

УДК 622.765

Л. Батаа, В.М. Авдохин

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ КОЛЛЕКТИВНОЙ
И СЕЛЕКТИВНОЙ ФЛОТАЦИИ НА ОСНОВЕ
ОПЕРАТИВНОГО РЕНТГЕНОФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО
АНАЛИЗА ПУЛЬПЫ**

Семинар № 22

Эффективное управление и контроль технологических процессов переработки руд невозможны без достоверного и непрерывного экспресс-анализа элементного состава продуктов обогащения.

Целесообразно выделить главные направления, на которых адекватное применение поточных рентгенофлюоресцентных анализаторов обеспечит максимальный эффект.

1. Оперативный мониторинг качества руды, поступающей с горного цеха.

2. Оперативный мониторинг сортности руды, поступающей на обогатительный передел.

3. Оперативный мониторинг технологических показателей обогатительных операций.

4. Оперативный мониторинг качества товарных концентратов.

Оперативный мониторинг качества руды, поступающей с горного цеха среди прочих задач предполагает измерение содержаний ценных и примесных компонентов. Как правило, в руде устанавливается плановое содержание и интервал варьирования содержания ценного компонента (или компонентов). Снижение, впрочем, как и увеличение среднего содержания ценного компонента относительно планового ведет к неэффективной работе всего горно-обогатительного

комплекса, либо за счет снижения выпуска готовой продукции и увеличения издержек производства, либо за счет неизбежного снижения показателей «будущих периодов» отработки месторождения.

Функционирование системы управления качеством продукции горного цеха предполагает использование оперативного анализа элементного состава руды, подаваемой на фабрику. Возможными точками контроля являются кучи добытой руды, транспортируемая самосвалами руда, перегружаемая транспортерами руда в пределах 1 стадии дробления обогатительной фабрики. В настоящее время разработаны приборы для оперативного анализа добытой горной массы, представляющие собой переносные рентгенофлюоресцентные анализаторы с источником излучения в виде изотопа [1] или рентгеновской трубки [2]. Увеличение диаметра пучка рентгеновского излучения делает анализ более представительным и сокращает время опробования до 5-10 минут. Существенным нерешенным вопросом является механизация процесса измерений, необходимая как для сокращения ручного труда, так и обеспечения требований безопасности.

Именно последнее обстоятельство обуславливает перенесение точки

контроля на руду, находящуюся в самосвалах, или на руду на конвейерах. Анализ руды на конвейере с одной стороны означает снижение эффективности управления ее качеством, но с другой стороны позволяет исключить ручной труд и соблюдать все требования техники безопасности для обслуживающего персонала. Принципиальным условием применимости рентгенофлуоресцентных анализаторов для мониторинга элементного состава руды на конвейере является обеспечение необходимой точности измерений. Вопрос обоснованного выбора методов контроля и типов анализаторов имеет решающее значение при построении эффективной системы управления технологическим процессом [3].

Задачи оперативного мониторинга элементного состава руды, и продуктов обогащения в виде пульпы решаются с применением рентгенофлуоресцентных анализаторов в течение последних 40 лет. Выявились два направления решения поставленной задачи: анализ специально отобранных проб технологических продуктов и анализ продуктов непосредственно в технологических потоках. Последнее направление особенно актуально для средних и больших обогатительных фабрик и в значительной мере решено зарубежными и отечественными предприятиями. Использование результатов элементного анализа твердой фазы измельченной руды и продуктов обогащения осуществляется технологическим персоналом для субъективного управления технологическим процессом или автоматизированными системами управления технологическими процессами, использующими принципы детерминированного или стохастического управления.

На рисунке и в табл. 1 представлена структурная схема управления и

технологическая карта автоматизированной системы аналитического контроля состава твердого основных продуктов процесса коллективной флотации на обогатительной фабрике СП «Эрдэнэт».

Применение системы контроля обеспечивает функционирование системы интеллектуального управления процессом флотации [4]. Логическое управление может осуществляться в автоматическом или полуавтоматическом режиме и предполагает выбор оптимальных решений на основе обработки информации о прежнем функционировании процесса обогащения. В массив исходных данных включены расходы реагентов, переработка руды, крупность измельчения и т.д. Подпрограммы мониторинга отдельных узлов схемы работают с взаимной оценкой и корректировкой решений.

Базовая настройка может производиться на основе оценки сортности перерабатываемой руды. Оценка сортности руды производится на основании значений контролируемых параметров процесса: содержаниями основных и попутных металлов, ионно-молекулярным составом жидкой фазы, другими параметрами. Методическая основа оценки сортности руды - многомерная математическая модель процесса флотации.

Процесс определения сортности руд заключается в определении массовых долей руд выделенных типов в руде, поступающей на переработку. Метод расчета предполагает измерение отклонений параметров руды поступающей на переработку от параметров типовых сортов руд S1..S4. Обратные величины к параметрам S1..S4 D1...D4 характеризуют сходство руды к выделенным типам руд 1...4. Нормировка величин D1...D4 позволяет рассчитать массовые доли

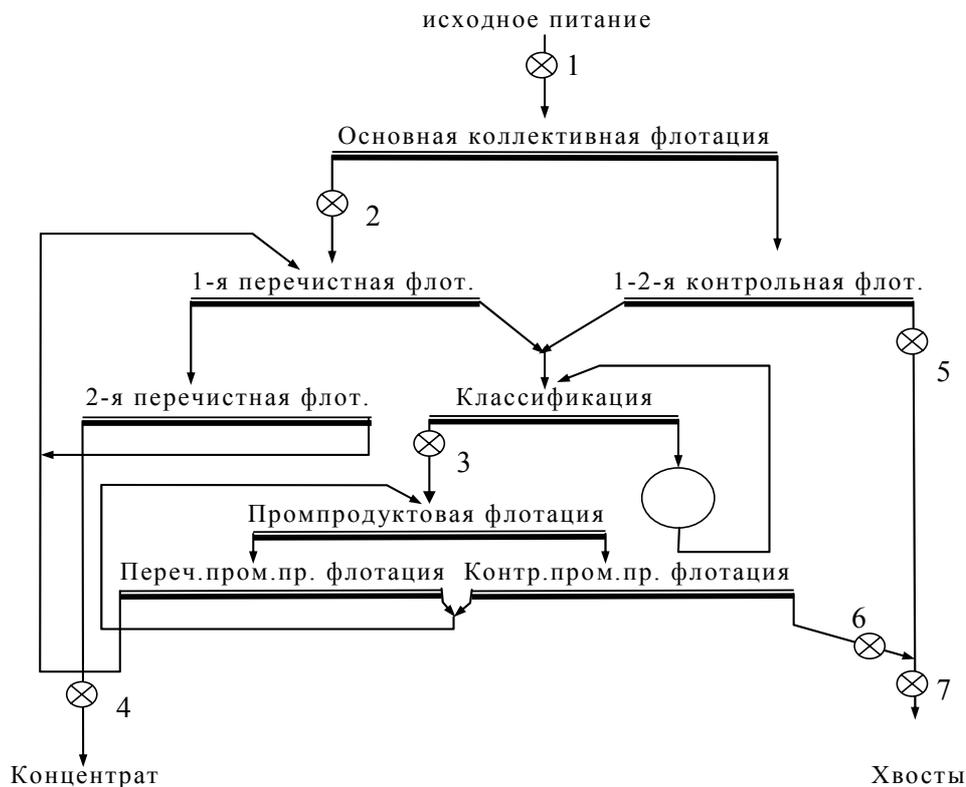


Рис. 1. Схема установки датчиков состава, плотности и расхода пульпы в схеме коллективной медно-молибденовой флотации:

⊗ - анализатор содержания металлов и плотности пульпы;

Таблица 1
Карта контроля параметров коллективной медно-молибденовой флотации

№	Продукт схемы	Параметры твердой фазы	Средства контроля	Периодичность анализа
1	Пульпа после измельчения	$\alpha_{Me}; \rho;$	РФА	непрер.
2	Концентрат основной колл. флотации	$\theta_{Me};$	РФА	непрер.
3	Питание промпрод. флотации	$\beta_{Me}; \rho;$	РФА	непрер.
4	Коллективный концентрат	$\beta_{Me};$	РФА	непрер.
5	Хвосты контр. флотации	$\beta_{Me};$	РФА	непрер.
6	Хвосты промпрод. цикла	$\theta_{Me};$	РФА	непрер.
7	Хвосты общие	$\theta_{Me};$	РФА	непрер.

руд 1–4 в руде, т.е. определить сортность руды [5].

Адаптивно-детерминированный метод управления включает регули-

рование на двух уровнях. Нижний уровень регулирования проводит регулирование расходов реагентов на основе контроля ионного состава

жидкой фазы пульпы. Задачей регулирования является поддержание в жидкой фазе пульпы заданного значения щелочности пульпы (рН, СаО). В работе [6] для коллективной медно-молибденовой флотации весьма важным параметром является извлечение пирита в коллективный концентрат, что обусловлено снижением качества медного и молибденового товарных концентратов, или увеличение расходов, связанных с удалением пирита. Критерий оптимизации в этом случае приобретает следующий вид [6]:

$$Q_t = \varepsilon_{Cu}^* \Pi_{Cu} \alpha_{Cu} + \varepsilon_{Mo}^* \Pi_{Mo} \alpha_{Mo} + \varepsilon_{Py} \Pi_{Py} \alpha_{Py}, \quad (1)$$

где ε , ε^* , Π , α - соответственно: извлечение в коллективный медно-молибденовый концентрат, потери, условная цена и содержание в исходной руде меди (Cu), молибдена (Mo), пирита (Py).

Цена металла в концентрате является функцией от содержания основного металла и примесей (β_{Me1}). Этот критерий эффективен для коллективных циклов флотации для руд с относительно постоянным составом, когда потери ценных компонентов обратно пропорциональны стоимости извлекаемых компонентов.

Недостаток предлагаемых критериев для оценки эффективности технологического процесса заключается в том, что они не позволяют учесть обогатимость различных типов руды. Так, сравнивая трудно- и легкообогащаемые руды по этим критериям можно сделать заключение о различном уровне неизвлекаемых потерь, обусловленных с нахождением ценных компонентов в форме силикатов или недостаточным раскрытием сростков. В условиях переработки нескольких сортов руд уровень потерь ценных компонентов будет связан как с неоптимальностью технологического ре-

жима, так и с изменением состава руды текущей добычи. Другим фактором является необходимость выдерживания задания по качеству концентрата, что особенно важно для селективных циклов флотации.

В таких условиях следует совершенствовать методику и критерий оценки эффективности технологического процесса. Исходной посылкой является введение в уравнение параметров оптимального извлечения ценного компонента (ε^{opt}) и качества концентрата (β^{opt}). Для коллективного цикла флотации модернизированная функция критерия оптимизации приобретает вид:

$$Q_t = (\varepsilon^* - \varepsilon^{opt})_{Cu} \Pi_{Cu} \alpha_{Cu} + (\varepsilon^* - \varepsilon^{opt})_{Mo} \Pi_{Mo} \alpha_{Mo} + (\varepsilon^* - \varepsilon^{opt})_{Py} \Pi_{Py} \alpha_{Py} \quad (2)$$

Для цикла разделения коллективного концентрата предлагается использовать следующий комплексный критерий оптимизации:

$$Q_t = (\varepsilon - \varepsilon^{opt})_{Cu} \Pi_{Cu} \alpha_{Cu} + (\varepsilon - \varepsilon^{opt})_{Mo} \Pi_{Mo} \alpha_{Mo} + \varepsilon_{Cu} \alpha_{Cu} (\beta - \beta^{opt})_{Cu} K_{Cu} + \varepsilon_{Mo} \alpha_{Mo} (\beta - \beta^{opt})_{Mo} K_{Mo}, \quad (3)$$

где K - коэффициент, учитывающий стоимостные потери при снижении качества концентрата относительно плановых (контрактных).

Предложенные технические решения являются базовыми. При необходимости могут быть внесены изменения как в сторону упрощения системы и алгоритма с одновременным уменьшением количества решаемых задач, так и в сторону усложнения системы и алгоритма с одновременным увеличением количества решаемых задач.

В процессе эксплуатации систем на предприятии и в результате проведенного сравнительного испытания установлены, что частота анализа в каждой контролируемой точке не обеспечивает требуемой достоверности и оперативности контроля. Кроме

того, из-за частых отказов пробоотборников, формирователей, делителей проб и других факторов, погрешность определения содержания элементов в пульпе колеблется в пределах от -5 % до +5 %. При этом имеют место частые выбросы результатов анализа за допустимые пределы погрешности измерений, что свидетельствует о нестабильности их работы и делает их практически неприменимыми в системе управления с оптимизацией технологического процесса.

При отказах анализатора или системы отбора и доставки проб исключаются из оперативного анализа все точки контроля технологического потока пульпы, на которые задействована данная аналитическая система, т.е. отсутствует на время отказа оперативная информация о состоянии технологического процесса 1-2-х секциях обогатительной фабрики одновременно.

Системы сложны в эксплуатации, требует практически постоянного присутствия высококвалифицированных специалистов для поддержания их в работоспособном состоянии, и имеют высокую эксплуатационную стоимость.

Поочередное пропускание различных продуктов имеющих разные содержания анализируемых элементов через одну и ту же измерительную ювету, несмотря на промывку водой, "сглаживает" результаты измерения и, как правило, анализ содержания элементов в хвостах бывает завышенным.

В связи с вышеперечисленными недостатками эксплуатирующихся методов и систем аналитического контроля, возникла необходимость рассмотрения других альтернативных методов контроля и типов анализаторов с более высокими показателями по надежности, эргономичности, имеющих достаточную оперативность при

выдаче результатов анализа в каждой контролируемой точке и положительно зарекомендовавших себя на зарубежных предприятиях.

В качестве альтернативных, были изучены анализаторы «XRA-1600» фирмы «Svedala Autometrics» (Денвер, США) и «AMDEL-ISA» фирмы «Thermo-gamma metrics» (Австралия).

Анализаторы «AP-31», «Courier-30» и «XRA-1600» применяют в качестве источника рентгеновские трубки с различной мощностью и относятся к анализаторам, основанными как правило, на волнодисперсионном методе анализа. Рентгеновские лучи от пробы проходят через коллиматор или шель и попадают на кристаллический дифрактор, который разлагает лучи на различные углы в зависимости от длины волны или от энергии кванта каждого характеристического излучения. Следовательно, качество аппаратного исполнения и настройки сильно влияет на стабильность показаний анализаторов. Анализаторы, принцип действия которых, основан на волнодисперсионном методе обычно имеют более нестабильное фоновое излучение, чем у анализаторов основанных на энергодисперсионном методе анализа, например, анализатора «Amdel-ISA». Это приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум, увеличению ошибки и необходимости периодической корректировки регрессионных коэффициентов. Хотя у волнодисперсионного метода меньшее время измерений (экспозиция) до достижения теоретической статистической погрешности счета, периодичность выдачи анализов для системы «Courier-30» и «AP-31» составляет 15 и 30 минут, соответственно, т.к. пробоотставка и промывка перед каждым измерением занимает значительно большее время чем непосредственно измерение и обработка аналитическо-

Таблица 2

Сравнительные данные по испытаниям аналитических систем

№	Наименование параметров	Курьер-30	AP-31	Amdel -ISA	PA-931
1	Диапазон определяемых элементов	Ca(Z=20) - U(Z=92)	Ca(Z=20) - U(Z=92)	Ca(Z=20) - U(Z=92)	Ca(Z=20) - U(Z=92)
2	Количество одновременно определяемых элементов	до 5	до 7	до 8	до 4
3	Предельная концентрация обнаружения элемента	0,1%	0,1%	0,07%	0,05%
4	Погрешность аналитической системы	5-10 %	до ± 5 %	2-5%	5%
5	Источник первичного излучения	рентгеновская трубка	рентгеновская трубка	изотоп	рентгеновская трубка
6	Гарантийный срок работы источника первичного излучения	1,2 года	1 месяц	7 лет	1 год
7	Количество контролируемых точек технологического потока	10 через 1 кювету	15 через 1 кювету	1	1
8	Количество выдаваемых результатов анализа по каждой точке контроля за 1 час	4	2	Неогр.	Неогр.
9	Периодичность выдачи анализа по каждой точке контроля	15 мин	30 мин	1 мин	1 мин
10	Количество анализов, выполняемых за 1 час	40(4x10)	30(2x15)	60	60

го сигнала. Источником излучения у энергодисперсионных анализаторов является радиоактивный изотоп. Данный тип анализатора имеет хорошее соотношение сигнал/шум, имеет автоматическую стабилизацию интенсивности источника и работы детектора, благодаря чему точность определения содержания элемента близка к теоретической т.е ошибка не превышает 0,1 %.

Технико-экономический анализ характеристик аналитической системы на основе анализатора «XRA-1600» показывает, что она незначительно отличается от базового варианта и обладает всеми присущими многопоточным анализатором недостатками. Практика эксплуатации и результаты сравнения показывают, что анализатор «AP-31» нестабилен в

работе, имеет большую дискретность выдачи (30 мин) анализа с недостаточной достоверностью. Из-за конструктивных несовершенств он не может быть характеризован как перспективный тип анализатора, на базе которого можно было бы создать эффективную систему контроля и управления технологическим процессом обогащения руд. Однако его невысокая стоимость дает ему определенные преимущества перед зарубежными аналогами.

Окончательный выбор перспективного анализатора может быть сделан только с использованием сравнительной оценки средств контроля. В табл. 2 представлены данные об эффективности датчиков измерения элементного состава руд и продуктов обогащения.

Анализ полученных результатов показывает, что применение анализаторов непрерывного действия «Amdel-ISA» на 1-й секции обогатительной фабрики ГОКа «Эрдэнэт» оказалось весьма эффективным по сравнению с применением анализаторов AP-31 и Courer-30. С использованием анализаторов «Amdel» и PA-931 обеспечивается непрерывный многоэлементный анализ с интервалом до 1 мин, что создает техническую предпосылку полностью автоматизировать управление технологическим процессом обогатительной фабрики. Анализатор «Amdel-ISA» имеет повышенную сис-

темную надежность, т.к. отказ отдельного анализатора приводит к потере анализа только в одной контролируемой точке, а не целом по секциям. Упрощается технический состав системы экспресс анализа за счет исключения системы отбора и доставки проб; снижаются эксплуатационные затраты и требования к квалификации обслуживающего персонала; и т.д. на сегодняшний день на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт» базой для функционирования системы выбраны 14 поточных анализаторов «Amdel» фирмы «Termogammamatrix».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uhlig S. Process control by modern X-ray fluorescence (XRF) analysis. // Proc. of the XX international mineral processing congress, Germany, -1997, p.175-182.
2. Hyotyniemi H., Koskinen K., Saloheimo K. Calibration of an X-ray fluorescence analyzer using clustered components // Future Trends in automation in mineral and metal processing. – Preprints of IFAC Workshop, Finland, 22-24 August 2000. – IFAC, Copy-set Oy, Helsinki, 2000. – p.219-224.
3. Авдохин В.М., Морозов В.В., Гановичев А.И. Контроль технологических свойств минералов и оборотных вод в замкнутых циклах обогащения полиметаллических руд // Материалы 20-го международного конгресса по обогащению полезных ископаемых, Аахен, 1997. – XX, Aachen.: IMPC, 1997. –V3. – с. 465-473.
4. Дэлгэрбат Л. Исследование, моделирование и оптимизация процессов измельчения и коллективной флотации медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, Москва, 2002. –№5. – С.226-230.
5. Морозов В.В. Управление процессами обогащения на основе измерения параметров сортности руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – №7. – 2005. –С.316-319
6. Морозов В.В., Авдохин В.М., Столяров В.Ф. Коновалов Н.М. Повышение эффективности флотации с использованием адаптивно-детерминированного метода. Труды симпозиума по обогащению полезных ископаемых, Чесма-Измир, Турция, 5-7 окт. 2004 г. автоматического управления (на англ.). – С. 409-413. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Батаа Л. – Компания «Эрдэнэт», Монголия,
Авдохин В.М. – доктор технических наук, профессор, Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 22 симпозиума «Неделя горняка-2008».

