УДК 622.765

В.В. Морозов, В.В. Рапшис, Дэлгэрбат Лодой, Хурлчулуун Ишген

РАЗВИТИЕ МЕТОДИК ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РУДЫ НА ГОКЕ ЭРДЭНЭТ

Описана усовершенствованная система и методика оценки сортности медно-молибденовой руды на основе результатов измерений ее оптических характеристик. Система включает установленный над конвейером визиометрический анализатор, который позволяет получить в реальном времени информацию о минералогическом составе руды, ее крупности и характере вкрапленности минералов. Описан алгоритм оперативного анализа сортности руды и использования результатов при автоматизированном управлении процессами дробления, измельчения и флотации. Описаны алгоритмы оперативного управления процессами обогащения, основанные на непрерывном визиометрическом анализе проб руды, отбираемых системами аналитического контроля.

Ключевые слова: медно-молибденовые руды, визиометрический анализ, минеральный состав, крупность руды, автоматизированное управление, дробление, измельчение, флотация.

Введение

Перспективным направлением повышения эффективности управления обогатительными процессами является применение методов визиометрического анализа руды и продуктов обогащения. Оптические анализаторы нашли применение с 60-х годов и являются атрибутом современного обогатительного производства. Наиболее часто применяются системы измерения цветовых характеристик, размера и скорости движения пузырьков пены на поверхности флотационной машины [1, 2, 3]. Анализ минерального состава дробленой руды по цветовым характеристикам – относительно новое направление, получившее развитие в результате развития методов и средств получения и расшифровки визуальных изображений руды в видимой части спектра [4, 5]. Другой современной тенденцией является применение визиометрического анализа для оценки крупности дробленой руды [6]. Определение грансостава руды на конвейерах является важным контрольно-измерительной операцией,

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 222–224.

позволяющей оценить правильность ведения технологического процесса дробления и оптимизировать измельчения путем поддержания максимальной производительности мельниц.

Важным преимуществом оптических методов является возможность быстрого измерения параметров состава руды и использования полученной информации для оперативного управления процессами обогащения [7].

Современные системы визиометрического анализа руды

Классические системы визиометрического анализа характеристик руды состоят из осветительного прибора, видеокамеры и процессора [4]. В системе анализа минералогического состава руды, испытанной на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт», предусмотрено специальное приспособление, задачей которого является удаление с поверхности руды шламовых покрытий, неизбежно появляющихся после ее складирования в бункерах [8].

Комплекс «ГРАНИКС», разработанный в Уральском федеральном университете и испытанный на ГОКе «Эрдэнэт», предназначен для оценки гранулометрического состава кусковых сыпучих материалов в технологическом потоке [9]. Комплекс обеспечивает определение размера кусков дробленой руды, расположенных в верхнем слое движущегося конвейера, и обеспечивает оперативный контроль качества дробления на отдельной дробилке или во всей технологической цепочке.

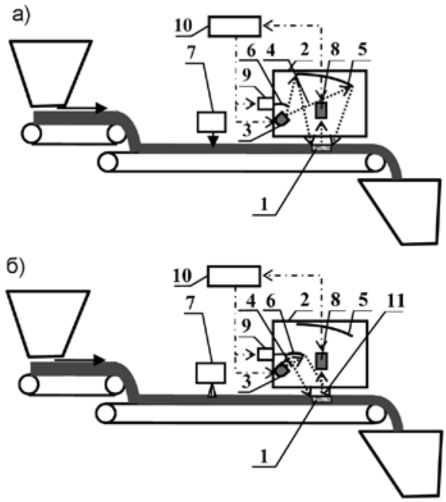

Рис. 1. Схема установки телеметрического анализа крупности и качества руды: а) при анализе минерального состава руды; б) при анализе крупности руды: 1 – зона измерений, 2 – корпус; 3 – источник света; 4, 11 – рассеянный и наклонный световые потоки; 5, 6 – основной и дополнительный отражатели; 7 – брызгало; 8 – цифровая видеокамера; 9 – привод; 10 – контроллер

Одной из причин снижения качества измерений является использование осветительных приспособлений с нестабильным спектром излучения и нестабильной интенсивностью светового потока. Кроме того, решение задач анализа минерального состава и измерения крупности кусков руды проводилось в неоптимальных режимах.

Развитие систем и алгоритма анализа в первую очередь было направлено на расширение функциональных возможностей и повышение точности анализа минерального состава и крупности руды.

Усовершенствованная система визиометрического анализа (рис. 1) включает источник освещения, видеокамеру и вспомогательные приспособления, которые обеспечивают требуемый режим освещения руды и получение информативных изображений поверхности кусков руды, находящихся на конвейере. Система обеспечивает получение изображений руды в двух режимах. Первый режим (рис. 1, *а*) обеспечивает наилучшие условия для минералогического анализа за счет вормирования рассеянного светового потока. Второй режим обеспечивает наилучшие условия для измерения крупности руды за счет контрастного оконтуривания ее отдельных кусков.

Сканирование руды на конвейере осуществляется непрерывно. Получаемая от системы информация обрабатывается и усредняется за заданный промежуток времени (1–3 мин), после чего выдается конечный результат в виде двух видеорядов руды, по которым проводится дальнейший анализ. На основе данных визиометрического анализа в рассеянном свете производится определение массовой доли и размера вкрапленности окисленных минералов, первичных и вторичных сульфидов меди, пирита, кварца, серицита, слюды, и других минералов, присутствие и соотношение которых характеризует сортность руды. На основе данных визиометрического анализа в наклонном световом потоке производится определение размеров кусков руды. Формирование наклонного светового потока обеспечивает высокую точность анализа за счет формирования контрастно очерченных контуров кусков руды.

Алгоритм визиометрического анализа минерального состава руды

Для повышения качества распознавания был использован мультиформатный алгоритм обработки цифрового изображения. В обновленном алгоритме достоверное раздельное определение минералов и в руде проводится с использованием современных форматов распознавания цветного изображения RGB и HSV [10]. Для первичной обработки цветового изобра-

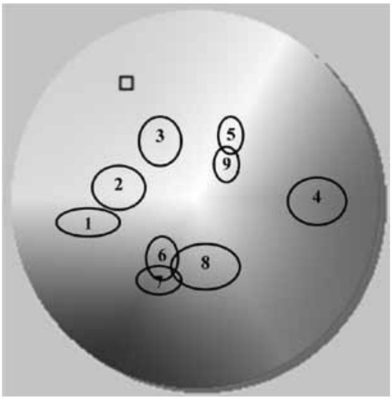

Рис. 2. Цветовые характеристики минералов в формате HSL в координатах «Цветовой тон» – «Насыщенность»: 1 – лазурит; 2 – бирюза; 3 – малахит; 4 – куприт; 5 – халькопирит; 6 – халькозин; 7 – борнит; 8 – ковеллин; 9 – пирит

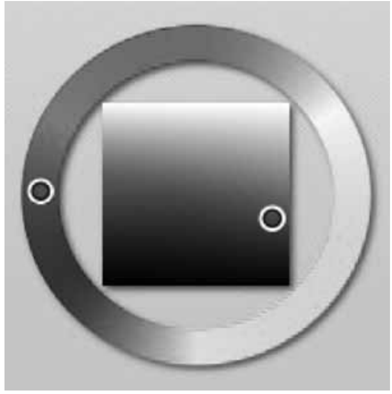

Рис. 3. Цветовые характеристики ковеллина в формате HSL в координатах «Цветовой тон»– «Насыщенность» – «Яркость»

жения наиболее подходящим является формат RGB, преобразующий любой цвет в комбинацию интенсивностей базовых цветов: красного, зеленого и синего. Параметры формата HSV, наиболее важным из которых является спектральные характеристики, насыщенность и яркость, определяются на основе этих трех базовых параметров формата RGB.

Спектральные образы отдельных минералов становятся разрешимыми при использовании двухпараметрической системы распознавания «Цветовой тон – насыщенность» в формате HSV (рис. 2) и при использовании возможностей формата HSV в полном объеме (при трехпараметрическом сегментировании «Цветовой тон – насыщенность» – «Яркость», рис. 3) вероятность определения минералов существенно возрастает и достигает 0,91–0,95 даже для таких сложных систем как халькопирит – пирит или халькозин – ковеллин – борнит.

Наиболее эффективен такой подход при оценке степени окисленности руды. Степень окисленности руды может определяться как соотношение массовой доли меди в окисленных минералах к общей массовой доле меди, рассчитываемой как отношение интегральной интенсивностей спектральных характеристик окисленных минералов к общей интенсивности спектральных характеристик всех медных минералов. Аналогичным образом на основе визиометрического анализа производится определение соотношения первичных и вторичных сульфидов меди, фиксируется наличие и массовая доля талька, слюды, сланцев и других минералов.

Применение планшетного визиометрического анализа руды в процессах подготовки и обогащения руд

При использовании визиометрического анализа на конвейере загрузки бункеров мельниц производится опережающая оценка сортности руды, и могут быть реализованы эффективные алгоритмы автоматизированного управления процессами измельчения и флотации. Имеющийся существенный временной зазор между моментом отбора пробы и подачей руды в технологический процесс позволяет применить методики анализа, предполагающие проведение операций специальной пробоподготовки и планшетного анализа проб руды.

Применение планшетной установки позволяет повысить точность анализа гранулометрического состава руды. В технологии пробоподготовки, представленной на рис. 4, предусмотрено додрабливание руды и анализ представительной пробы, сохранившей информативность по свойствам исходной руды. Анализ тонкодробленной руды оптимален для получения информации о минеральном составе руды, характере распределений ценных компонентов и вкрапленности ценных минералов.

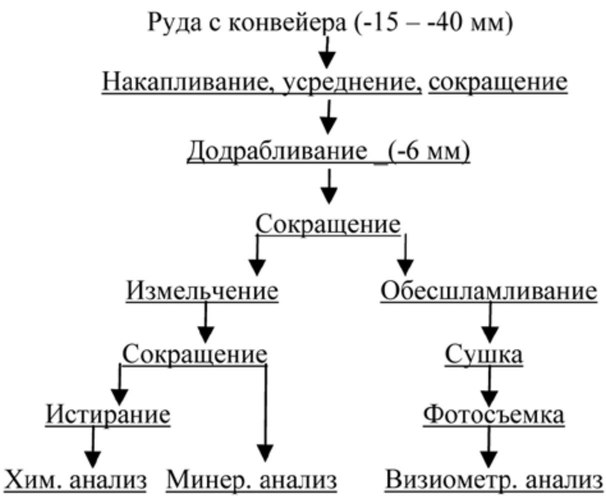

Рис. 4. Принципиальная схема опробования мелкодробленной руды с применением операции визиометрического анализа

Встраивание операции визиометрического анализа в существующую систему отбора и подготовки пробы для ЦИЛ и ОТК весьма удобно, поскольку не требует специальных затрат на отбор пробы.

Выбранная схема подготовки пробы и ее усреднения обеспечивает высокое качество визиометрического анализа. При анализе пробы крупностью – 6 мм соблюдаются наилучшие условия для получения качественных изображений руды, что весьма важно для получения правильных результатов измерений. Одновременно, последовательное снижение крупности и сокращение пробы руды, реализуемое в схемах подготовки проб, позволяет анализировать представительную пробу руды. Это делает получаемые результаты вполне пригодными для задач автоматизированного управления технологическими процессами.

Закономерностью процессов дробления пробы руды является неравномерное распределение минералов по классам крупности. Для подтверждения данной закономерности были проведены опыты по рассеву мелких классов исходной руды, руды после операции мелкого дробления и операции додрабливания.

В качестве сигнальных минералов был выбран халькопирит (ХП), сумма вторичных минералов меди (ВМ) и сумма окисленных минералов меди (ОМ).

Методика исследований предполагала проведение операций с пробой руды, отобранной для проведения технологических испытаний на ГОКе «Эрдэнэт». Исходная проба опробовалась на минеральный состав, дробилась до крупности -10 мм, сокращалась, снова опробовалась, дробилась до крупности -3 мм.

Результаты измерений показывают следующее. В мелкодробленой руде наблюдается концентрирование медных минералов в мелких классах крупности (табл. 1). Наибольшая концентрация характерна для классов – 1 + 0,5 и -0,5 мм (на 10–20%).

Таблица 1

Массовая доля минералов в в классах крупности мелкодробленной руды

Минерал	**Класс крупности**				**Итого**
	-10+3	**-3+1**	**-1+0,5**	**-0,5 +0,0**	
ХП	0,63	0,66	0,67	0,65	0,635
ВМ	0,45	0,48	0,49	0,48	0,454
ОМ	0,111	0,120	0,128	0,133	0,115

Таблица 2

Массовая доля минералов в в классах крупности токодробленной руды

Минерал	**Класс крупности**				**Итого**
	-3+2	**-2+1**	**-1+0,5**	**-0,5 +0**	
ХП	0,63	0,64	0,64	0,64	0,635
ВМ	0,45	0,47	0,48	0,48	0,454
ОМ	0,112	0,116	0,125	0,130	0,114

При дальнейшем додрабливании руды наблюдается тенденция сглаживания отличий в массовой доле минералов отдельных классах крупности. Отклонение концентраций в классах – 1+0,5 и -0,5 мм по медным минералам снижается до 5–14% (табл. 2).

Важным является тот факт, что классы крупности -10 +1 мм и -3 +1 мм хорошо отражает минеральный состав руды в целом.

Выбор представительной массы пробы для анализа руды может быть сделан с использованием классической формуле:

$$m = K \cdot d^2_{\max} \tag{1}$$

где $d_{\max}$ – размер максимальных частиц в пробе, мм; K – коэффициент, зависящий от характера и степени равномерности распределения минерала, в который входит определяемый компонент.

Важным условием высокой точности анализа является получение представительной пробы. Используемая схема последовательного уменьшения крупности руды и сокращения пробы дает удовлетворительные результаты, обеспечивающие хорошую представительность пробы и высокую точность измерений компонентов минерального состава. Не относя руду к разряду однородной по принятой классификации, тем не менее возможно использовать значение коэффициента K в уравнении (1) равным 0,06, характерным для однородных руд [11].

Исходя из полученных значений коэффициента K результаты расчетов была рассчитана масса пробы для визиометриче-

Таблица 3

Расчетные значения массы пробы для визиометрического минерального анализа тонкодробленной медно-молибденовой руды

Размер куска, мм	6	3	1
Масса пробы, кг	3,6	0,9	0,1

ского анализа минерального состава руды при крупности от 1 до 6 мм в интервале от 100 г до 3,6 кг (табл. 3).

Учитывая, что при разовом анализе загружается проба от 100 до 300 г, точность оценки свойств руды методом визиометрического анализа близка к расчетной и достаточна для использования при автоматизированном управлении процессами обогащения.

Управление процессами обогащения по данным визиометрического анализа

Эффективность работы дробилок оценивали по двум параметрам: номинальная крупность руды и содержание класса «+15 мм».

Анализ полученных результатов показывает, что визиометрическое измерение гранулометрических характеристик дробленой руды характеризуется погрешностью измерений относительно анализа методом рассева 7,5%. Данная величина относительно мала, что дает основания рекомендовать методику и прибор для оперативного визиометрического анализа для промышленного использования в операциях дробления для контроля процесса дробления руды. Как видно из рис. 5, в потоке дробленой руды удается диагностировать временные интервалы, характеризующиеся увеличением выхода крупных кусков (до 7% класса +15 мм), что свидетельствует о нарушении параметров работы дробилок (увеличении разгрузочной щели) или поступления особо крепких руд.

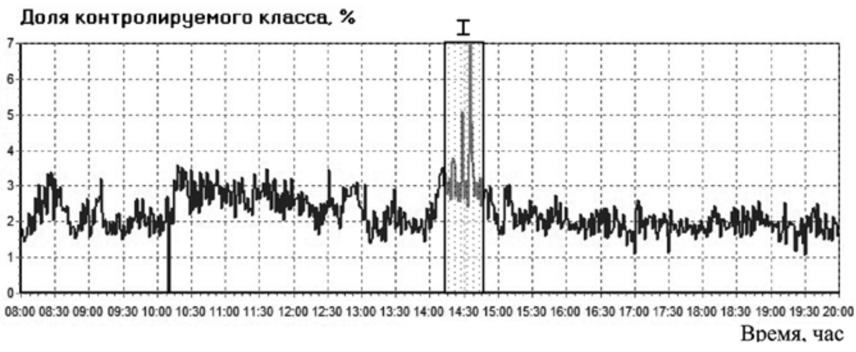

Рис. 5. Результаты анализа выхода класса +15 мм в разгрузке дробилок мелкого дробления. I – временной интервал разрегулирования работы дробилок (попадание крупных кусков и увеличение выхода класса +15 мм более 3%)

По данным результатов измерений было принято решение о целесообразности изменения параметров процесса дробления. Регулировка дробления была произведена в 14–45 путем уменьшения разгрузочной щели дробилки (рис. 5).

В результате доля класса + 15 мм вернулась к уровню 2%, что соответствует оптимальным условиям для процесса измельчения. Применение разработанного метода обеспечивает рост производительности цикла измельчения на 1,5% и стабилизации качества измельченной руды.

Управление качеством руды по данным оперативного анализа вещественного и минерального состава руды предусматривает как управление усреднением руды в потоке, так и разделением первичного потока на потоки преимущественно сульфидных и преимущественно смешанных руд [12]. Первой стадией анализа является отбор пробы и проведение анализа руды (рис. 6).

В зависимости от значений указанных параметров на ГОКе «Эрдэнэт» формируют потоки окисленной руды, направляемой на выщелачивание, первичной и смешанной руды, направляемых на обогащение.

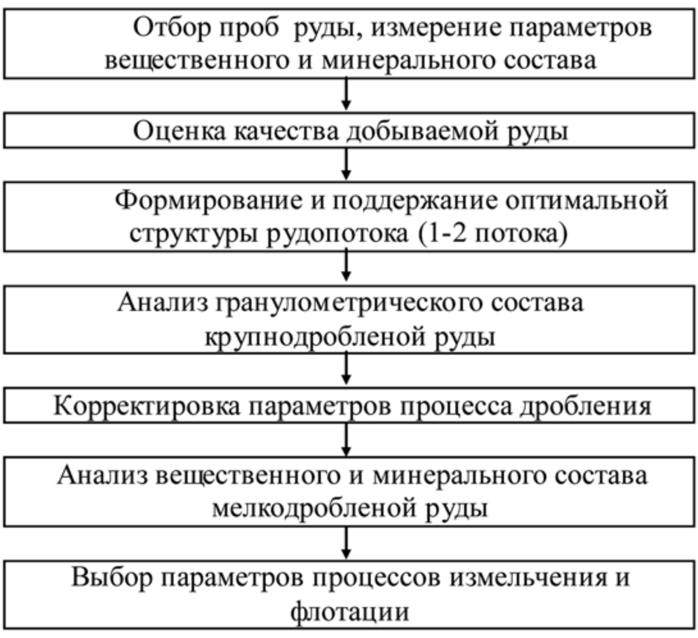

Рис. 6. Алгоритм управления процессами обогащения с использованием визиометрического анализа

Технологический регламент предполагает перерабатывать руды с окисленностью до 3,5% по режиму обогащения первичных руд, а руду с окисленностью более 3,5% – по режиму обогащения смешанных руд. Руды с окисленностью более 20% направляются на кислотное выщелачивание.

Первый рудопоток формируется из первичных массивных руд и бедных пиритистых руд. Эти руды характеризуются высокой прочностью, и тонкой вкрапленностью минералов ценных компонентов. Второй рудопоток формируется из смешанных руд (окисленных, вторичных и серитизированных). Эти руды характеризуются существенно большим размером вкраплений ценных компонентов, повышенной адсорбционной способностью относительно флотационных реагентов и меньшей прочностью.

Руда отдельного технологического потока также подвержена относительно сильным колебаниям состава и технологических свойств. Это обусловлено как ограниченностью маневрирования потоками руды вследствие общих ограничений по производительности отдельных технологических цепочек, так и погрешностями опробования массы добытой руды. Нестабильность состава и свойств руды, поступающей на фабрику по одному технологическому потоку, обуславливает необходимость оценки ее сортности и выбора режима процессов измельчения и флотации.

При поступлении руды на флотацию необходимо определить вклад (массовую долю) каждого типа руды в поступившую руду. Математическая модель задачи обеспечивает расчет принадлежности поступившей руды по шести – семи значимым параметрам элементного и минерального состава руды.

С использованием данных о сортности руды проводится выбор базового технологического режима измельчения и флотации. Под базовым режимом понимается совокупность предустановленных функций *SF* в контурах регулирования основных технологических параметров процессов измельчения и флотации: производительности, крупности измельчения, расходов реагентов и т.д.

Значение отдельной целевой функции *SF* для каждого процесса рассчитывается как взвешенное среднее этих параметров для каждого стандартного сорта руды (SF_i) из уравнения

$$SF = \Sigma\gamma_i \, SF_i, \qquad (2)$$

где γ_i – относительная массовая доля руды *I*-го типа в поступающей на переработку смеси руд, доли ед.

Таблица 4

Предустановленные функции в системах управления процессами измельчения и флотапции

№	Параметр процесса – предустановленная функция	МПР	СВСР	БПР	СОР	ССР
1	Крупность измельчения, % класс – 74 мкм	67,5	64,5	67,0	66,0	66,0
2	Подача руды на мельницу т/м^{3}ч	1,65	1,74	1,71	1,75	1,75
3	Плотность пульпы %	43,5	41,0	41,5	40,0	40,0
4	Расход собирателя AeroMX-5140	10,0	12,0	13,0	17,5	10,0
5	Расход вспенивателя МИБК	13,0	16,0	16,0	19,0	13,0
6	Расход извести	1100	1300	1300	1300	1100
МПР – массивные первичные руды; – СВСР – смешанные вторично сульфидизированные руды; – БПР – бедные пиритизованные руды); ССР – смешанные серитизированные руды; СОР – смешанные окисленные руды						

При расчете расходов реагентов учитываются эффекты влияния при совместной переработке руд различных технологических типов.

Предустановленные функции используются в качестве базового уровня в локальных системах автоматического регулирования процесса измельчения и флотации. Использование процедуры определения класса руды повышает устойчивость автоматического управления.

Для расчета оптимальных параметров измельчения и флотации различных сортов руды на ГОКе «Эрдэнэт» были проведены исследования на наиболее ярко выраженных пробах типовых руд и определены режимные карты процессов их измельчения и флотации. Учитывая невозможность получения проб, представляющих руду заданного сорта, проводилась статистическая обработка результатов и моделирование режимов обогащения типовых руд.

Пример результатов оптимальных параметров измельчения и флотации различных сортов руд представлен в табл. 4.

Данные табл. 4 использовались для расчета соответствующих значения предустановленныхь функций для переработки смешанных руд. Результаты показали, что при использовании алгоритма управления технологическими процессами флотации на основе оценки сортности руды было достигнуто увеличение извлечения меди и молибдена в концентраты на 0,3% и 1,1%, повышение качества получаемых концентратов.

Заключение

Развитие систем и алгоритма визиометрического анализа качества руды и обеспечивает повышение точности анализа и эффективности управления процессами обогащения. Поставленная задача решается на основе совершенствования техники для визиометрического анализа, а также применения современных алгоритмов распознавания цветного изображения.

Результаты анализа крупности и сортности руды применяются для расчета значений параметров технологического процессов дробления, измельчения и флотации на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт». Применение разработок обеспечивает рост производительности цикла измельчения и увеличение извлечения меди и молибдена в концентраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hyotyniemi H., Ylinen R.* Modelling of visual flotation froth data // Automation in mining, mineral and metal processing 1998. — Preprints of a 9th IFACSymposium, Cologn, Germany, 1–3 Sept. 1998. — Pergamon, 1998. – pp. 309–314.

2. *Мойланен Я., Тимпери Ю., Кемппинен Х.* Принципы компьютерного управления флотационным процессом на базе новой продукции Outotec — видеосистемы Frothmaster // Известия вузов. Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 89–92.

3. *Haavisto O., Kaartinen J., Hyötyniemi H.* Optical spectrum based estimation of grades in mineral flotation // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology. Mumbai, India. 2006. — Pp. 252–253.

4. *Sbárbaro D., Villar R.* Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants. — Springer-Verlag London Limited, 2010. — 332 p.

5. *Morozov V. V., Ganbaatar Z., Delgerbat L., Bokányi L., Stoliarov V. F.* Advanced system for control milling and flotation processes based on an estimation of ore quality grade, Advanced materials research, 2012, 651. — Pp. 981–985.

6. *Zelin Zhang, Jianguo Yang, Dongyang Dou*. A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 50(2), 2014. — Pp. 591–605.

7. *Olli Haavisto, Jani Kaartinen, and Heikki Hyötyniemi*. 2006. Optical spectrum based estimation of grades in mineral flotation. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2006). Mumbai, India. — 2006. — Pp. 2529–2534.

8. *Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л., Дуда А. М., Морозов В. В.* Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе комплексного радио-

метрического анализа руды / Материалы международной конференции «Плаксинские чтения», Екатеринбург, 2011. — С. 118—121.
9. *Хурэлчулуун И., Круглов В. Н.* Промышленные испытания и модернизация системы измерения крупности дробленой руды «ГРАНИКС».
10. *Agoston, Max K.* Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms. London: Springer, 2005. — 386 p.
11. *Рапшис В. В.* Определение условий визиометрического анализа руд / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Труды Международной конференции. — Екатеринбург, 2015. — С. 15—20.
12. *Morozov V., Davaasambuu D., Ganbaatar Z., Delgerbat L., Topchaev V., Sokolov I., Stolyarov V.* Modern systems of automatic control of processes of grinding and flotation of copper-molybdenum ore. In: 16th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing, Volume 15, Part1, IFAC (ed.), 2013. — Pp. 166—171. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Морозов В.В.[1] — доктор технических наук, профессор,
Рапшис В.В.[1] — аспирант,
Дэлгэрбат Лодой[2] — доктор технических наук, советник по АСУТП,
Хурэлчулуун Ишген[2] — заместитель начальника отдела ТСАиВТ,
[1] НИТУ «МИСиС», e-mail: dchmggu@mail.ru,
[2] КОО «Предприятие «Эрдэнэт»», Монголия,
e-mail: delgerbat@erdenetmc.mn.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 622.765

V.V. Morozov, V.V. Rapshis, Delgerbat Lodoy, Khurlchuluun Ishgen

ADVANCEMENT OF VISIOMETRIC ANALYSIS OF ORE AT ERDENET MINING CORPORATION

The article describes the updated visiometric analyzers of size and mineral composition of ore under processing at Erdenet Mining Corporation, and the elements of the ore grading algorithm. The continuous analysis system includes a visiometric analyzer installed under crushed ore conveyor to provide real-time information on mineralogy, size grades and impregnation of ore. To make measurements more accurate, special illumination modes are developed and adapted to separate determination of sizes and mineral composition of ore. Also, higher accuracy is supported by the multi-format digital image algorithm using modern image color pickers RGB and HSV. Ore grades are determined using a multi-criteria method based on seven or more significant parameters of ore, by means of estimation of fraction of each type of ore and, then, proportional calculation of production process variables.

The values of the parameters calculated with regard to ore grades are used as the preset functions in the local automatic control systems. The author describes the algorithms of operational grade analysis, ore quality control and ore milling and flotation supervision based on the continuous visiometric analysis of ore samples taken by the analytical control systems.

Application of the developed equipment and programs enables higher output of milling circuit and enhances copper and molybdenum recovery in concentrate.

Key words: copper-molybdenum ores, optical analysis, mineral composition, size of ore, automated control, crashing, grinding, flotation.

AUTHORS

Morozov V.V.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Rapshis V.V.[1], Graduate Student,
Delgerbat Lodoy[2], Doctor of Technical Sciences,
Adviser on Automatic Process Control Systems
Khurlchuluun Ishgen[2], Deputy Head of Department,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: dchmggu@mail.ru,
[2] Erdenet Mining Corporation, Erdenet, Mongolia,
e-mail: delgerbat@erdenetmc.mn.

REFERENCES

1. Hyotyniemi H., Ylinen R. Modelling of visual flotation froth data. *Automation in mining, mineral and metal processing 1998.* Preprints of a 9th IFACSymposium, Cologn, Germany, 1—3 Sept. 1998. Pergamon, 1998, pp. 309—314.

2. Moylanen Ya., Timperi Yu., Kemppinen Kh. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2010, no 2, pp. 89—92.

3. Haavisto O., Kaartinen J., Hyötyniemi H. Optical spectrum based estimation of grades in mineral flotation. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology*. Mumbai, India. 2006, pp. 252—253.

4. Sbárbaro D., Villar R. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants*. Springer-Verlag London Limited, 2010. 332 p.

5. Morozov V.V., Ganbaatar Z., Delgerbat L., Bokányi L., Stoliarov V.F. *Advanced system for control milling and flotation processes based on an estimation of ore quality grade*, Advanced materials research, 2012, 651, pp. 981—985.

6. Zelin Zhang, Jianguo Yang, Dongyang Dou. A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(2), 2014, pp. 591—605.

7. Olli Haavisto, Jani Kaartinen, and Heikki Hyötyniemi. 2006. Optical spectrum based estimation of grades in mineral flotation. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2006)*. Mumbai, India. 2006, pp. 2529—2534.

8. Ganbaatar Z., Delgerbat L., Duda A.M., Morozov V.V. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Plaksinskie chteniya»* (Plaksin's Lectures: International Conference Proceedings), Ekaterinburg, 2011, pp. 118—121.

9. Khurelchuluun I., Kruglov V.N. *Promyshlennye ispytaniya i modernizatsiya sistemy izmereniya krupnosti droblenoy rudy «GRANIKS»* (Industrial tests and updating of crushed ore sizing system GRANIKS).

10. Agoston, Max K. *Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms*. London: Springer, 2005. 386 p.

11. Rapshis V.V. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* (Theory and Practice of Ore and Mining Waste Processing: International Conference Proceedings), Ekaterinburg, 2015, pp. 15—20.

12. Morozov V., Davaasambuu D., Ganbaatar Z., Delgerbat L., Topchaev V., Sokolov I., Stolyarov V. Modern systems of automatic control of processes of grinding and flotation of copper-molybdenum ore. In: *16th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing*, Volume 15, Part1, IFAC (ed.), 2013, pp. 166—171.