

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА РУДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДРОБЛЕНИЯ

*Нестабильность физико-механических свойств руд приводит к резким колебаниям процесса рудоподготовки, заключающимся в чередовании режимов недогрузки и перегрузки тракта дробления. Для разработки систем автоматического регулирования замкнутого цикла дробление-грохочение необходимо оперативное измерение параметров гранулометрического состава руды. На горно-обогатительном комбинате «Эрдэнэт» для визиометрического контроля гранулометрического состава руды установлен и испытан видеодатчик системы «ГРАНИКС». Результаты промышленных испытаний показали, что относительная погрешность измерений по отдельным классам крупности дроблёной руды составляет от 2,67 до 7,51%. Предложенный алгоритм управления процессом дробления включает измерение гранулометрического состава руды и потребляемой мощности привода дробилки, регулирование нагрузки на передел дробления в замкнутом цикле и ширины разгрузочной щели дробилки. Система позволяет оптимизировать процесс дробления по критериям выход продуктивного класса, эффективность грохочения и циркулирующая нагрузка, получить дроблёный продукт заданной крупности, а также увеличить производительность отделения дробления и сократить удельный расход электроэнергии на общий процесс рудоподготовки.*

*Ключевые слова: дробление, грохочение, гранулометрический состав, визиометрический анализ, автоматизированное управление, циркулирующая нагрузка, эффективность грохочения, продуктивный класс, производительность, ширина разгрузочной щели.*

Месторождение Эрдэнэтийн-Овоо характеризуется вертикальной зональностью, выраженной в проявлении зон окисления и вторичного оруденения по линиям разломов, проходящим через всё рудное тело. Коэффициент крепости руд и пород колеблется в диапазоне 8–15 ед. по шкале проф. Протодряконова. Индекс Бонда варьирует в интервале 8–14 кВт·ч/т. Нестабильность физико-механических свойств перерабатываемых руд обуславливает резкие колебания процесса дробления, заключающиеся в чередовании режимов недогрузки и перегрузки тракта дробления [2, 3]. В отсутствие автоматического регулирования процесса дробления всё это ведёт к снижению производительности передела и увеличению удельного расхода электроэнергии [5]. Для разработки систем автоматического регулирования замкнутого цикла дробление-грохочение необходимы создание систем оперативного измерения параметров гранулометрического состава руды, расширение базы знаний о закономерностях процесса и выбор алгоритмов управления [6, 7].



**Хурэлчулуун  
Ишгэн<sup>1</sup>**

ведущий специалист по АСУТП  
khurelchuluun@erdenetmc.mn

**Морозов  
Валерий Валентинович<sup>2</sup>**

доктор технических наук  
профессор кафедры общей  
и неорганической химии  
dchmgsu@mail.ru

**Николаева  
Татьяна Сергеевна<sup>2</sup>**

кандидат технических наук  
доцент кафедры обогащения и переработки  
полезных ископаемых и техногенного сырья  
tnikolayeva@mail.ru

**Круглов  
Василий Николаевич<sup>3</sup>**

кандидат технических наук  
доцент Института радиоэлектроники  
и информационных технологий  
v.krougllov@mail.ru

<sup>1</sup> КОО «Предприятие «Эрдэнэт»,  
г. Эрдэнэт, Монголия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный  
Университет имени первого  
Президента России Б.Н.Ельцина»,  
г. Екатеринбург



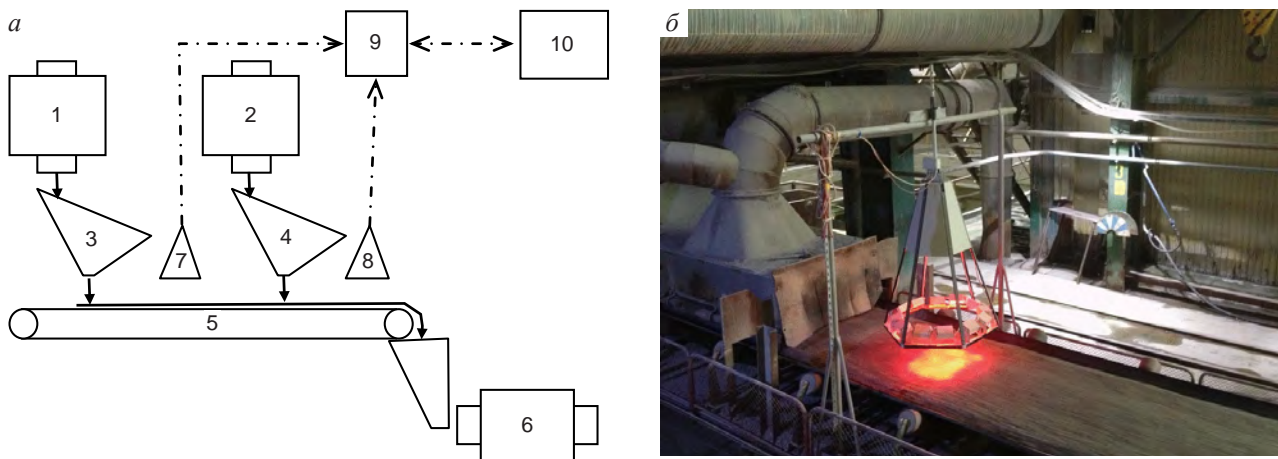


Рис. 1. СХЕМА (а) И ОБЩИЙ ВИД (б) УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ВИДЕОАНАЛИЗАТОРА «ГРАНИКС»:

1, 2 – дробилки; 3, 4 – грохоты; 5 – конвейер; 6 – барабанная мельница; 7, 8 – устройства съёма видеоизображений; 9 – процессор; 10 – сервер

Разработка методик визиометрического анализа гранулометрического состава дроблёной руды. Методы визиометрического анализа руды при рудоподготовке находят всё большее применение на горно-обогатительных предприятиях. Наряду с определением сортности руды [6], они решают задачу измерения её гранулометрического состава [11, 14, 15]. На обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт» в дробильно-транспортном отделении (ДТО) подготовка руды осуществляется на нескольких каскадах дробилок и грохотов. Подрешётный продукт – дроблёная руда – поступает на сборный конвейер. Для контроля гранулометрического состава дроблёной руды применялся визиометрический анализатор «ГРАНИКС» (рис. 1). Он устанавливался над конвейером (5) и обеспечивал контроль гранулометрического состава подрешётного продукта грохотов (3, 4).

При функционировании визиометрического анализатора информация от устройств съёма видеоизображений (7, 8) передавалась в процессор (9), где проводились распознавание изображения и расчёт гранулометрического состава продукта по встроенной программе системы «ГРАНИКС» (разработчик программного обеспечения Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина) [9]. В алгоритме обработки изображений, промежуточные стадии которого представлены на рис. 2, использовались процедуры гистограммной обработки изображений, пороговой бинаризации полутоновых участков, простран-

ственной фильтрации изображений, выделения контуров, визуализации результатов сегментации, расчёта гистограмм распределения крупности [4, 12].

К решению задачи сегментации кусков на изображении применён относительно новый подход – метод водораздела. Принцип метода и шаги алгоритма сегментации описаны в работе [13]. Для получения интегральных и дифференциальных кривых распределения продуктов грохочения по классам крупности использовалось интерполирующее уравнение в виде  $\gamma$ -функции.

Для оценки ошибки измерений, полученных при использовании анализатора «ГРАНИКС», проведены эксперименты на дробилке КМД-3000Т2-ДП, работавшей при переменной нагрузке. Согласно программе испытаний, в заданный момент времени отбирались пробы из потока руды на конвейере. Одновременно были записаны 136 видеоизображений. В Центральной исследовательской лаборатории ГОКа производился рассев проб, в ходе которого были получены значения выходов проб классов крупности +15, -15+12, -12+10, -10+6, -6+2 и -2 мм. Выход проб класса -2 мм визиометрическим анализом не определялся, а рассчитывался по корреляционному соотношению между выходами проб классов -6 и -2 мм, установленному по результатам ситового анализа.

Сравнение показаний системы «ГРАНИКС» и лабораторных данных позволило оценить достоверность анализа с использованием видеоанализатора по отдельным классам крупности (табл. 1).

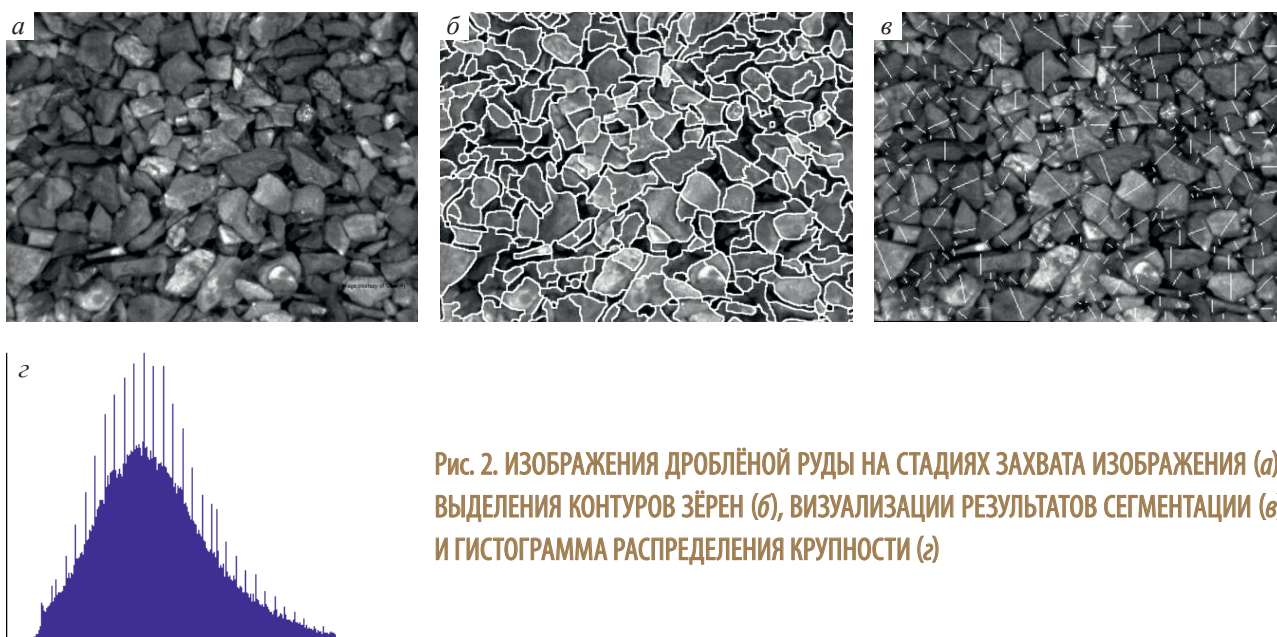


Рис. 2. ИЗОБРАЖЕНИЯ ДРОБЛЁНОЙ РУДЫ НА СТАДИЯХ ЗАХВАТА ИЗОБРАЖЕНИЯ (а), ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ЗЁРЕН (б), ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕГМЕНТАЦИИ (в) И ГИСТОГРАММА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРУПНОСТИ (г)

### 1. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУДЫ ПО ПОКАЗАНИЯМ СИСТЕМЫ «ГРАНИКС» И ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО АНАЛИЗА

Классы, мм	Выход класса по данным визиометрического анализа на конвейере, %			Выход класса по данным анализа рассевом, %			Ошибка визиометрических измерений относительно данных рассева, %
	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	
+15	2,6	3,7	3,2	2,3	3,2	2,95	5,30
+12-15	7,3	9,7	8,4	7,2	9,4	8,45	2,81
+10-12	9,4	11,3	10,5	9,3	11,9	9,4	3,32
+6-10	19,1	22,5	20,8	19,0	22,9	20,9	2,67
-6	53,8	61,6	57,7	49,8	62,1	57,9	7,51

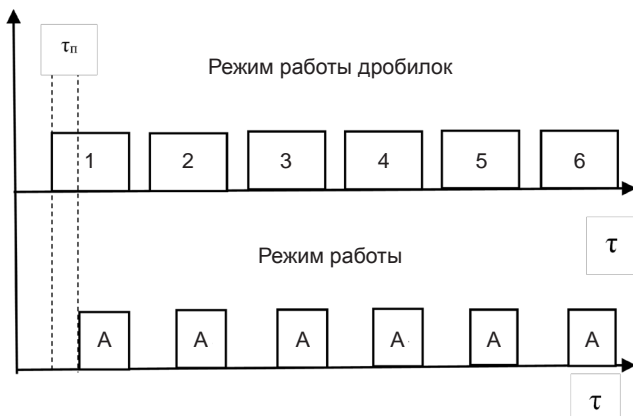
Средняя ошибка визиометрических измерений относительно данных рассева рассчитывалась как среднеквадратичные отклонения выходов классов, отнесённые к выходам отдельных классов крупности, измеренных методом рассева для каждой анализируемой пробы. Следует отметить, что для класса крупности -6 мм при весьма точном совпадении средних значений выходов классов для 136 измерений (57,7 и 57,9%) среднеквадратичное отклонение результатов частных измерений визиометрическим методом и методом рассева наибольшее (7,51%).

Как показали результаты анализа, относительные расхождения в измерениях (коэффициент вариации КВ) составляют по классам крупности от 2,67 до 7,51%. Проведённые испытания выявили, что визиометрический анализ руды на конвейере наи-

менее точно отражает выход мелких классов, находящихся в агрегированном состоянии (КВ=7,5%).

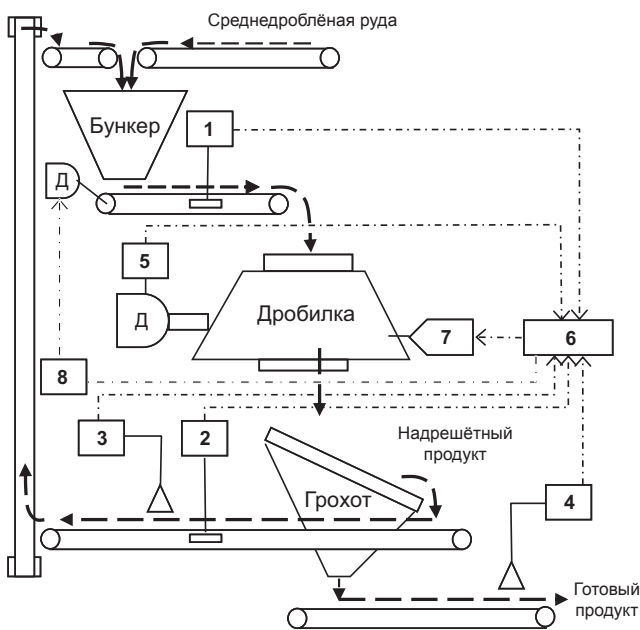
Для визиометрического анализа гранулометрического состава руд класса -2 мм был применён метод сравнительной оценки. Результаты лабораторного гранулометрического анализа позволили установить тесную связь между выходами классов -6 мм и -2 мм. Высокий коэффициент корреляции (0,94) дал возможность использовать полученное корреляционное соотношение для расчёта выхода классов -2, -6+2 и -10+2 мм.

Для повышения точности анализа применялся специальный режим визиометрического анализа, предусматривающий последовательное включение-выключение питающих конвейеров дробилок и самих дробилок (рис. 3), за счёт чего обеспечивалось поступление в зону измерений в каждый



**Рис. 3. АЛГОРИТМ РАБОТЫ ДРОБИЛОК, КОНВЕЙЕРОВ (1–6) И АНАЛИЗАТОРА (А) ПРИ ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ДРОБЛЁНОЙ РУДЫ:**

$\tau_p$  – интервал времени переходного процесса;  $\tau$  – включено



**Рис. 4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ДРОБЛЕНИЯ И ГРОХОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ И РАСХОДА ЭНЕРГИИ:**

1, 2 – конвейерные весы; 3, 4 – визиометрические анализаторы гранулометрического состава; 5 – датчик электрической мощности; 6 – процессор; 7 – регулятор ширины разгрузочной щели; 8 – регулятор расхода руды; Д – электродвигатель

момент времени дроблёного продукта лишь с одной дробилки.

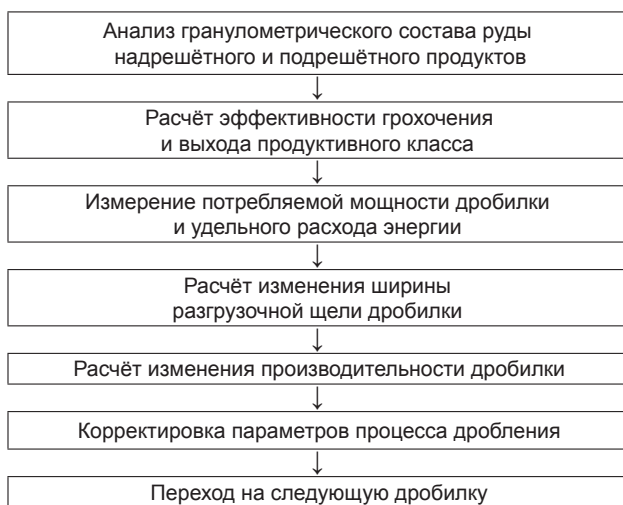
Дискретный режим подачи разгрузки дробилки и мелкого класса грохочения на операцию визиометрического анализа создаёт условия для более точного анализа крупности дроблёной руды. Предложенный режим не приводит к снижению производительности дробильного отделения, поскольку в этот промежуток времени проводится плановое обслуживание оборудования. Общая продолжительность анализа крупности руды от шести дробилок составила 12 мин.

*Разработка и испытания системы автоматического регулирования процесса дробления.* Для оптимизационного управления процессами дробления-грохочения необходимо использовать параметр, отражающий эффективность всех процессов в целом и по отдельности. В качестве такого параметра предлагаются эффективность грохочения по заданному классу и выход продуктивного класса после корректировки и адаптации к новым условиям, прежде всего к ведению процесса мелкого дробления в замкнутом цикле [2, 3].

Критерием действенности процесса грохочения может служить эффективность грохочения по классу  $-12+10$  мм. Выбор этого интервала крупности обусловлен тем, что класс считается «подрешётным», однако лежит в интервале критического класса [1, 8]. Поэтому данный критерий наиболее чутко реагирует на ухудшение условий процесса грохочения.

В качестве дополнительного параметра оптимизации процесса дробления предлагается использовать критерий, называемый выход продуктивного класса в дроблёной руде, под которым понимается фракция  $+2-10$  мм. Такой критерий является комплексным, адаптированным к условиям замкнутого цикла дробление-грохочение и позволяет вести процесс в режиме, предупреждающем чрезмерный выход крупных и мелких классов дроблёной руды.

Для обоснования выбранного критерия проведены дополнительные исследования. Дробилка мелкого дробления испытывалась в открытом и закрытом циклах с операцией проверочного грохочения в широком диапазоне производительности (от 350 до 550 т/ч). Зависимость выхода продуктивного класса дроблёной руды ( $+2-10$  мм) от ширины разгрузочной щели характеризуется наличием максимума. Увеличение последней ( $>8,5$  мм) при-



**Рис. 5. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДРОБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА РУДЫ И ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ДРОБЛЕНИЕ**

водит к уменьшению выхода продуктивного класса вследствие роста выхода класса +10 мм, уменьшение (<7,5 мм) способствует увеличению выхода класса -2 мм.

Анализ полученных данных показал, что ведение процесса дробления в замкнутом цикле позволяет получить продукт, характеризующийся максимальным выходом продуктивного класса при разгрузочной щели 7,5–8,5 мм.

Алгоритм управления процессом дробления предполагает измерение вышеописанных параметров руды и работы дробилок, регулирование нагрузки на передел дробления в замкнутом цикле и ширины разгрузочной щели дробилки [10].

Разработанная система оперативного управления процессами дробления и грохочения (рис. 4) включает весы (1, 2) на конвейерах подачи исходного питания и возврата надрешётного продукта грохочения, визиометрические анализаторы (3, 4) на конвейерах готового класса и возврата надрешётного продукта, датчик потребляемой мощности дробилки мелкого дробления (5) и блок управления (6).

Управление процессом дробления по данным оперативного анализа гранулометрического состава руды предусматривает анализ гранулометрического состава надрешётного и подрешётного продуктов, расчёт балансов по классам крупнос-

ти, расчёт эффективности грохочения по контрольному классу, расчёт выхода продуктивного класса (рис. 5).

Одновременно в процессор видеоанализатора поступает сигнал, характеризующий электрическую мощность, потребляемую приводом дробилки. Затем устанавливаются рекомендуемая корректировка ширины разгрузочной щели и производительность дробилки (см. рис. 5). Временной интервал корректировки параметров процесса дробления определяется общим состоянием показателей. Корректировка проводится не реже одного раза в смену.

При реализации алгоритма модель-ориентированного автоматизированного управления процессом дробления производится расчёт оптимальных изменений основных технологических параметров – производительности и ширины разгрузочной щели. Регулирование осуществляется на двух уровнях. Иллюстрация используемого алгоритма приведена в табл. 2, представляющей собой базу данных для выбора решения по изменению производительности дробилки в зависимости от измеренных параметров процесса – эффективности грохочения по классу -12+10 мм и удельной потребляемой мощности в процессе дробления. Выбор оптимальной ширины разгрузочной щели дробилки производится по выходу продуктивного класса и циркулирующей нагрузке.

Разработанная система модель-ориентированного управления процессом дробления испытана в промышленных условиях на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт». Результаты испытаний показали, что система управления процессом дробле-

**2. ВЫБОР УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДРОБИЛКИ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРОХОЧЕНИЯ И ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ДРОБИЛКИ**

Потребляемая мощность, кВт·ч/т	Эффективность грохочения по классу -12+10 мм, %				
	<60	60–65	65–70	70–75	>75
>0,85	-10	-7,5	-5	-2,5	0
0,825–0,85	-7,5	-5	-2,5	0	+2,5
0,80–0,825	-5	-2,5	0	+2,5	+5
0,775–0,80	-2,5	0	+2,5	+5	+7,5
<0,775	0	+2,5	+5	+7,5	+10

### 3. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦЕХА ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Режимы регулирования	Производительность на одну дробилку, т/ч	Расход энергии на мелкое дробление, кВт·ч/т	Расход энергии на измельчение, кВт·ч/т	Выход класса -12 мм в дроблёной руде, %	Выход класса -74 мкм в измельчённой руде, %
С периодической подтяжкой разгрузочной щели (базовый вариант)	440	0,80	4,19	95,5	64,5
С регулированием производительности дробилки по данным визиометрического анализа гранулометрического состава	465	0,81	4,06	95,6	64,6

ния с использованием визиометрического контроля крупности дроблёной руды и потребляемой энергии позволяет реализовать способ оптимизации процесса дробления по критериям выход продуктивного класса, эффективность грохочения, циркулирующая нагрузка и получить дроблённый продукт заданной крупности (95% класса -12 мм). Использование системы способствует увеличению производительности передела на 5,7% и сокращению удельного расхода электроэнергии на общий процесс рудоподготовки на 0,12 кВт·ч/т (табл. 3).

Таким образом, разработана система визиометрического анализа гранулометрического состава дроблёной руды. Выбраны критерии оптимизации процесса дробления в замкнутом цикле: циркули-

рующая нагрузка, грохочение, выход продуктивного класса и затраты энергии на дробление руды. Созданы система и программный модуль управления технологическими процессами дробления и грохочения на основе оперативного визиометрического измерения и анализа гранулометрического состава продуктов и расхода энергии путём регулирования ширины разгрузочной щели дробилки и её производительности. Промышленными испытаниями показано, что использование разработанной системы управления процессом дробления даёт возможность увеличить производительность передела на 5,7% и сократить удельный расход электроэнергии на общий процесс рудоподготовки на 2,8%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайсберг Л.А.* Теоретические основы грохочения. Учебное пособие. – СПб.: СПбГГИ (технический университет), 2003.
2. *Ганбаатар З., Гээгт Ш., Дэлгэрбат Л.* Совершенствование рудоподготовки медно-молибденовых руд // Обогащение руд. 2003. № 4. С. 3–5.
3. *Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л.* Результаты разработки и внедрения автоматизированной агрегатно-технологической системы управления работой дробилки КМД-3000Т2-ДП // Сб. докл. расширенного заседания Междунар. науч.-практ. конф. «Новые решения в технике и технологии добычи и переработки руд». Эрдэнэт, 2002. С. 255–259.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Технофера, 2005.
5. *Губин С.Л.* Способ управления процессом дробления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 1. С. 11–13.
6. *Даваасамбу Д., Эрдэнэцогт Д., Хурэлчулуун Ишген.* Оптимизация процессов дробления и измельчения медно-молибденовых руд на основе применения оптических методов анализа // Тр. X Конгресса обогащителей стран СНГ. М., 2015. С. 145–149.
7. *Морозов В.В., Улитенко К.Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л.* Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2013.
8. *Пелевин А.Е.* Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Изв. вузов. «Горный журнал». 2011. № 1. С. 119–129.
9. *Хурэлчулуун Ишген, Круглов В.Н.* Промышленные испытания и модернизация системы измерения крупности дробленной руды «ГРАНИКС» // Тр. Междунар. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». Екатеринбург, 2016. С. 118–121.

10. Хурэлчулуун Ишген, Морозов В.В. Оптимизация дробления медно-молибденовой руды в замкнутом цикле // Тр. Междунар. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Екатеринбург, 2018. С. 6–10.
11. Andersson T., Thurley M.J., Carlson J.E. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles // Minerals Engineering. 2011. Vol. 25. P. 38–46.
12. Junker B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2006. Vol. 29. P. 185–206.
13. Maiti Abhik, Chakravarty Debashish, Biswas Kousik, Halder Arpan. Development of a mass model in estimating weight-wise particle size distribution using digital image processing // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27. P. 435–443.
14. Zhang Z., Yang J., Dou D. A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2014. Vol. 50 (2). P. 591–605.
15. Zhang Z., Yang J., Ding L., Zhao Y. Estimation of coal particle size distribution by image segmentation // International Journal of Mining Science and Technology. 2012. Vol. 22 (5). P. 739–744.

## USE OF VISIOMETRIC ANALYSIS OF GRANULOMETRIC ORE COMPOSITION FOR AUTOMATED CRUSHING CONTROL

Hurelchuluun Ishgen<sup>1</sup>, V.V.Morozov<sup>2</sup>, T.S.Nikolaeva<sup>2</sup>, V.N.Kruglov<sup>3</sup>  
 (1Erdenet enterprise, Erdenet, Mongolia; 2National Research Technological University MISiS, Moscow; 3B.N.Yeltsin Yural Federal University, Ekaterinburg)

*Instability of physicommechanical ore properties leads to significant variations of ore preparation including alternation of underloading and overloading modes within crushing process. To develop automatic control systems for a closed crushing/screening cycle, timely measurement of granulometric ore composition parameters is required. GRANIX videosensor was installed and tested at the Erdenet mine/mill plant for granulometric ore composition visiometric control. Commercial test results suggested that relative measurement error for separate crushed ore sizes is 2,67%-7,51%. The proposed algorithm of crushing control includes measuring granulometric ore composition and power consumption of a crusher drive, controlling loading on crushing in a closed cycle and width of a crusher discharge slit. The system allows to optimize crushing by certain criteria (product yield, screening efficiency and circulating loading), obtain preset-size crushed product, increase crushing unit capacity and reduce specific energy consumption for the entire ore preparation process.*

*Keywords: crushing, screening, granulometric composition, visiometric analysis, automated control, circulating loading, screening efficiency, productive class, capacity, width of a discharge slit.*



### НЕДРА 2019. ИЗУЧЕНИЕ. РАЗВЕДКА. ДОБЫЧА

выставка / 1 - 2 апреля 2019 года / МГРИ-РГГРУ

Коммуникационная площадка для обсуждения актуальных вопросов взаимодействия государства и бизнеса в сфере недропользования и инвестиционной привлекательности юниорных геологоразведочных компаний