенного управления флотационным процессом:

1.1–1.3, 2.1–2.3 – флотмашины (затемненной частью показана пена);

1.0 – аппаратура доизмельчения

Таким образом, флотационный процесс можно представить как объект с распределенными в пространстве параметрами, где к входным $\mathbf{X}$ относятся физико-химические параметры поступающей на флотацию пульпы, к выходным $\mathbf{Y}=\{\mathbf{y}_{ij}\}$ – качественные параметры чернового и конечного концентратов и хвостов флотации, а также количественные показатели конечного концентрата, к режимным $\mathbf{Z}=\{\mathbf{z}_{ij}\}$ – остаточные концентрации реагентов, а к управляющим $\mathbf{U}=\{\mathbf{u}_{ij}\}$ – расходы этих реагентов ($i=1,2$; $j=1,2,3$). При наличии соответствующих измерительных и исполнительных устройств можно организовать систему локального автоматического управления (САУ) многомерным объектом с распределенными параметрами по схеме рисунка.

С целью оптимального управления процессом флотации необходимо построить математическую модель процесса, оптимизировать выбранный критерий и определить оптимальные уставки $\mathbf{Z}^* = \{\mathbf{z}_{ij}^*\}$ остаточных концентраций реагентов.

Ввиду случайного характера входных параметров и сложности математического описания всего многообразия механизмов флотации целесообразно построить математическую модель статистическими методами на основании данных наблюдений [1]. Обработка имеющейся базы данных наблюдений за двенадцатью входными и режимными переменными с помощью пакета Statistika показала, что плотности распределений всех существенных переменных, характеризующих флотационный процесс, близки к нормальному закону. Построение математической модели предлагается осуществить методом группового учета аргументов (МГУА), который применим для базы данных с любым законом распределений переменных [3]. Исходные данные разбиваются на обучающую и проверочную последовательности с числом наблюдений, соответственно, k и k_1 . Обучающая последовательность используется для оптимизации оценок коэффициентов регрессии, проверочная – для уточнения числа членов и степени уравнения регрессии. Это позволяет получить наиболее регулярное решение, мало чувствительное к небольшим изменениям исходных данных, с наименьшей ошибкой на новых точках наблюдений. В качестве критериев селекции выбраны регулярность и коэффициент корреляции. Модели, найденные по этим критериям, являются оптимальными, как следует из [3, 4].

Полное описание объекта

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

с p существенными переменными x_i заменяется несколькими рядами частных описаний, каждое из которых является функцией только двух аргументов. Первый ряд селекции состоит из $s = C_n^2$ уравнений:

$$y_1=f(x_1,x_2); y_2=f(x_1,x_3); \dots ; y_s=f(x_{n-1},x_n),$$

из которых отбираются p наиболее регулярных моделей, удовлетворяющих критерию минимума среднеквадратической ошибки, измеренной на проверочной последовательности:

$$\Delta_p^2 = \sum_{i=1}^{k_1} (y_i - y_i^*)^2 / k_1 ,$$

$$\delta_p^2 = 100 \left[\sum_{i=1}^{k1} (y_i - y_i^*)^2 \right] / \sum_{i=1}^{k1} y_i^2, \% \quad (2)$$

где Δ_p , δ_p – соответственно абсолютная и относительная среднеквадратические ошибки на проверочной последовательности; y_i , y_i^* – значение прогноза и действительное значение выхода в i -й точке.

Одновременно определяется и коэффициент корреляции:

$$R_{y,y^*} = \left(\sum_{i=1}^{k1} y_i y_i^* \right) / \left(\sum_{i=1}^{k1} y_i^2 \sum_{i=1}^{k1} y_i^{*2} \right)^{1/2}.$$

Во втором ряду селекции выходные переменные первого ряда снова объединяют в пары и получают более сложные модели этого уровня.

Селекция по рядам продолжается до тех пор, пока критерий (2) не достигает минимума. В последнем ряду выбирается одна оптимальная по заданному критерию модель. Таким образом, из ряда в ряд при помощи пороговых отборов пропускается только некоторое количество самых регулярных переменных. Изменением величины порога можно добиться повышения регулярности и достоверности модели. Исключая промежуточные переменные, получаем аналог полного описания (1).

Предварительные исследования [5] показали, что специфическим требованиям описания процесса флотации КОФ наиболее полно удовлетворяют иерархические математические модели квадратичной формы:

$$y_{vk} = \xi_{vk}^T Q_{vk} \xi_{vk} + p_{vk}^T \xi_{vk} + c_{vk}, \quad (3)$$

где y_{vk} – k -я модель v -го уровня; $k = \overline{1, n}$; $v = \overline{1, m}$; n – количество независимых существенных переменных; m – количество уровней иерархий,

$$\xi_{vk} = \begin{cases} [x_r; x_s]^T & (r \neq s), \text{ при } v = 1; \ x_r, x_s \in \mathbf{X}, \mathbf{Z}; \\ [y_{v-1,r}; y_{v-1,s}]^T & (r \neq s), \text{ при } v = \overline{2, m}; \end{cases}$$

$Q_{vk} = \text{diag}\{q_{vkrs}\}$ – квадратичная матрица $2(2)$; $p_{vk} = [p_{vkr}; p_{vks}]^T$;

$q_{vkrs}, p_{vkr}, p_{vks}, c_{vk}$ – коэффициенты регрессии k -й модели (v -го уровня; $r, s = \overline{1, n}$; на последнем уровне ($=m$) выделяется одна модель y_m).

Возможность постепенного “вертикального нарастания” сложности в МГУА обеспечивает реализацию принципа адекватности модели: по минимуму критерия селекции определяется модель оптимальной сложности, адекватная объекту.

Выбирая в качестве модели y_m различные технико-экономические показатели эффективности производства (например, содержание молибдена в концентрате, извлечение молибдена в концентрат, прибыль от реализации продукции и др.) как целевые функции, можно поставить всевозможные оптимизационные задачи, например:

1. Максимизация функции цели по входным параметрам и определение оптимальных настроек этих параметров

$$\max_x y_m \Rightarrow x^* . \quad (4)$$

2. Максимизация функции цели по режимным параметрам и определение оптимальных настроек остаточных концентраций реагентов

$$\max_z y_m \Rightarrow Z^* . \quad (5)$$

Задача (4) представляет интерес с точки зрения коррекции технологических настроек входных x параметров, например, таких, как содержание полезного компонента в исходной руде, обеспечиваемое предварительной шихтовкой, гранулометрический состав измельченной руды в пульпе и др., а результаты задачи (5) помогут настроить оптимальный с точки зрения выбранного критерия реагентный режим z^* при отклонениях значений входных параметров от номинальных технологических.

Все возникающие оптимизационные задачи в соответствии с моделью (3) сводятся к задачам нелинейного программирования с ограничениями на нижние и верхние пределы оптимизируемых переменных (x или z), которые для нормального закона распределения этих переменных определяются с доверительной вероятностью 95% из соотношения

$$m \pm 1,96s,$$

где m , s – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение переменных в выборке.

Управление процессом и наблюдение за его ходом осуществляется с автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора (см. рис.), представляющего собой компьютер, входные и выходные порты которого подсоединены соответственно к измерительным и исполнительным устройствам, при наличии таковых. В случае их отсутствия информация о переменных, характеризующих процесс, может быть введена в компьютер вручную. В настоящее время на КОФ из-за отсутствия средств измерений параметров на потоке информацию о параметрах получают в основном путем лабораторного анализа.

АРМ может функционировать в операционной системе Windows 95 и выше и содержит программы “Модель” и “Оптимизация”. Программа “Модель” реализована посредством инструментальной среды программирования Visual C++ 6.0 и позволяет:

- накапливать текущие значения параметров процесса, осреднять их за смену и записывать в буферную память;
- строить модель (2) МГУА по среднесменным данным 40 – 50 наблюдений;
- осуществлять прогноз показателей производства при вариации входных и управляющих параметров;
- контролировать адекватность действующей модели текущему процессу.

Программа “Оптимизация” осуществляется в среде MS Excel, выбор которой обусловлен не только наличием дружественного интерфейса, но и выходными формами модели МГУА, полученными с помощью программы “Модель” на языке C++, которые представляются в текстовом файле, а числовые данные отделяются знаками табуляции и легко переносятся в табличные страницы программы MS Excel. Далее в среде MS Excel выполняется решение задачи оптимизации.

Для организации взаимодействия пользователя с пакетами программ разработан удобный интерфейс, содержащий современные органы управления

программой: иерархические выпадающие меню, диалоговые окна, электронные таблицы. Оператор имеет возможность:

- наблюдать за ходом процесса посредством поступающих на экран значений параметров;
- задавать построение модели в автоматическом режиме или по внешней команде;
- выбирать функцию цели для оптимизации;
- задавать внешние или оптимальные уставки САУ.

В соответствии с отклонениями текущих значений остаточных концентраций реагентов от оптимальных уставок, определяемых с помощью программы “Оптимизация”, исполнительными устройствами осуществляется управление расходом реагентов в каждой операции.

Как показали предварительные расчеты [4], при оптимальном управлении процессом флотации молибденовой руды на КОФ ожидается увеличение прибыли производства примерно на 10% и увеличение извлечения молибдена в концентрат на 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокер Л.В., Швиденко А.А.** Управление параметрами флотации. - М.: Недра, 1979. – 232 с.
2. Технологическая инструкция Каджаранской обогатительной фабрики. - Ереван – Каджаран, 1981. – 88 с.
3. **Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: Радио и связь, 1981. - 120 с.
4. **Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Дмитров В.Д.** Принятие решения на основе самоорганизации. - М.: Сов. радио, 1976. - 280 с.
5. **Кюрегян С.Г., Абгарян С.В., Баласанян С.Ш.** Моделирование и оптимизация флотационного процесса обогащения молибденовой руды // Труды Международной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии». - Ереван, 1999. – С. 481.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.07.2001.

**Ս.Գ.ԿՅՈՒՐԵԴՅԱՆ, Բ.Մ.ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Վ.Կ.ՇՄԵԼՅՈՎ, Ս.Վ.ԱԲԳԱՐՅԱՆ,
Ս.Շ.ԲԱԼԱՍՅԱՆՅԱՆ**

**ՄՈԼԻԲԴԵՆԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԻ ՀԱՐՍՏԱՑՄԱՆ ՖԼՈՏԱՑԻՈՆ ԳՈՐԾՈՆԹԱՅԻ
ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԼ**

Քաջարանի պղնձամոլիբդենային հարստացուցիչ ֆաբրիկայի հանքահարստացման տեխնոլոգիական գործընթացը ներկայացված է որպես բաշխված պարամետրերով բազմաչափ ղեկավարման օբյեկտ: Գործընթացի ավտոմատացված ղեկավարում կազմակերպելու նպատակով կառուցված են մաթեմատիկական մոդելներ, որոշված են գործընթացի պարամետրերի օպտիմալ լարքերը և օպերատորի ավտոմատացված աշխատանքային տեղի ֆունկցիաները:

**S.G. KYUREGHYAN, B.M. MAMIKONYAN, V.K. SHMELEV,
S.V. ABGARYAN, S.Sh. BALASSANYAN**

**ON FLOTATION PROCESS CONTROL PROBLEM FOR MOLYBDENUM
ORE DRESSING**

The technological process of flotation copper-molybdenum ore dressing in Kajaran concentrating mill is presented by multivariate object of control with distributed parameters. To organize automated process control, mathematical models are constructed, optimum adjustments of process parameters and functions of the operator's working place are determined.