

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(ННТУ «МНСНС»)

ХУРЭЛЧУЛУУН ИШГЭН

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РУДОПОДГОТОВКИ НА ОСНОВЕ  
ПРИМЕНЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ВИЗИОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ДРОБЛЕНИЯ И  
ГРОХОЧЕНИЯ

Специальность 25.00.13 «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – профессор,  
докт. техн. наук, Морозов В.В.

Москва - 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Применяемые в настоящее время технологии рудоподготовки при обогащении руд цветных металлов требуют значительного совершенствования, что обусловлено вовлечением в переработку изменяющихся по составу и физико-механическим свойствам руд, что приводит к резким изменениям их дробимости и, как следствие, чередовании режимов избыточной и недостаточной нагрузки на дробильное оборудование. Нестационарный режим работы дробилок является причиной увеличения расхода энергии и снижения производительности оборудования в процессах рудоподготовки.

В таких условиях все большее распространение получают схемы, предусматривающие использование замкнутых циклов дробления и грохочения, обеспечивающих снижение крупности руды, поступающей на измельчение и снижение затрат энергии на рудоподготовку. Однако применение замкнутых схем в условиях резкого изменения дробимости руд приводит к существенным колебаниям нагрузки, снижению эффективности грохочения, увеличению выхода возвращаемого на додробливание продукта и, как следствие, к уменьшению производительности.

Задача оптимизации режима рудоподготовки особенно актуальна для ГОКа «Эрдэнэт», где руда, вследствие метасоматических гипергенных изменений состава вмещающих пород, характеризуется значительными колебаниями минерального состава, структуры, прочности и обогатимости.

Перспективным направлением решения задачи повышения эффективности процессов рудоподготовки является использование систем автоматического регулирования процессов дробления и грохочения, применяющих модель-ориентированные алгоритмы и современные средства аналитического контроля. Использование заложенных в математическую модель процесса знаний о внутренних связях параметров процессов позволяет решить задачу оптимизации замкнутого цикла дробления и грохочения путем выбора наилучших режимов. Важным условием оптимизации рудоподготовки является расширение номенклатуры контролируемых параметров процессов дробления и грохочения и применение научно обоснованных критериев эффективности, базирующихся на закономерностях процесса.

Методологической основой решения задачи разработки модели процесса подготовки руд являются результаты системных исследований процессов рудоподготовки и обогащения, значительный вклад в развитие которых внесли ученые России и Монголии: О.Н. Тихонов, В.М. Авдохин, Л.А. Вайсберг, В.З. Козин, В.В. Морозов, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат и другие.

**Целью работы является** повышение эффективности процессов

рудоподготовки на основе применения непрерывного визиометрического анализа гранулометрического состава продуктов дробления и грохочения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ причин снижения эффективности передела рудоподготовки медно-молибденовых руд применительно к ГОКу «Эрдэнэт»;
- установление закономерностей и взаимосвязи параметров процессов дробления и грохочения в замкнутом цикле;
- разработка способа оперативного визиометрического анализа гранулометрического состава дробленой руды
- разработка систем и алгоритмов автоматизированного регулирования процессов дробления и грохочения на основе непрерывного измерения гранулометрического состава руды и потребляемой энергии.

**Идея работы** заключается в использовании непрерывного визиометрического измерения гранулометрического состава продуктов дробления и грохочения и потребляемой электрической мощности на дробление для выбора наилучших условий процессов рудоподготовки при обогащении медно-молибденовых руд.

**Научная новизна работы заключается в следующем.**

1. На основе установленных закономерностей формирования гранулометрического состава дробленой руды в условиях многопараметрической системы взаимовлияющих факторов замкнутого цикла процессов дробления и грохочения руды разработана математическая модель процесса рудоподготовки, связывающая выход надрешетного продукта грохочения с производительностью, шириной разгрузочной щели и потребляемой дробилками мелкого дробления электрической мощностью, эффективностью грохочения, позволяющая определить наилучшие параметры замкнутого цикла дробление – грохочение.

2. Предложены новые критерии оптимизации процессов дробления и грохочения: выход продуктивного класса крупности (+2 -12 мм) и эффективность грохочения по критическому классу крупности (+10 -12 мм), применение которых обеспечивают более точное определение рациональных технологических режимов и повышение эффективности процессов рудоподготовки при обогащении медно-молибденовых руд с применением систем автоматизированного регулирования ширины разгрузочной щели дробилки и производительности замкнутого цикла дробление – грохочение.

3. Разработан способ непрерывного визиометрического анализа гранулометрического состава дробленой руды в потоке, включающий получение изображений руды, их обработку, построение непрерывных кривых распределения руды по классам крупности и обеспечивающий не достигаемое ранее непрерывное

определение выхода готового класса крупности и эффективности грохочения по критическому классу крупности, что создает основу для разработки и применения систем оптимизационного управления замкнутым циклом дробление – грохочение в процессах рудоподготовки.

**Практическое значение работы** заключается в разработке системы и алгоритма оптимизационного автоматизированного управления замкнутым циклом дробления и грохочения медно-молибденовых руд на основе непрерывного контроля гранулометрического состава руды и энергетических параметров работы оборудования, обеспечивающих повышение производительности и сокращение энергозатрат. Сформулированы условия применения системы и алгоритма управления технологическими процессами дробления и грохочения медно-молибденовых руд, включающие применение новых критериев оптимизации, обеспечивающие поддержание рациональных технологических режимов, обеспечивающих повышение производительности оборудования на 5,7% и снижения энергозатрат на рудоподготовку на 2,8%.

Разработанная автоматизированная система управления процессом рудоподготовки прошла испытания и рекомендована к промышленному освоению на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт с ожидаемым экономическим эффектом 160,5 тыс. долларов США в год.

#### **На защиту выносятся.**

1. Установленные закономерности и математическая модель формирования гранулометрического состава дробленной руды в многопараметрической системе взаимовлияющих факторов замкнутого цикла процессов дробления и грохочения технологической схемы рудоподготовки, включающая в качестве параметров непрерывно измеряемую потребляемую дробилками мелкого дробления электрическую мощность и гранулометрические характеристики продуктов грохочения.

2. Совокупность критериев оптимизации процессов дробления и грохочения, включающая выход «продуктивного класса» крупности и эффективность грохочения по «критическому» классу крупности, применяемые для оптимизационного управления замкнутыми циклами дробления и грохочения.

3. Способ визиометрического анализа гранулометрического состава продуктов дробления и грохочения, включающий получение изображений руды, их анализ, расчет кривой гранулометрической характеристики, обеспечивающий определение выходов классов заданной крупности в условиях непрерывного потока с высокой точностью.

4. Система и алгоритм для оптимизационного управления технологическими

процессами дробления и грохочения медно-молибденовых руд на основе оперативного визиометрического измерения гранулометрического состава продуктов и расхода энергии в процессах дробления и грохочения, обеспечивающие повышение производительности оборудования и снижения энергозатрат. Результаты промышленных испытаний разработанной системы на ГОКе «Эрдэнэт»

**Апробация работы.** Основное содержание работы и отдельные ее положения докладывались и обсуждались на 9 научных конференциях и форумах, в т.ч.: Научно-технической конференции VI Уральского горно-промышленного форума «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья», Екатеринбург, 2015 г., Научных семинарах в рамках "Недели горняка", МГГУ, Москва, 2015-2018 гг.; Конгрессе обогатителей стран СНГ, МИСиС, Москва, 2017, 2019 гг., Международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Екатеринбург, 2015-2018 гг., Международной научно-производственной конференции СП «Эрдэнэт», Эрдэнэт, Монголия, 2018 г., Международной конференции по охране окружающей среды и обогащению полезных ископаемых, Острава, Чехия, 2018 г.

**Методы исследований.** В работе использованы лабораторные, полупромышленные и промышленные методы исследования свойств сырья, процессов дробления и грохочения медно-молибденовых руд с измерением гранулометрического состава и расхода руды, мощности привода, крупности измельчения, расхода энергии на дробление и измельчение, методы статистического и регрессионного анализа при обработке результатов эксперимента.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 12 работах, из них 2 статьи – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 9 тезисов в материалах российских и зарубежных научных конференций.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** подтверждаются удовлетворительной воспроизводимостью задаваемых модельными уравнениям зависимостей выходных и входных параметров процессов (коэффициент детерминированности  $R^2=0,85-0,97$ ), достижением максимальной эффективности процесса рудоподготовки в интервале научно-обоснованных параметров, а также положительными результатами промышленных испытаний.

**Личный вклад автора** состоит в обобщении и анализе открытых научных информационных источников по теме диссертации; проведении исследований по визиометрическому анализу гранулометрического состава руды, выполнении расчетов и анализов балансов классов крупности руды в процессах рудоподготовки, подготовке и проведении экспериментальных исследований процессов дробления и грохочения, обработке и анализе результатов исследований, формулировании выводов и

заклучения работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и выводов, списка литературы из 120 наименований и содержит 120 страниц машинописного текста, 25 рисунков, 19 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В первой главе работы* рассмотрено современное состояние, определены причины снижения технико-экономических показателей и обоснованы пути повышения эффективности замкнутых циклов дробление – грохочение в схемах рудоподготовки при обогащении медно-молибденовых руд. Показано, что месторождение Эрдэнэтийн-Овоо характеризуется выраженной вертикальной зональностью с проявлениями зон окисления и вторичного оруднения по линиям разломов, проходящим через все рудное тело. Коэффициент крепости руд и пород колеблется в широком диапазоне. Нестабильность физико-механических свойств перерабатываемых руд приводит к резким колебаниям процесса дробления, заключающихся в чередовании режимов недогрузки и перегрузки оборудования. При отсутствии систем автоматического регулирования такой режим ведет к снижению производительности передела и увеличению расхода электроэнергии. Для создания систем автоматического регулирования замкнутого цикла дробление-грохочение необходимо расширение базы знаний о закономерностях процессов и разработка новых способов оперативного измерения параметров дробленой руды.

*Во второй главе* рассмотрены и выбраны методы исследования и моделирования процессов дробления и грохочения, включая методы анализа физических свойств горных пород, методы анализа гранулометрического состава руды, математического моделирования процессов грохочения. Современные методы измерения прочности и твердости руды, механического анализа гранулометрического состава позволяют получить требуемые результаты и установить необходимые связи между параметрами процессов дробления и грохочения. Визиометрическое измерение крупности руды и контроль мощности привода дробилок позволяют осуществлять автоматизированное оптимизационное управление процессом рудоподготовки. Моделирование замкнутых циклов дробления и грохочения позволяет установить связи выходных и входных параметров процессов рудоподготовки, выбрать совокупность параметров контроля, повысить точность и надежность выбора оптимальных технологических режимов.

*В третьей главе работы* представлены результаты исследования и моделирования свойств сырья и процессов рудоподготовки, установлены закономерности формирования гранулометрического состава дробленой руды в

процессах рудоподготовки. Результаты проведенных измерений показали, что коэффициент крепости руд колеблется в широком диапазоне (8-15 ед. по шкале проф. Протодяконова, индекс Бонда 8-14 кВтч/т). Такие колебания вызывают нестационарный режим работы дробилок, при котором в 25% случаев они недогружены рудой, что является резервом для увеличения производительности.

Совокупность рассматриваемых связей между входными, промежуточными и выходными параметрами процессов мелкого дробления и грохочения представлены на рисунке 1. Возмущаемыми параметрами процессов дробления и грохочения являются физико-механические свойства руды, в первую очередь ее прочность и гранулометрический состав. Важным параметром является ее склонность к образованию удлиненных и плоских кусков, затрудняющих процесс грохочения. Регулируемые параметры модели – расход руды и ширина разгрузочной щели дробилки. Размер ячейки грохота относится к условно регулируемым параметрам, поскольку его оперативное изменение в ходе процесса невозможно.

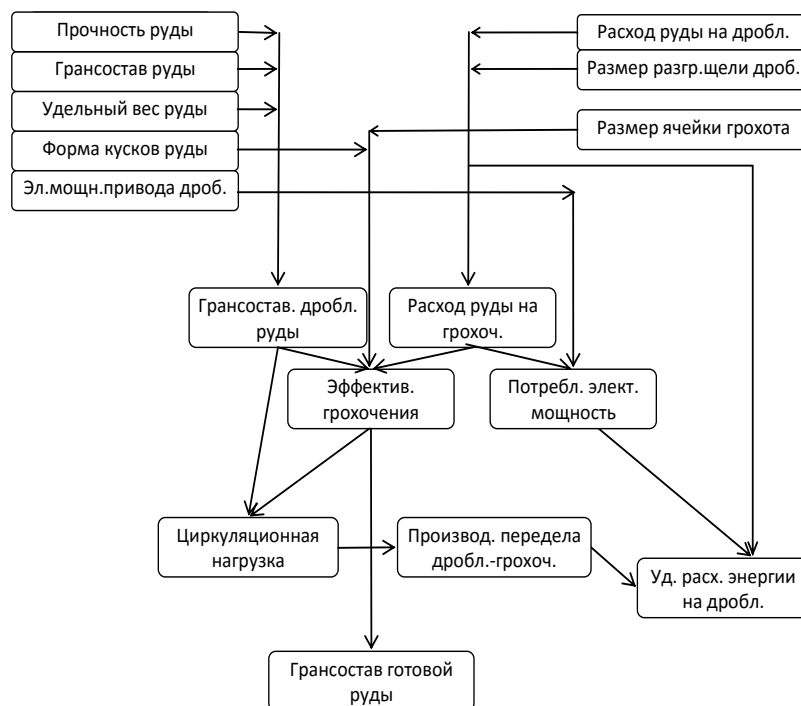


Рисунок 1. Модель процесса мелкого дробления с проверочным грохочением и возвратом крупного класса

Совокупность основных измеряемых конечных параметров включает гранулометрический состав дробленой руды, циркуляционную нагрузку (выход плюсового класса с операции грохочения), удельный расход энергии на дробление.

При использовании базовой схемы на ГОКе Эрдэнэт в качестве основного оптимизационного критерия качества процесса дробления ранее использовался выход класса +15 мм в разгрузке дробилки. При ведении процесса дробления в замкнутом цикле содержание класса +15 мм уменьшилось и перестало отражать степень подготовленности руды к измельчению. Кроме того, в условиях замкнутого цикла существенно возросла нагрузка на грохот, что привело к снижению формальной энергоэффективности процесса рудоподготовки. В таких условиях возникла необходимость непрерывной корректировки параметров процесса дробления, в первую очередь производительности дробилки и ширины ее разгрузочной щели.

В соответствии с результатами ранее проведенных исследований и опыта работы передела рудоподготовки в качестве параметров процесса дробления были выбраны производительность по готовому классу, циркулирующая нагрузка и гранулометрическая характеристика дробленой руды. Промежуточным параметром на первом этапе была выбрана эффективность грохочения и потребляемая мощность.

Для определения закономерностей формирования гранулометрического состава дробленой руды было проведено опробование операции мелкого дробления на ГОКе «Эрдэнэт». Анализ параметров процессов дробления показал, что увеличение производительности в интервале 430-470 т/ч ведет к увеличению выхода надрешетного продукта и потребляемой мощности (рисунок 2а,б).

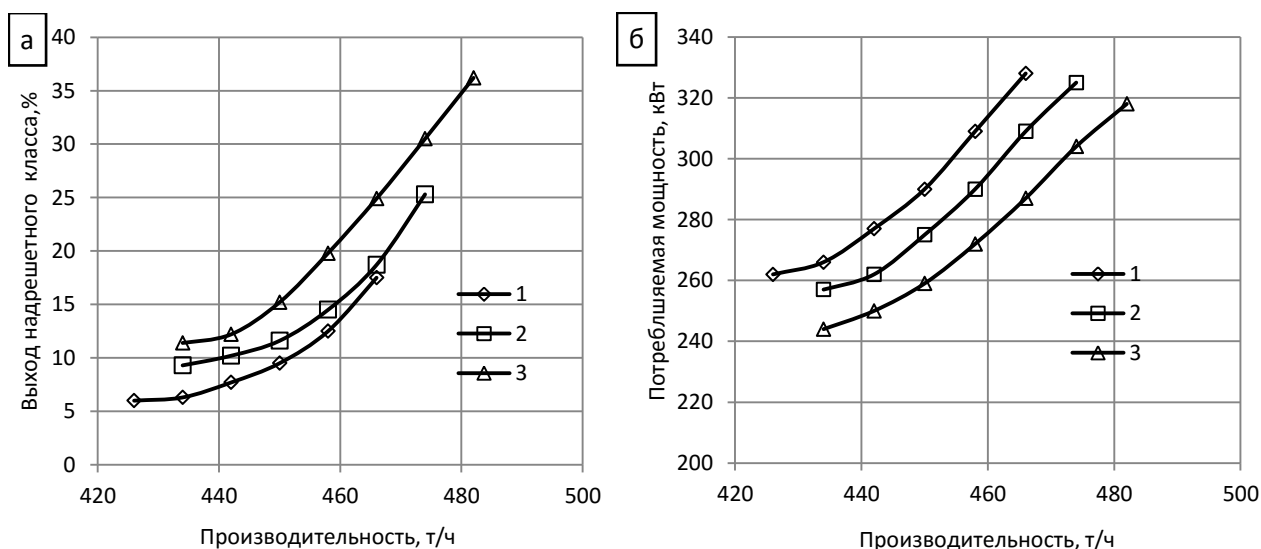


Рисунок 2. Зависимость выхода надрешетного класса (а) и потребляемой мощности привода (б) от производительности дробилки КМД-3000Т при ширине разгрузочной щели: 1 – 8,5 мм; 2 – 9,1 мм; 3 – 10 мм



Увеличение ширины разгрузочной щели закономерно увеличивает выход плюсового класса операции грохочения и уменьшает потребляемую мощность дробилки (рисунок 2а,б). Увеличение ширины разгрузочной щели приводит к снижению эффективности грохочения на 1-5%.

Значительный массив данных опробования процесса дробления (более 200 измерений) позволил получить статистические зависимости выходных параметров от входных и промежуточных.

Математические зависимости выхода надрешетного класса  $\gamma_+$  ( $Y_1$ ), потребляемой мощности  $E_d$  ( $Y_2$ ) дробилки, эффективности грохочения  $E_{гр}$  ( $Y_3$ ) от производительности  $Q_d$  ( $X_1$ ) в интервале от 430 до 470 т/ч и размера разгрузочной щели  $a_d$  ( $X_2$ ) описываются уравнениями, представленными в таблице 1.

Таблица 1. – Регрессионные уравнения и параметры оценки тесноты связи

| Регрессионное уравнение                                  | A    | R    | R <sup>2</sup> | F     | F <sub>гр</sub> |
|----------------------------------------------------------|------|------|----------------|-------|-----------------|
| $Y_1 = -210.73 + 0.402X_1 + 4.70X_2$                     | 7,36 | 0,94 | 0,876          | 128,2 | 3,23            |
| $Y_2 = -175.01 + 1.34X_1 - 18.87X_2$                     | 9,87 | 0,92 | 0,83           | 75,5  | 3,23            |
| $Y_3 = 204.13 - 0.242X_1 - 1.67X_2$                      | 17,7 | 0,76 | 0,6            | 68,2  | 3,23            |
| $Y_4 = 49.02 + 3.03X_1 + 0.081X_2 + 0.0269X_3 - 1.26X_4$ | 6,2  | 0,98 | 0,96           | 165,1 | 2,61            |

A – погрешность аппроксимации; R – множественный коэффициент корреляции; R<sup>2</sup> – показатель детерминированности; F – значение критерия Фишера; F<sub>гр</sub> – табличное значение критерия Фишера

Средняя ошибка аппроксимации составила 9,8 – 9,9%. Множественный коэффициент корреляции R составил 0,76 – 0,92 и характеризует регрессионные уравнения как адекватные описываемому технологическому процессу.

В качестве промежуточного параметра при оценке данных опробования применена используемая на ГОКе эффективность грохочения по классу -12 мм. Анализ гранулометрического состава продуктов грохочения показал, что в интервале производительности от 430 до 470 т/ч эффективность грохочения  $E_{гр}$  по классу -12 мм снижается, и особенно резко – при ширине разгрузочной щели 10 мм. (рисунок 3).

Математическая связь эффективности грохочения  $E_{гр}$  с производительностью и размером разгрузочной щели описывается уравнением 3 ( $Y_3$ ).

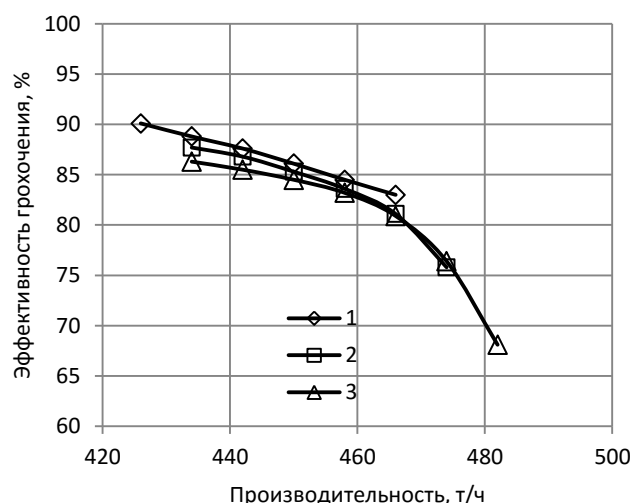


Рисунок 3. Зависимость эффективности грохочения по классу -12 мм от производительности дробилки КМД-3000Т при ширине разгрузочной щели: 1 – 8,5 мм; 2 – 9,1 мм; 3 – 10 мм

Для обоснования использования рассмотренных промежуточных параметров процесса дробления в модели процесса было получено уравнение множественной регрессии выходного параметра – выхода плюсового класса ( $Y_4$ ) от регулируемых (производительность  $X_1$ , ширина разгрузочной щели  $X_2$ ) и нерегулируемых (потребляемая мощность  $X_3$  и эффективность грохочения  $X_4$ ) параметров (таблица 1).

Сравнение характеристик связи выхода плюсового класса с входными параметрами показывает, что использование в качестве таковых дополнительно потребляемой мощности и эффективности грохочения делает модель весьма точной, о чем говорит близкое к единице значение критерия множественной корреляции и существенное превышение критерия Фишера над граничным.

Полученные результаты исследований позволили определить причины снижения показателей рудоподготовки в условиях существенной изменчивости физико-механических свойств руды и установить тесную связь ширины разгрузочной щели и производительности с потребляемой мощностью и эффективностью грохочения, обосновывающую применение этих параметров при выборе наилучших технологических режимов и оптимизационном управлении процессами рудоподготовки.

**В четвертой главе работы** обоснован выбор критериев оптимизации и описан алгоритм управления процессами дробления и грохочения на основе контроля гранулометрического состава руды и энергозатрат на дробление

Для оптимизационного управления процессами дробления и грохочения необходимо использовать параметр, отражающий эффективность всех процессов в

целом и по отдельности. В качестве такого критерия предлагается использовать применяемый на ГОКе критерий «выход продуктивного класса» после корректировки и адаптации к новым условиям, прежде всего к ведению процесса мелкого дробления в замкнутом цикле.

Для обоснования границ продуктивного класса были проанализированы зависимости затрат электроэнергии на дробление в замкнутом цикле при различной ширине разгрузочной щели. Анализ результатов опробования показал, что при увеличении ширины разгрузочной щели в интервале от 6 до 10 мм при постоянной производительности (460 т/ч) происходит снижение энергозатрат (рисунок 4а).

При уменьшении ширины разгрузочной щели происходит увеличение выхода класса -2 мм. Анализ параметрической связи между энергозатратами на дробление и выходом класса -2 мм, при ограничении пределов колебаний остальных параметров, показывает наличие устойчивой связи для всех типов руд: при увеличении выхода класса крупности -2 мм происходит увеличение энергозатрат (рисунок 4б).

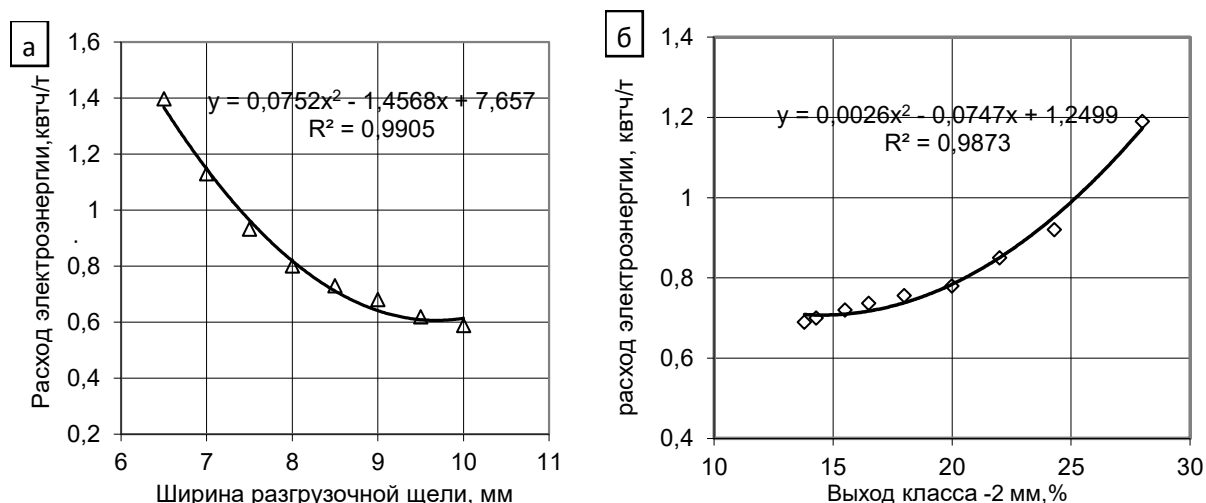


Рисунок 4. Зависимость величины удельного расхода электроэнергии (по готовому классу) на мелкое дробление от ширины разгрузочной щели дробилки (а) и выхода класса -2 мм (б)

Установленная закономерность объясняется протеканием процесса дробления в неоптимальном режиме, когда энергия привода тратится на непроизводительные цели.

Оценка затрат электроэнергии на дробление с использованием в качестве критерия выхода класса -2 мм показывает, что эти параметры тесно связаны между собой, и что увеличение выхода класса -2 мм является ведет к существенному увеличению энергозатрат.

Увеличение выхода класса +10 мм является также негативным параметром для процесса обогащения из-за снижения эффективности шарового измельчения. Как

показывают результаты исследований, увеличение выхода класса +10 мм требует увеличения продолжительности измельчения и, соответственно, вызывает рост энергозатрат для достижения в измельченной руде заданного содержания готового класса крупности.

В соответствие с установленными закономерностями при оптимизации процессов дробления и грохочения предлагается использовать критерий, названный выход «продуктивного класса»  $\gamma_{\text{пк}}$  в дробленой руде, причем для процесса мелкого дробления в замкнутом цикле к «продуктивному классу» предложено использовать выход класса +2 -10 мм. Такой критерий является комплексным, адаптированным к условиям замкнутого цикла дробление - грохочение и позволяет вести процесс в режиме, при котором предупреждается чрезмерный выход как крупных, так и мелких классов руды.

Для обоснования выбранного критерия были проведены дополнительные исследования. Дробилка мелкого дробления была испытана в открытом и закрытом цикле с операцией проверочного грохочения в широком диапазоне производительности (от 350 до 550 т/ч). Увеличение производительности проводилось в пошаговом режиме на 25 т/ч через 10 минут. Увеличение ширины разгрузочной щели проводилось на 0,5 мм за одно подтягивание. В этих условиях удавалось достичь установившегося режима дробления и грохочения. Проба дробленой руды отбиралась в конечном диапазоне временного отрезка. По данным отсева руды по классам +12, -12 +10, -10 +6, -6 +2 и -2 +0 мм были рассчитаны величины выхода «продуктивного класса» для различных режимов дробления и грохочения, достигаемых изменением нагрузки и ширины разгрузочной щели.

Как видно из рисунка 5а увеличение производительности свыше 450 т/ч ведет к уменьшению выхода «продуктивного класса» вследствие роста выхода класса - 2 мм. Это происходит вследствие роста циркулирующей нагрузки и, увеличения нагрузки на грохот и возвращения кусков готовой крупности в питание дробилки. Нагрузка свыше 500 т/ч возможна только при увеличении разгрузочной щели дробилки до 9 мм, однако при этом происходит резкое увеличение выхода класса +10 мм (рисунок 5б).

Зависимости выхода "продуктивного" класса дробленой руды (+2-10 мм) от ширины разгрузочной щели, как видно из рисунка 5б, характеризуются наличием максимума. Увеличение разгрузочной щели более 8,5 мм приводит к уменьшению выхода «продуктивного класса» вследствие роста выхода класса +10 мм. Уменьшение разгрузочной щели менее 7,5 мм приводит к увеличению выхода класса - 2 мм.

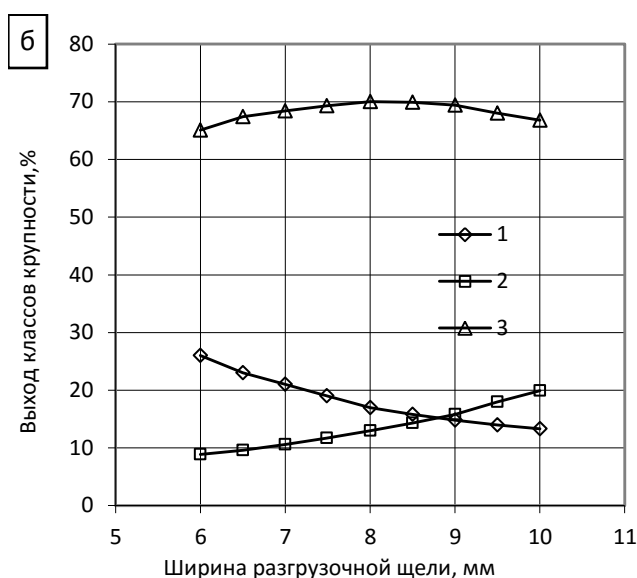
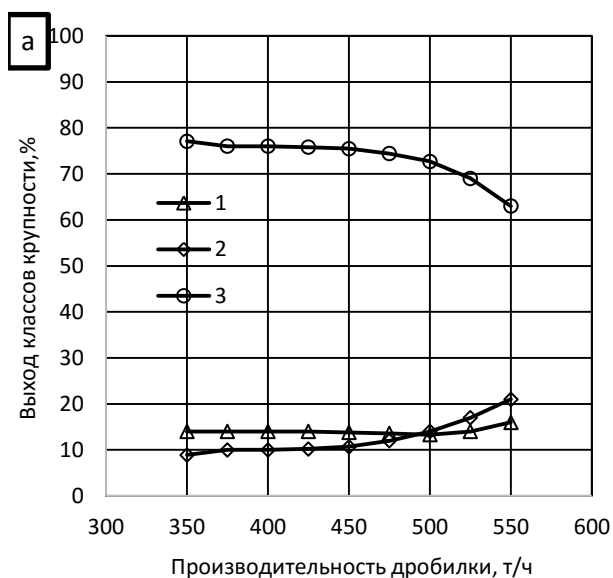


Рисунок 5. Зависимость выходов фракций дробленой руды различной крупности от производительности (а) и от ширины разгрузочной щели (б) дробилки КМД 3000 Т-2П в замкнутом цикле с грохотом: 1. - Выход класса -2 мм. 2. - выход класса +10 мм. 3. - Выход класса +2 -10 мм.

Анализ полученных результатов показывает, что ведение процесса дробления в замкнутом цикле позволяет получить оптимальный по гранулометрическому составу продукт, характеризующийся максимальным выходом «продуктивного класса» в области значений ширины разгрузочной щели 7,5-8,5 мм. При этом абсолютное значение выхода «продуктивного класса» в дробленой руде при использовании замкнутой схемы (70,5%) значительно превышает соответствующее значение для открытого цикла (61,2%). Полученные результаты обосновывают целесообразность использования параметра выход продуктивного класса -2 + 10 мм при оптимизационном управлении процессом мелкого дробления в замкнутом цикле.

Алгоритм управления процессом дробления, представленный на рисунке 6, предполагает измерение вышеописанных параметров руды и работы дробилок и регулирование нагрузки на передел дробления в замкнутом цикле и ширины разгрузочной щели дробилки. При расчете изменения ширины разгрузочной щели и изменения производительности дробилки используются заложенные в модель коэффициенты математических зависимостей конечных показателей от входных и промежуточных параметров.

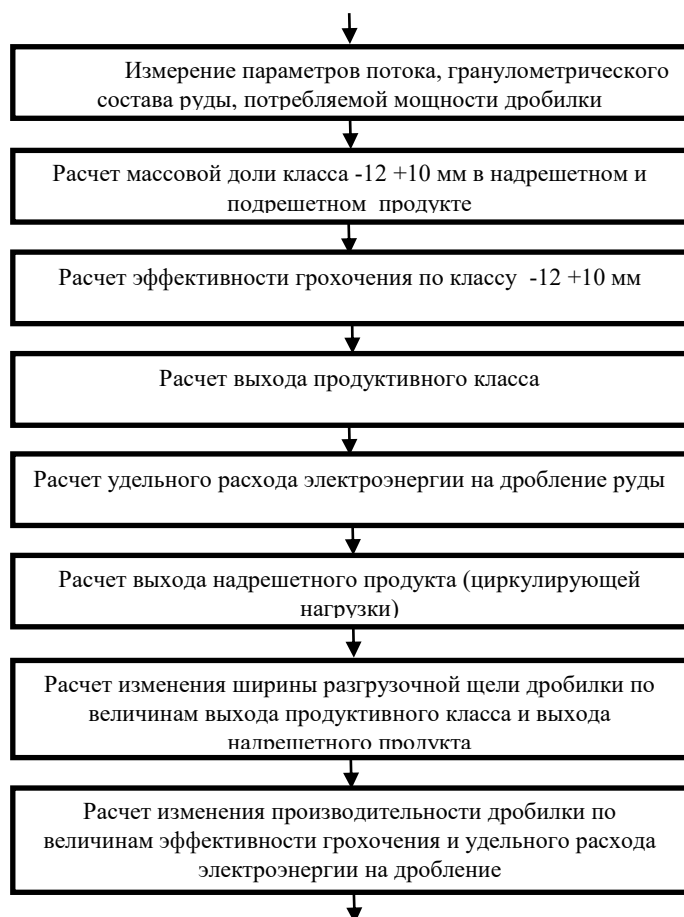


Рисунок 6. Схема алгоритма модель-ориентированного управления процессами дробления и грохочения в замкнутом цикле

**В пятой главе работы** представлено описание и параметры способа и системы визиометрического анализа гранулометрического состава дробленой руды в условиях непрерывного потока от нескольких дробильно-сортировочных комплексов.

Реализация алгоритма модель-ориентированного управления возможна при наличии системы оперативного измерения гранулометрического состава дробленой руды. Важными задачами является выбор точки и способа контроля гранулометрического состава дробленой руды. На обогатительной фабрике ГОКа Эрдэнэт датчик системы «ГРАНИКС» для видеоконтроля гранулометрического состава руды был установлен над конвейером разгрузки грохотов (рисунок 7).

При работе видеодатчиков информация от устройств съема видеоизображений 7,8 передавалась в процессор 9, где проводилось распознавание изображения и расчет гранулометрического состава продукта по встроенной программе системы «ГРАНИКС» (разработчик программного обеспечения Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина). Обработанная информация передавалась в сервер дробильно-транспортного отделения 10, где выполнялись операции системы автоматизированного управления.

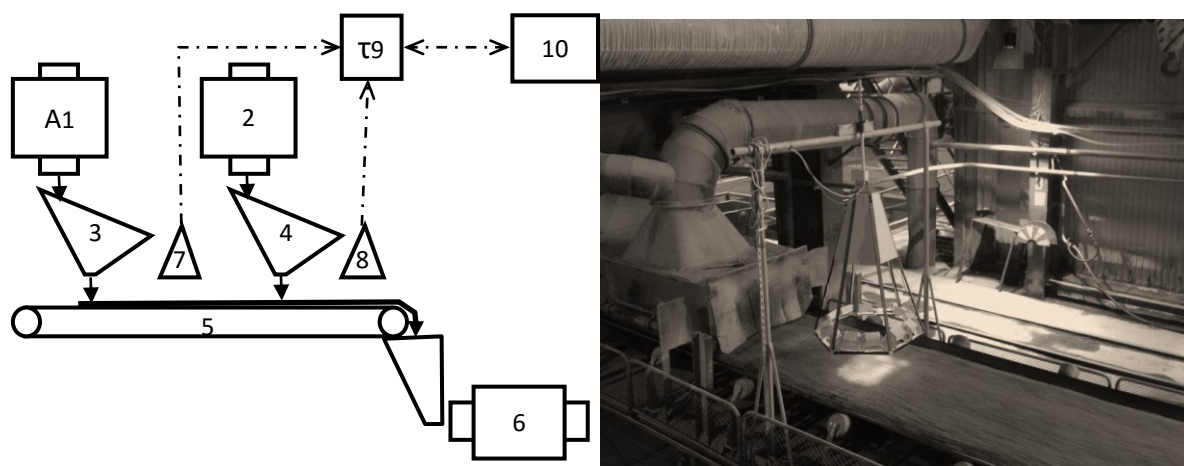


Рисунок 7. Схема и общий вид установки видеодатчика системы «ГРАНИКС»:  
1, 2 - дробилки; 3, 4 - грохоты; 5- конвейер; 6 - барабанная мельница; 7, 8 – устройства  
съема видеоизображений; 9 – процессор; 10 – сервер

В алгоритме обработки изображений, промежуточные стадии которого представлены на рисунке 8, использовалась процедуры гистограммной обработки изображений, пороговой бинаризации полутоновых участков, пространственной фильтрации изображений, выделение контуров, визуализации результатов сегментации и расчета гистограмм распределения крупности.

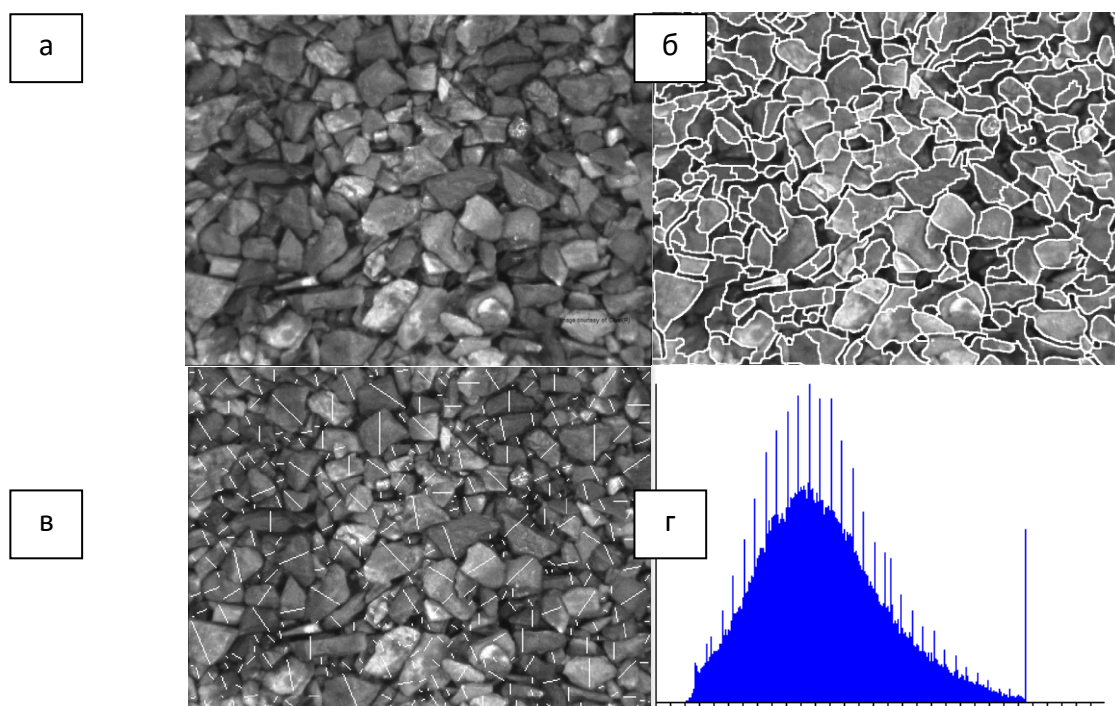


Рисунок 8. Изображение дробленой руды на стадии захвата изображения (а),  
выделения контуров зерен (б), визуализации результатов сегментации (в) и  
результат расчета гистограммы распределения крупности (г)

Анализ временных графиков показывает высокую чувствительность системы «ГРАНИКС» к изменениям гранулометрического состава дробленых кусков руды, в частности оперативную реакцию выхода класса +12 мм на увеличение производительности, уменьшение ширины разгрузочной щели и уменьшение производительности.

Для оценки чувствительности системы «ГРАНИКС» в ДТО были проведены эксперименты с отключением всех дробилок за исключением одной, работавшей при различной нагрузке. Согласно программе промышленных испытаний в момент отбора проб была произведена запись видеоизображений потока руды на конвейере № 18, с которого отбиралась проба. Было записано 136 видеоизображений. Одновременно в ЦИЛ ГОКа был произведен анализ проб и получены значения выходов классов +12, -12 +10, -10 +6, -6 +2 и -2 мм. Сравнения показаний системы «ГРАНИКС» и данных ЦИЛ позволили оценить достоверность анализа с использованием видеоанализатора по отдельным классам крупности (таблица 2).

Результаты анализа показали, что относительные расхождения в показаниях составляют по классам от 2,67 до 7,51%. Проведенные испытания показали, что визиометрический анализ руды на конвейере наименее точно отражает выход мелких классов (СКО 7,5%).

Таблица 2. - Гранулометрический состав руды по показаниям системы «ГРАНИКС» и по данным лабораторного анализа

| Класс, мм | Результаты анализа                                              |       |       |                                         |       |       |                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------------------------------|-------|-------|-----------------------|
|           | Выход класса по данным анализа на конвейере (система «ГРАНИКС») |       |       | Выход класса по данным анализа рассевом |       |       | Отн. ошибка измерений |
|           | мин                                                             | макс  | сред  | мин                                     | макс  | сред  |                       |
| +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                  |
| итого     | 100,0                                                           | 100,0 | 100,0 | 100,0                                   | 100,0 | 100,0 | 100,0                 |

Это связано с тем, что указанные классы находятся в агрегированном состоянии. Для анализа гранулометрического состава руды по классу – 2 мм был применен метод сравнительной оценки. Результаты визиометрического анализа позволили установить корреляционное соотношение между выходами класса -6 мм и класса -2 мм. Высокое значение коэффициента корреляции (0,94) позволило



использовать данное корреляционное соотношение в дальнейшем для расчета выхода класса  $-6 + 2$  мм и, соответственно, продуктивного класса  $-10 + 2$  мм.

Для оперативного измерения гранулометрического состава кусковых сыпучих материалов была испытана телевизионная компьютерная система «ГРАНИКС». При визиометрическом анализе потока получали информацию о гранулометрических характеристиках минусового и плюсового классов и их выходах. Величина выхода корректировалась показаниями конвейерных весов, настроенных на уменьшенный диапазон значений измеряемых масс.

Для повышения точности анализа был предложен специальный режим визиометрического анализа, предусматривающий последовательное включение-выключение питающих конвейеров дробилок и самих дробилок, за счет чего обеспечивается поступление в зону измерений в каждый момент времени дробленого продукта лишь с одной дробилки.

Точки контроля гранулометрического состава руды расположены на конвейерах надрешетного и подрешетного продукта.

Выбранный режим подачи разгрузки дробилки и мелкого класса грохочения на операцию визиометрического анализа создает условия для более точного анализа крупности дробленой руды. Предложенный режим не приводит к снижению производительности дробильного отделения, поскольку в этот промежуток времени проводятся плановое обслуживание оборудования. Общая продолжительность анализа крупности руды от 6 дробилок составила 12 минут.

Реализация предложенного алгоритма визиометрического измерения гранулометрических характеристик дробленой руды уменьшила ошибку измерений. Так среднеквадратичное отклонение результатов визиометрического анализа относительно данных ОТК снизилось до 2,4%, а максимальное отклонение в отдельных опытах не превысило 5,4%.

**В шестой главе работы** дано описание и представлены результаты испытаний системы автоматизированного управления процессами дробления и грохочения на основе измерения гранулометрических характеристик руды и расхода энергии

Разработанная система оперативного управления процессами дробления и грохочения (рисунок 11) включает установленные на конвейерах подачи исходного питания и возврата надрешетного продукта грохочения весы 1,2, установленные на конвейерах готового класса и возврата надрешетного продукта визиометрические анализаторы 3,4, датчики потребляемой мощности дробилки мелкого дробления 5 и блок управления (процессор) 6.

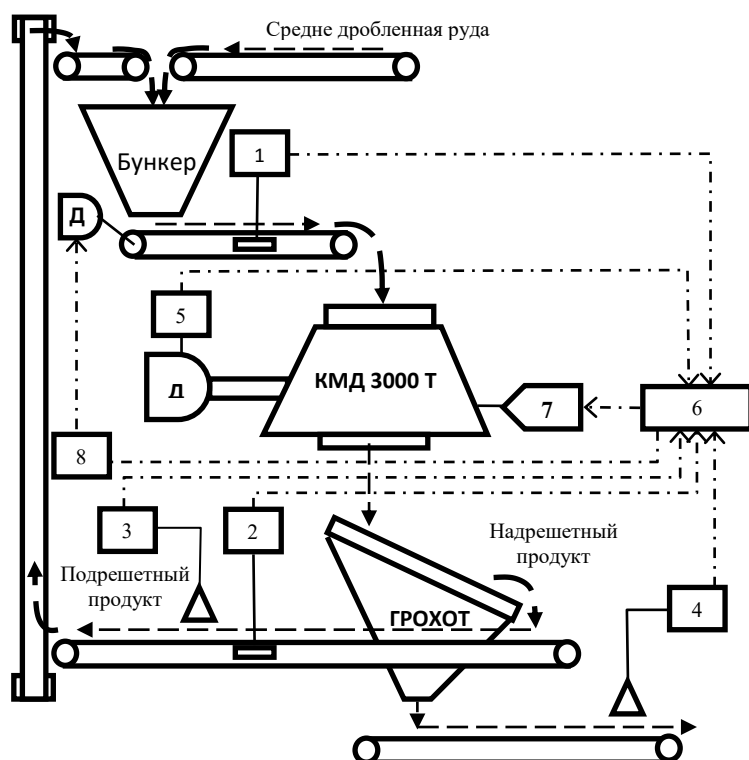


Рисунок 9. Система управления технологическими процессами дробления и грохочения на основе оперативного визиометрического анализа гранулометрического состава продуктов и расхода энергии: 1,2 - конвейерные весы; 3,4 - визиометрические анализаторы гранулометрического состава; датчик электрической мощности; 6 - процессор; 7 - регулятор ширины разгрузочной щели; 8 - регулятор расхода руды

Управление процессом дробления предусматривает анализ гранулометрического состава надрешетного и подрешетного продуктов, расчет балансов по классам крупности, расчет эффективности грохочения по контрольному классу, расчет выхода продуктивного класса.

Одновременно в процессор поступает сигнал, характеризующий электрическую мощность, потребляемую приводом дробилки. Затем производится определение рекомендуемой корректировки ширины разгрузочной щели и производительности дробилки. Временной интервал проведения корректировки параметров процесса дробления определяется общим состоянием показателей и проводится не реже чем один раз в смену.

При реализации алгоритма модель-ориентированного автоматизированного управления процессом дробления производится расчет оптимальных изменений основных технологических параметров - производительности и ширины разгрузочной щели. Принцип регулирования по используемому алгоритму использует базу данных таблиц 3 и 4, в которых представлен выбор управляющего решения (выделено серым цветом) по изменению производительности дробилки и ширины разгрузочной щели дробилки в зависимости от значений измеренных параметров процесса - эффективности грохочения по классу -12+10 мм, потребляемой мощности на процесс дробления, выходу продуктивного класса.

Таблица 3. Выбор управляющего воздействия по оптимизации производительности дробилки по величинам эффективность грохочения и потребляемой мощности привода дробилки

| Потребляемая мощность, кВтч/т | Эффективность грохочения по классу -12+10 мм,% |       |       |       |          |
|-------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|----------|
|                               | Менее 60                                       | 60-65 | 65-70 | 70-75 | Более 75 |
| Более 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%    |
| Менее 0,775                   | 0                                              | +2,5% | +5%   | +7,5% | +10%     |

Разработанная система модель-ориентированного управления процессом дробления была испытана в промышленных условиях на обогатительной фабрике ГОКа Эрдэнэт. Результаты промышленных испытаний показали, что система управления процессом дробления с использованием визиометрического контроля крупности дробленой руды и потребляемой энергии позволяет реализовать способ оптимизации процесса дробления по критериям выход продуктивного класса и циркулирующая нагрузка и получить дробленый продукт заданной крупности (95% класса – 12 мм). Использование системы позволяет увеличить производительность передела на 5,7% и сократить удельный расход электроэнергии на общий процесс рудоподготовки (дробление, измельчение) на 2,8% (таблица 4).

Таблица 4. - Основные показатели цеха дробления при испытаниях системы управления расходом руды по выходу продуктивного класса

| Режим дробления - грохочения                                                              | Производительность на 1 дробилку, т/ч | Расход энергии на мелкое дробление, кВтч/т | Расход энергии на измельчение, кВтч/т | Выход класса -12 мм в дробленой руде, % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| В замкнутом цикле с подтяжкой разгрузочной щели (базовый вариант)                         | 440                                   | 0,80                                       | 4,19                                  | 95,5                                    |
| В замкнутом цикле с регулированием ширины разгрузочной щели и производительности дробилки | 465                                   | 0,81                                       | 4,06                                  | 95,6                                    |

Экономический эффект от сокращения расхода электроэнергии в операциях рудоподготовки по данным экономической оценки результатов испытаний составил 160,3 тыс. долларов США.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований решена задача повышения эффективности рудоподготовки на основе применения непрерывного визиометрического анализа гранулометрического состава продуктов дробления и грохочения, обеспечившая повышение производительности передела дробления и сокращение расхода электроэнергии на дробление и измельчение.

### **Основные выводы по работе:**

1. Установлены закономерности формирования гранулометрического состава дробленой руды при варьировании технологических параметров и разработана многопараметрическая модель процессов дробления и грохочения в замкнутом цикле, представленная в виде количественных соотношений, определяющих взаимосвязанное изменение параметров гранулометрического состава, эффективности грохочения, циркулирующей нагрузки, энергоемкости дробления с производительностью и шириной разгрузочной щели дробилки.

2. Разработаны критерии оптимизации процессов дробления в замкнутом цикле с проверочном грохочением: выход продуктивного класса (-10 +2 мм) и эффективность грохочения по критическому классу (-12+10 мм). Разработан алгоритм оптимизационного управления процессами дробления и грохочения на основе непрерывного визиометрического анализа параметров гранулометрического состава руды и энергозатрат на дробление.

3. Разработан способ визиометрического анализа гранулометрического состава дробленой руды, включающий операции получения изображения, их обработки, включая операции выделения контуров зерен, визуализации результатов сегментации и расчета гистограммы распределения кусков руды по крупности, расчет выходов заданных классов крупности.

4. Разработана схема и алгоритм визиометрического анализа гранулометрического состава дробленой руды, включающий последовательное включение-выключение питающих конвейеров дробилок и самих дробилок, за счет чего обеспечивается поступление в зону измерений в каждый момент времени дробленого продукта лишь с одной дробилки, чем обеспечивается повышение точности и надежности измерений в условиях непрерывного потока от нескольких дробильно-сортировочных комплексов.

5. Разработана система и программный модуль управления технологическими процессами дробления и грохочения на основе оперативного

визиометрического измерения и анализа гранулометрического состава продуктов и расхода энергии в процессах дробления и грохочения, обеспечивающая ведение технологического процесса в условиях поддержания оптимальной производительности оборудования и заданной крупности дробленой руды.

6. Проведенными промышленными испытаниями показано, что использование разработанной системы управления процессом дробления позволяет увеличить производительность передела на 5,7% и сократить удельный расход электроэнергии на общий процесс рудоподготовки (дробление, измельчение) на 2,8%. Экономический эффект от сокращения расхода электроэнергии в операциях рудоподготовки составил 160,3 тыс. долларов США.

### **Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях:**

#### **Публикации в изданиях из списка ВАК**

1. Морозов В. В., Рапшис В. В., Дэлгэрбат Л, Хурлчулуун Ишген. Развитие методик визиометрического анализа руды на ГОКе Эрдэнэт // Горный информационно-аналитический бюллетень, №12, 2016. –С.279-292.

2. Хурлчулуун Ишген, Морозов В. В. Применение визиометрического анализа гранулометрического состава руды для автоматизированного управления процессом дробления // Руда и металлы. 2019, - №1. - С. 67-73.

#### **Другие публикации.**

3. Хурлчулуун Ишген, Морозов В. В. Исследование и оптимизация замкнутого цикла дробления медно-молибденовой руды // Горные науки и технологии. - 2018. - №4. - С. 18-24 (РИНЦ).

4. Даваасамбуу Д., Эрдэнэцогт Д., Хурэлчулуун Ишген. Оптимизация процессов дробления и измельчения медно-молибденовых руд на основе применения оптических методов анализа // Труды X Конгресса обогатителей стран СНГ, Москва, МИСиС, 26—28 февраля 2015 г. – С. 145-149 (РИНЦ).

5. Хурэлчулуун Ишген, Рапшис В.В. Оптимизация процессов рудоподготовки и обогащения с применением оперативного анализа медно-молибденовых руд // Труды Международной конференция «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. - Екатеринбург, 15-16 апреля 2015 г. –С. 276-279 (РИНЦ).

6. Хурэлчулуун Ишген, Дуда А.М., Дэлгэрбат Л. Применение методов визиометрического анализа для управления процессами обогащения медно-молибденовых руд // Труды межд. совещ. «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» Плаксинские чтения – 2015». - Иркутск 2015. - С. 263-266 (РИНЦ).

7. Хурэлчулуун Ишген. Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе применения оптических методов анализа // Труды Международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. -

Екатеринбург, 2015 г. –С.108-112 (РИНЦ).

8. Хурэлчулуун Ишген, Круглов В.Н. Промышленные испытания и модернизация системы измерения крупности дробленной руды «ГРАНИКС» // Труды Международной конференция «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. - Екатеринбург, 2016 г. –С. 118-121 (РИНЦ).

9. Хурэлчулуун Ишген. Оптимизация системы и алгоритма контроля крупности дробленной руды // Труды XI Конгресса обогатителей стран СНГ, Москва, МИСиС, 13-15 марта 2017 г. –С.165-168.

10. Хурэлчулуун Ишген. Обоснование критериев оптимизации при управлении процессом дробления в замкнутом цикле // Материалы научно-технической конференции «Инновационные технологии обогащения минерального сырья» Екатеринбург, 2017. С.45-49 (РИНЦ).

11. Хурэлчулуун Ишген. Оптимизация системы и алгоритма контроля крупности дробленной руды // Труды Международной конференция «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. - Екатеринбург, 2017 г. –С.270-273 (РИНЦ).

12. Хурэлчулуун Ишген, Морозов В.В. Оптимизация дробления медно-молибденовой руды в замкнутом цикле // Труды Международной конференция «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. - Екатеринбург, 2018 г. –С. 6-10 (РИНЦ).

13. Erdenezul Jargalsaikhan<sup>1</sup>, Khurelchuluun Ishgen. Process optimization of grinding and flotation of copper-molybdenum ores with the use of model-based criteria // proceedings of 22nd International Conference on Environment and Mineral Processing, 31 May - 2 June, 2018, VŠB – Technical university of Ostrava, Czech republic. Pp. 165-170.