

УДК 622.73

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

**Н.С. ПРЯДКО**, д-р техн. наук

(Украина, Днепр, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ)

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД**

Постановка проблемы. Снижение энергопотребления при измельчении полезных ископаемых всегда являлось актуальной задачей, поскольку этот процесс капиталоемкий, энергоемкий и оказывает существенное влияние на себестоимость продукции обогатительных фабрик. Для снижения энергопотребления при тонком измельчении руд необходимо для данной руды с ее физико-механическими свойствами выбрать режим измельчения, обеспечивающий максимально возможную производительность по образованию контрольного класса крупности при обеспечении такого его содержания, которое позволяет получить необходимую степень раскрытия вкрапленных минералов.

Анализ публикаций. Одним из основных параметров, определяющих производительность измельчительной установки, является крупность исходного питания размером  $d$ . Влияние среднего размера куска руды на процесс измельчения оценивают по относительному изменению удельной производительности по вновь образованному классу крупности  $K_k$  или по относительному изменению производительности мельницы по исходному питанию  $M_k$ . Для определения  $K_k$  и  $M_k$  используют зависимости К.А. Разумова [1]:

$$K_k = m/m_\varepsilon \quad (1)$$

$$M_k = \frac{q_0}{q_{0\varepsilon}} = \frac{q_d}{\beta_d - \alpha_d} \cdot \frac{\beta_d - \alpha_{d\varepsilon}}{q_{d\varepsilon}} = \frac{m}{m_\varepsilon} \cdot \frac{\beta_d - \alpha_{d\varepsilon}}{\beta_d - \alpha_d} = K_k M_a \quad (2)$$

где  $q_d$  и  $m$  – удельная производительность по вновь образованному классу -0,074 мм соответственно в т/(м<sup>3</sup>·ч) и в отн. ед.;  $\varepsilon$  – индекс, обозначающий показатели при измельчении руды с эталонной крупностью  $d_0$ ;  $\alpha_d$  и  $\alpha_{d\varepsilon}$  – содержание класса -0,074 мм в исходном питании мельницы соответственно при  $d_0$  и  $d_{0\varepsilon}$  (мм или мкм), доли ед.;  $M_a$  – коэффициент, отражающий влияние изменения содержания класса -0,074 мм в исходном питании на производительность мельницы по руде.

Основным качественным показателем работы измельчительной установки, отражающим соответствие гранулометрического состава продукта и его крупности заданным требованиям технологии обогащения, принято считать содержание расчётного класса крупности –  $d$  в готовом продукте  $\beta_d$ . Скорость образования расчётного класса крупности в единице рабочего объема мельниц ха-

## **Підготовчі процеси збагачення**

---

рактируется удельной производительностью по вновь образованному расчётному классу крупности -0,071 мм (или по другому размеру расчётного класса). Относительную измельчаемость принято [1] оценивать отношением:

$$K_{изм} = q_d / q_{dэ} , \quad (3)$$

где  $q_d$  и  $q_{dэ}$  – удельная производительность мельницы по вновь образованному расчетному классу –  $d$  соответственно исследуемой и эталонной руд, т/(м<sup>3</sup>·ч) или кг/(дм<sup>3</sup>·ч). Предполагается, что относительная измельчаемость в промышленных и лабораторных условиях одинакова и не зависит ни от размера мельниц, ни от схемы измельчения. Исходя из этого, практически все методики определения измельчаемости основаны на исследовании исходной и эталонной руд в лабораторных мельницах различных диаметров, а полученные при этом результаты, наряду с технологическими показателями промышленных измельчительных установок, используются для расчета производительности мельниц.

По гранулометрическому составу готовых продуктов и исходных проб графическим способом определяется 80%-ная крупность продуктов и рассчитывается "индекс чистой работы" [2], который, например, для шарового измельчения определяют по уравнению:

$$W_{ии} = 44,5 / a^{0,23} q_n^{0,820} 10(1/\sqrt{P} - 1/\sqrt{F}) , \quad (4)$$

где  $W_{ии}$  – "индекс чистой работы", равный расходу электроэнергии шаровой мельницы сливного типа диаметром 2440 мм при мокром измельчении 907 кг материала от бесконечной крупности до 80% класса -0,100 мм, кВт·ч/кор.т.;  $a$  – размер ячейки сита, на котором проводилось выделение готового продукта, мкм;  $q_n$  – количество вновь образованного продукта "минус  $a$ " за один оборот барабана, г/об.;  $F$  и  $P$  – 80% – ная крупность исходного и готового продуктов, мкм.

Подобная зависимость была получена и для стержневых мельниц. Методика Ф. Бонда предполагает, что потребляемая мельницей периодического действия мощность не изменяется во время измельчения и остаётся постоянной величиной.

Цель работы заключается анализе критериев оценки эффективности работы мельниц замкнутого цикла измельчения.

Основной материал. Относительная измельчаемость, например, двух руд по Ф. Бонду определяется отношением "индексов чистой работы" и зависит от распределения классов крупности в исходных пробах и от размеров ячейки сит, на которых достигается равенство крупности готового продукта. Гипотеза Бонда также строится по принципу двух параметров: начальной и конечной крупности материала. Очевидно, что удовлетворительная аппроксимация методик выбора дробильно-измельчительного оборудования, основанных на перечисленных выше гипотезах может быть достигнута только в ограниченной пара-

метрической области. Следовательно, все перечисленные выше зависимости не могут претендовать на роль фундаментальных законов и являются эмпирическими уравнениями. Общепринятая методика Бонда сыграла большую роль при выборе измельчительного оборудования для обогатительных предприятий. Однако, применение методики Бонда для расчета мельниц тонкого измельчения, самоизмельчения (AG) и полусамоизмельчения (SAG) иногда дает значительные погрешности.

Анализ известных зависимостей позволяет утверждать, что применение методик на базе начальной и конечной крупности для равнозначных процессов в однотипных машинах может использоваться для сравнительного анализа эффективности распределения работы дезинтеграции между последовательными операциями. Сравнение эффективности работы мельниц разных стадий в настоящее время ведётся по таким показателям как удельная производительность по готовому классу крупности и удельная энергетическая эффективность измельчения по вновь образованному классу. Рассмотренные показатели учитывают образование только расчетного класса крупности и не учитывают образование при этом других классов. Анализ удельных показателей для мельниц первой и второй стадий измельчения показывает, что в ряде случаев в практике много стадийного измельчения имеет место неравномерное распределение нагрузки между последовательными стадиями. Для определения равномерности распределения энергии измельчения между стадиями существует методика определения энергетических затрат с учетом всех классов крупности. Для оценки энергетической эффективности с учетом образования всех классов крупности было введено понятие "индекс измельчаемости" [3]. Под термином "индекс измельчаемости"  $I_s$  предлагается понимать отношение количества вновь образованной поверхности  $\Delta S$  ( $m^2$ ) к затраченной на её образование энергии  $N \cdot t$  (кВт·ч):

$$I_s = \Delta S / (N \cdot t). \quad (5)$$

Расчет индексов измельчаемости для двухстадийных циклов измельчения мельниц первой и второй стадий показал, что в ряде случаев мельницы второй стадии оказались недогруженными измельчаемым материалом, при этом энергозатраты на образование новой поверхности оказались в разы выше. Причиной этого явилось, с одной стороны, не учет энергии измельчения на образование всех классов крупности с использованием существующих расчетов, с другой стороны несовершенство классифицирующего оборудования.

Моделирование схем замкнутых циклов тонкого измельчения авторам [4] позволило получить зависимость для удельной производительности мельницы по вновь образованному контрольному классу при выполнении технологического задания получения требуемой дисперсности измельченного продукта в виде:

$$q_a^v = q_v(R_0 - R) = \frac{k(R_0 - R)}{\ln A(1 + c)}, \quad (6)$$

где  $R_0$  – начальный остаток на контрольном сите;  $k$  – константа скорости измельчения;  $q_v$ ,  $q_a^v$  – удельная объемная производительность мельницы по исходному продукту и по контрольному классу  $a$ , соответственно;  $t$  – время измельчения,  $c$ ;  $A$  – параметры.

Эта величина может быть принята в качестве константы мельницы при измельчении данной руды в замкнутом цикле, использоваться в уравнении кинетики измельчения и в формулах для расчета производительности замкнутых циклов измельчения. Рост производительности в данных условиях обеспечивается повышением эффективности классификации по крупности разгрузки мельницы, что обеспечивается сепарационной характеристикой. Для рассматриваемых моделей это достигается при увеличении степени извлечения в слив частиц крупностью менее контрольной и снижении степени извлечения частиц крупностью более контрольной. Разработанные математические модели замкнутых циклов измельчения, подтвержденные показателями измельчения железных руд в промышленных условиях, могут использоваться для проектирования технологий измельчения и совершенствования существующих, которое должно заключаться в оптимизации процесса классификации по крупности и распределения крупности измельчаемых продуктов по стадиям измельчения. Было установлено закономерное снижение удельной производительности мельниц по вновь образованному классу при увеличении его содержания в питании мельницы, также существование нелинейности зависимости, связывающей согласно гипотезе Риттингера удельную поверхность вновь образованного класса с энергией, потраченной на ее образование, что обусловлено изменением в области тонкого измельчения коэффициента пропорциональности [5].

При тонком измельчении полезных ископаемых разные по крупности фракции материала ведут себя по-разному. На первом этапе относительно крупный материал измельчается быстрее, и на измельчение требуется меньше энергии. Но при измельчении частиц меньшего размера, т.е. при увеличении суммарной поверхности мелкодисперсной фазы для измельчения частиц требуется больше энергии. При этом наблюдается термодинамическое неравновесие двухфазной системы, поскольку для измельчения частиц приходится преодолевать межатомные связи.

При определении эффективности работы измельчительных агрегатов в замкнутых циклах надо учитывать еще один аспект проблемы. В работах [5-7] сделан вывод о меняющейся прочности измельчаемых частиц в зависимости от их размера, что подтверждается многочисленными исследованиями. В связи с этим, поскольку каждый класс крупности имеет присущую ему прочность, то он может рассматриваться как компонент смеси, которая измельчается одновременно в одном агрегате. И этот класс крупности измельчается с закономерностью, не зависящей от присутствия других классов крупности или иных раз-

нопрочных компонентов, т.е. каждый класс крупности, определяемый в исследованиях как остаток измельчаемого материала на контрольном сите, измельчается независимо от содержания других классов крупности, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента надежности аппроксимации. Следовательно, для определения показателя эффективности измельчения необходимо учитывать кинетику измельчения всех фракций материала, а не только величину вновь образованной удельной поверхности, как это принято при вычислении "индекса измельчаемости" (5).

Показатели измельчаемости изменяются в зависимости от условий и методики их определения, и поэтому, пользуясь ими, необходимо учитывать условность лабораторных определений.

Для лабораторного определения измельчаемости при работе мельницы в открытом цикле используют способ Механобра. Проба руды дробится (на валках) до крупности 6–0 мм и измельчается при постоянных условиях, принятых для лабораторной мельницы. При этом снимается кинетика измельчения по всем классам крупности стандартного набора сит (например, 0300; 0200; 0150; 0100; 0074 мм). В результате получают кривые кинетики, аналогичные приведенным [6, 7]. По этим зависимостям можно определить продолжительность измельчения, достаточную для получения продукта с необходимым остатком (10 или 5%) на разных ситах.

При измельчении многокомпонентных руд необходимо учитывать разную измельчаемость компонентов. Биленко Л.Ф. [8] установил независимость кинетики измельчения разнопрочных компонентов в смеси. Им подтверждено, что характеристика крупности компонента, измельченного в смеси с другим компонентом, остается такой же, как и при раздельном измельчении его до той же крупности. При измельчении смеси разнопрочных материалов коэффициент опережающего измельчения, показывающий степень предварительного помола твердого компонента в схеме измельчения двухкомпонентных смесей, не зависит от количества твердой составляющей в смеси, а определяется только свойствами измельчаемых материалов [8, 9].

Авторами работы доказано экспериментально [6, 8] независимость кинетики измельчения узких фракций материала для барабанной и струйной мельницы. Это дает основание выдвинуть гипотезу об аддитивности индексов измельчаемости мультикомпонентных руд. Остановимся на этом подробнее.

Используем энергокрупностное соотношение по Бонду, определенное для однокомпонентной руды, т.е. формулу зависимости, связывающей затраченную энергию и уменьшение крупности материала в виде:

$$E = 10W(1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}), \quad (7)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$  – начальный и конечный размер куска измельчаемого материала;  $W$  – индекс работы Бонда. Величины индекса работы Бонда экспериментально определены для многих минералов. Учитывая независимость кинетики измельче-

## **Підготовчі процеси збагачення**

ния разнопрочных руд,  $W = \sum \alpha_i W_i$ , где  $i$  – количество компонентов в руде с долевым участием  $\alpha_i$ . Поскольку все компоненты имеют разные начальные размеры частиц и измельчаются до разных конечных размеров частиц (зерен), обозначаемых  $x_1^i, x_2^i$ , соответственно, то уравнение (7) можно представить в виде:

$$E = 10 \sum_{i=1}^n W_i \alpha_i (1/\sqrt{x_2^i} - 1/\sqrt{x_1^i}). \quad (8)$$

### *Выводы*

При анализе методик оценки эффективности работы мельниц установлено, что ни одна из них не учитывает многокомпонентность руд и независимость кинетики измельчения каждого из компонентов в смеси. При тонком измельчении руд недостаточно основываться только на "индексе измельчаемости" или "индекс чистой работы", вычисляемых для монокомпонентных руд. Необходимо рассматривать кинетику измельчения всех узких фракций материала и отдельных компонентов многокомпонентного материала с учетом их независимости при измельчении в смеси, что позволит оптимизировать энергопотребление измельчительных установок.

### **Список литературы**

1. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 518 с.
2. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – с. 366.
3. Маляров П.В. и др. Интенсификация процессов измельчения в условиях Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ) // Обогащение руд. – 2008. – №6. – С. 6-10.
4. Pivnyak G.G., Pilov P.I., Pryadko N.S. Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals // Mine Planning and Equipment Selection C Drebenstedt and R. Singhal (eds), DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7\_104@ Springer International Publishing Switzerland 2014. – P. 1069-1079.
5. Прядко Н.С. Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук – Днепр-ск, 2015. – 36 с.
6. Пилов П.И., Прядко Н.С. Кинетические особенности тонкого измельчения руд // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2016. – Вип. 62(103). – С. 44-51
7. Пилов П.И., Прядко Н.С., Терновая Е.В. Кинетика измельчения смеси фракций крупности // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 58(99). – С. 101-106.
8. Биленко Л.Ф., Костин И.М., Киселев А.И. Совместное измельчение различных материалов в шаровых мельницах // Тр. ин-та Механобр. – Л., 1982. – С. 16-22.
9. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. – М.: Недра, 1984. – 200 с.

© Пилов П.И., Прядко Н.С., 2016

*Надійшла до редколегії 20.07.2016 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*