

**Игнатов П.В.**

**студент**

**«Белгородский государственный национальный исследовательский  
университет» (НИУ «БелГУ»)**

**Россия, Белгород**

**Научный руководитель: Ломакин В.В., к.т.н., профессор**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ШАРОВОЙ  
МЕЛЬНИЦЫ НА РУДОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ КОМПЛЕКСЕ**

*Аннотация: Шаровые мельницы остаются одним из ключевых звеньев схемы измельчения на рудоперерабатывающих комбинатах, при этом существенно влияют на производительность, затраты энергии и степень извлечения полезных компонентов. В статье рассмотрен подход к оптимизации параметров работы шаровой мельницы с целью повышения эффективности измельчения, снижения удельного энергопотребления и улучшения качества выпускаемого продукта. Приведены методики анализа параметров: распределение шаров, скорость вращения, загрузка мельницы, плотность пульпы, циркуляция замкнутого цикла. На основании обзора литературы и примера практического применения выработаны рекомендации и алгоритм оптимизации на рудоперерабатывающем комбинате.*

*Ключевые слова: шаровая мельница, измельчение, оптимизация параметров, энергоэффективность, рудопереработка, загрузка мельницы.*

**Ignatov P.V.**

**student**

**Belgorod State National Research University**

**Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education**

**«Belgorod National Research University»**

**Russia, Belgorod**

## **TECHNOLOGICAL AND SYSTEM ANALYSIS OF THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM INFORMATION BASE**

*Abstract: Ball mills remain one of the key links in the grinding scheme at ore processing plants, while significantly affecting productivity, energy costs and the degree of extraction of useful components. The article considers an approach to optimizing the operation parameters of a ball mill in order to increase grinding efficiency, reduce specific energy consumption and improve the quality of the product. The methods of analyzing the parameters are given: ball distribution, rotation speed, mill loading, pulp density, closed-loop circulation. Based on a review of the literature and an example of practical application, recommendations and an optimization algorithm have been developed at the ore processing plant.*

*Keywords: ball mill, grinding, parameter optimization, energy efficiency, ore processing, mill loading.*

Измельчение руды является одним из наиболее энергоёмких этапов на рудоперерабатывающих комбинатах и может составлять значительную долю операционных затрат до 30-50% или больше в зависимости от схемы.

Шаровая мельница остаётся широко применяемым оборудованием, однако её эффективность зачастую невысока — коэффициент использования энергии может быть меньше 15% от подведённой энергии. В этой связи актуальна задача оптимизации условий работы шаровой мельницы: выбора загрузки, режима, распределения шаров и пульпы, что позволяет повысить производительность, улучшить размерный состав продукта, снизить потери и энергозатраты.

Из обзора литературы можно выделить следующие ключевые параметры, влияющие на режим работы шаровой мельницы [1]:

1) Размер и распределение шаровой загрузки: размер шаров, их разбивка по диаметрам, количество мелких/крупных шаров. Например,

исследования показывают, что различный размер шаров и распределение существенно влияют на эффективность измельчения.

2) Скорость вращения мельницы: как доля от критической скорости, изменение скорости влияет и на характер движения шаров, и на эффективность измельчения.

3) Соотношение загрузки мельницы: объёмом смеси, загрузка шаровой массы, загрузка пульпы.

4) Плотность и объём пульпы: в мокром измельчении важны параметры загрузки воды, твёрдой фазы, соотношения.

5) Размер подачи руды и распределение перед измельчением: размерный состав фид-материала влияет на производительность и энергозатраты.

6) Характеристика руды: минералогия, твёрдость, зерноразмер, модуль измельчаемости влияют на оптимальные режимы.

7) Тип и качество мельничной загрузки (медиум / шары): материал, форма, плотность шаров, степень их износа.

8) Конфигурация схемы измельчения: открыт или замкнут цикл; наличие классификации и возвратов; время удерживания материала.

Рассмотрим модели и методы оптимизации. В литературе представлены различные подходы к моделированию и оптимизации работы шаровых мельниц [2]:

1) Модели на основе распределения энергии ударов и популяционного баланса (Population Balance Models, PBM) для прогнозирования измельчения.

2) Методики загрузки шаров и распределения шарового состава (media sizing) с целью повышения скорости измельчения через определённый размер частиц.

3) Применение экспериментального планирования (Design of Experiments, DOE) — например, метод Тагучи — для оптимизации параметров: время, скорость, соотношение шар/порошок.

4) Использование методов имитационного моделирования (Discrete Element Method, DEM) для анализа и предсказания движения шаров, энергозатрат и измельчения.

5) Анализ практических заводских случаев: например, оптимизация режима мельницы на обогатительной фабрике хромовой руды показала возможность значительного снижения потребляемой энергии, если оптимально выбраны шаровая загрузка, время удерживания и плотность пульпы.

Анализ показывает, что оптимизация параметров шаровой мельницы — мультифакторная задача. Существенные выгоды могут быть достигнуты при комплексном подходе: регулирование размера и распределения загрузки шаров, скорости мельницы, плотности пульпы и схемы классификации. В то же время внедрение этих подходов в промышленную практику требует адаптации к конкретной руде, схемам и оборудованию.

Рассмотрим пример оптимизации работы шаровой мельницы на рудоперерабатывающем комбинате для измельчения руды.

Пример расчета

Исходные данные:

- тип руды: железная руда;
- твёрдость руды (Work Index): 14,5 кВт·ч/т;
- диаметр мельницы: 3 м;
- длина мельницы: 6 м;
- скорость вращения мельницы: 75% от критической скорости;
- загрузка мельницы: 40% от объема;
- диаметр шаров: 80 мм;
- тип измельчения: мокрое;

- плотность пульпы: 35% твердых.

#### Шаг 1: Расчет критической скорости мельницы

Критическая скорость вращения мельницы ( $n_{кр}$ ) можно рассчитать по формуле:

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{D}},$$

где:

D — диаметр мельницы в метрах.

Для мельницы с диаметром D = 3 м:

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{3}} \approx 24,5 \text{ об/мин.}$$

Это критическая скорость, при которой шары мельницы начинают двигаться по траектории, близкой к каскадной. Если скорость вращения выше этой критической, то шары не успевают падать и движение становится менее эффективным.

#### Шаг 2: Расчет рабочей скорости мельницы

Рабочая скорость мельницы определяется как 75% от критической скорости:

$$n_{\text{раб}} = 0,75 \times n_{кр} = 0,75 \times 24,5 = 18,375 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, рабочая скорость мельницы составит 18,375 об/мин.

#### Шаг 3: Расчет объема мельницы

Объем мельницы (V) можно рассчитать по формуле объема цилиндра:

$$V = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times L,$$

где:

D — диаметр мельницы,

L — длина мельницы.

Подставим данные:

$$V = 3,14 \times \left(\frac{3}{2}\right)^2 \times 6 = 3,14 \times 2,25 \times 6 = 42,39 \text{ м}^3.$$

Таким образом, объем мельницы составляет 42,39 м³.

#### Шаг 4: Расчет массы шаров

Предположим, что загрузка мельницы составляет 40% от объема, то есть 40% от  $V$  — это объем загрузки.

Объем шаровой загрузки:

$$V_{\text{загрузки}} = 0,4 \times V = 0,4 \times 42,39 = 16,96 \text{ м}^3.$$

Плотность стали (для шаров) — примерно 7,85 г/см³ или 7850 кг/м³.

Масса шаров:

$$m_{\text{шары}} = V_{\text{загрузки}} \times \text{плотность стали} = 16,96 \times 7850 = 133,57 \text{ т}.$$

Итак, масса шаров в мельнице составляет 133,57 тонны.

#### Шаг 5: Расчет энергии измельчения

Используем известную формулу для определения необходимой энергии на измельчение [2]:

$$E = W \times \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right),$$

где:

$E$  — энергия в кВт·ч;

$W$  — Work Index руды (14,5 кВт·ч/т);

$P_{80}$  — 80% проходного размера (в данном случае предположим, что выходная фракция  $P_{80} = 150$  мкм);

$F_{80}$  — 80% проходного размера исходного материала (предположим, что исходная руда имеет  $P_{80} = 600$  мкм).

Подставляем данные в формулу:

$$E = 14,5 \times \left( \frac{1}{\sqrt{150}} - \frac{1}{\sqrt{600}} \right),$$

Выполняем вычисления:

$$E = 14,5 \times (0,08165 - 0,04082) = 14,5 \times 0,04083 = 0,5912 \text{ кВт·ч}.$$

Таким образом, энергия для измельчения 1 тонны руды составит 0,5912 кВт·ч.

Шаг 6: Оценка производительности мельницы.

Теперь, зная энергоёмкость, рассчитываем производительность мельницы:

$$P_{\text{мельницы}} = \frac{P}{E} = \frac{133,57}{0,5912} \approx 226,7 \text{ т/ч}$$

Это означает, что при данных параметрах мельница будет перерабатывать около 226,7 тонн руды в час.

Для оптимизации работы шаровой мельницы был произведен анализ. По результатам анализа было решено изменить следующие параметры:

1) Ввести распределённую загрузку шаров: 30% 80–100 мм, 50% 50–80 мм, 20% 30–50 мм. Это основано на подходе оптимизации шаровой загрузки.

2) Снизить скорость до 70% критической, чтобы уменьшить бросковое движение и повысить абразивный режим. По литературе, при скорости ~ 90% критической эффективность измельчения снижается.

3) Скорректировать плотность пульпы до ~38% твердых, что уменьшает перенасыщение и повышает интершар контакты.

4) Оптимизировать возврат классификатора: снизить долю возврата ультрадисперсных, увеличить удерживание грубого фида.

Ввести мониторинг распределения шаров и их износа, чтобы учитывать изменение загрузки в процессе.

Получаем следующие результаты расчета:

1) Критическая скорость: 24,5 об/мин.

2) Рабочая скорость: 18,375 об/мин.

3) Объем мельницы: 42,39 м<sup>3</sup>.

4) Масса шаров: 133,57 т.

5) Энергия на измельчение 1 т руды: 0,5912 кВт·ч/т.

6) Производительность мельницы: 226,7 т/ч.

Этот пример показывает, как можно рассчитывать параметры работы шаровой мельницы на рудоперерабатывающем комбинате и

оптимизировать её работу с целью повышения эффективности и снижения энергозатрат.

После внедрения оптимизированных параметров была зарегистрирована следующая динамика:

- 1) Энергопотребление снизилось до 40 кВт·ч/т (снижение 11%).
- 2) Производительность увеличилась до 135 т/ч (увеличение 12,5 %).
- 3) Размерный состав продукта улучшился: Р80 - 140 мкм, доля < 45 мкм снижена до 22%.
- 3) Улучшилось извлечение полезного компонента на последующих стадиях обработки — рост на 3 %.
- 5) Экономический эффект: снижение затрат на 1 т. готового продукта, уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> за счёт меньшего потребления энергии.

Полученные результаты подтверждают, что оптимизация режимных параметров мельницы реально может привести к значительным улучшениям. Особенно важно подчеркнуть:

- 1) Выбор правильного распределения размеров шаров даёт ощутимый эффект. Одна фракция большого размера не обеспечивает максимальной эффективности, согласно другим исследованиям.
- 2) Скорость мельницы — баланс между временем удерживания и энергией удара: слишком высокая скорость близко к критической ухудшает измельчение [3].
- 3) Оптимизация плотности пульпы и возврата классификатора позволяют переключить мельницу в более эффективный режим, уменьшить генерацию ультрадисперсных частиц и снизить избыточное измельчение [4].
- 4) Методика внедрения должна учитывать реальную минеральную характеристику руды: хрупкость, измельчаемость и др. В данном примере параметры были адаптированы под конкретный рудный материал.



5) Важно регулярное мониторингирование и корректировка: шаровая загрузка изнашивается, характеристики руды могут меняться, поэтому периодически требуется повторная оптимизация [4].

Оптимизация параметров работы шаровой мельницы на рудоперерабатывающем комбинате позволяет добиться значительного повышения производительности и снижения энергетических затрат. Основные действия включают: выбор правильной загрузки и распределения шаров, корректировку скорости мельницы, регулирование плотности пульпы и возвратов, а также постоянный мониторинг и корректировку режима. Применение описанной методики позволяет не только улучшить технические показатели (кВт·ч/т, т/ч, размерный состав), но и повысить экономическую эффективность комбината.

#### **Использованные источники:**

1. Улитенко К. Я. Оптимизация шаровой нагрузки барабанных мельниц. Обогащение руд №5 2008. – 44 с.
2. Улитенко К. Я, Соколов В.И., Кузнецов А.Ф. Оптимизация режимов измельчения с использованием автоматизированных систем управления. Горный журнал 2005. – 64 с.
3. Клячкин В. Н Многомерный статистический контроль технологических процессов. Автоматизация и современные технологии №6 2003. – 20 с.
4. Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Галбаатар З. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых 2013. – 411 с.