

*М.М. КУЗНЕЦОВА*, препод., НУГЗУ, Харьков,  
*В.Е. ВЕДЬ*, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

## РАСЧЕТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В статье представлены результаты аналитических исследований процесса измельчения сыпучих материалов в шаровой мельнице. Получено дифференциальное уравнение, решение которого определяет значение коэффициента режима измельчения, соответствующее максимальному значению коэффициента полезного действия процесса измельчения.

**Ключевые слова:** измельчение, шаровая мельница, коэффициент режима измельчения

Среди технологических процессов многих отраслей химической промышленности особое место отводится процессам измельчения сыпучих материалов. Повышенное внимание к измельчению материалов вызвано высокой энергоемкостью и низкой эффективностью процесса. Существует большое количество помольных агрегатов, среди которых широкое распространение получили барабанные шаровые мельницы вследствие простоты эксплуатации и обслуживания. Однако существенным недостатком процесса измельчения посредством шаровых мельниц является низкий коэффициент полезного действия.

Основным параметром, который определяет режим работы шаровой мельницы, является рабочая скорость вращения барабана. Угловая скорость вращения барабана мельницы  $\omega$  прямо пропорциональна коэффициенту режима измельчения  $\psi$ :

$$\omega(\psi) = \omega_{кр} = \psi \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{кр}$  – расчетное значение критической скорости по формуле,  $c^{-1}$ ;  $R$  – радиус внутренней поверхности барабана, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\psi$  – коэффициенту режима измельчения, обычно, согласно рекомендациям [1 – 3], принимается равным 0,75.

Для оценки эффективности и интенсификации процесса измельчения путем подбора наиболее рационального режима работы шаровой мельницы

© М.М. Кузнецова, В.Е. Веды, 2013

необходимо сформулировать функциональную зависимость параметров процесса измельчения.

Энергия, которая расходуется на измельчение материала, обеспечивается за счет кинетической энергии шаровой загрузки мельницы:

$$\begin{aligned} A_{\text{изм}} &= A_{\text{кш}} \\ A_{\text{кш}} &= A'_{\text{кш}} \eta \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_{\text{изм}}$  – энергия, которая расходуется на измельчения материала, Дж;  $A_{\text{кш}}$  – кинетическая энергия шаровой загрузки, которая расходуется на измельчение материала, Дж;  $A'_{\text{кш}}$  – полная кинетическая энергия шаровой загрузки, Дж;  $\eta$  – коэффициент полезного действия процесса измельчения.

Учитывая цикличность воздействия мелющей загрузки на измельчаемый материал и поэтапность процесса измельчения вследствие накопления разрушающих напряжений в объеме частиц материала, можно утверждать, что кинетическая энергия шаровой загрузки, которая расходуется на измельчение материала пропорциональна количеству оборотов барабана мельницы и количеству циклов циркуляции шаровой загрузки за один оборот барабана:

$$A_{\text{кш}} = \frac{m_{\text{ш}} v_{\text{эн}}^2}{2} b \gamma \quad (3)$$

где  $m_{\text{ш}}$  – масса шаровой загрузки, кг;  $b$  – количество оборотов барабана, необходимое для накопления энергии разрушения частицы;  $\gamma$  – количество циклов загрузки за один оборот барабана мельницы;  $v_{\text{эн}}$  – приведенное значение скорости движения мелющих тел, обеспечивающее кинетическую энергию шаровой загрузки, м/с, определяемое по выражению:

$$v_{\text{эн}} = c v_{\text{ср}} = c \frac{\omega R}{2}, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент скорости движения мелющих тел;  $R$  – радиус внутренней поверхности барабана мельницы, м;  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана мельницы, рад/с;  $v_{\text{ср}}$  – среднее значение линейной скорости движения мелющих тел, м/с.

Количество оборотов барабана мельницы, необходимое для обеспече-

ния энергии разрушения частицы, рассчитывается исходя из необходимого времени измельчения материала и скорости вращения барабана мельницы:

$$b = \frac{t}{T_{вр}} = \frac{t\omega}{2\pi} \quad (5)$$

где  $T_{вр}$  – период вращения барабана мельницы, с;  $t$  – время измельчения материала, с.

Количество циклов загрузки за один оборот барабана определяется из зависимости:

$$\Gamma = \frac{1 - k^2}{\varphi} \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент, который соответствует отношению радиуса внутреннего контура загрузки к радиусу внешнего контура, определяется по справочным данным [2, 3],  $\varphi$  – степень загрузки барабана мельницы. Обычно принимается  $\varphi = 0,3$ .

Подставляя выражения (5) и (6) в зависимость (3) можно получить выражение, определяющее кинетическую энергию шаровой загрузки, затрачиваемую на измельчение материала:

$$A_{кин} = \frac{m_{ш} v_{эн}^2}{2} b \gamma \eta = \frac{m_{ш} v_{сп}^2}{2} \frac{t\omega}{2\pi} \Gamma = \frac{m_{ш} \left( \frac{c\omega R}{2} \right)^2}{2} \frac{t\omega (1 - k^2)}{2\pi \varphi} \Gamma = \frac{m_{ш} c^2 \omega^3 R^2 t (1 - k^2) \Gamma}{16\pi \varphi} \quad (7)$$

Функциональную зависимость параметров измельчения можно получить, путем приравнивания выражения для определения кинетической энергии мелющей загрузки, которая приходится на измельчение материала (7) и энергии, необходимой на измельчение материала [4]:

$$\frac{m_{ш} c^2 \omega^3 R^2 t (1 - k^2) \Gamma}{16\pi \varphi} = \frac{m_M}{2Ec} \left( y_{пр}^2 \frac{1 - p \left| 10 \lg \frac{sk}{s} \right| + 1}{1 - p} + y_T^2 \left( 1 - p \left| 10 \lg \frac{sk}{s} \right| \right) \right), \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости измельчаемого материала, Па;  $\rho$  – плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{np}$  – практическое значение предела прочности материала, Па;  $\sigma_T$  – теоретический значение предела прочности, Па;  $s$  – удельная поверхность материала, который подается в мельницу, м<sup>2</sup>/кг;  $s_k$  – удельная поверхность измельченного материала, м<sup>2</sup>/кг;  $p$  – параметр, характеризующий долю энергии, которая приходится на измельчение ударом.

Значение коэффициента полезного действия процесса измельчения определяется на основе зависимости (8) как:

$$\eta = \frac{8\pi m_M \varphi}{E \rho m_k \omega^3 R^2 t (1 - k^2) c^2} \left( \sigma_{np}^2 \frac{1 - p \left| 10 \lg \frac{s_k}{s} \right| + 1}{1 - p} + \sigma_T^2 \left( 1 - p \left| 10 \lg \frac{s_k}{s} \right| \right) \right). \quad (9)$$

Для определения зависимости коэффициента полезного действия от коэффициента режима измельчения  $\psi$  необходимо выразить в виде зависимости от  $\psi$  связанные с ним параметры уравнения (9).

Коэффициент  $k$ , согласно данным таблицы, можно выразить в виде полиномиальной зависимости третьего порядка:

$$k(\psi) = 5,0583\psi^3 - 15,087\psi^2 + 15,193\psi - 4,3392. \quad (10)$$

Таблица – Зависимость коэффициента  $k$  от коэффициента режима измельчения  $\psi$

$\psi$	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
$k$	0,11	0,3	0,45	0,55	0,635	0,7	0,746	0,777	0,802	0,819	0,831	0,84	0,845

Значение коэффициента скорости движения мелющих тел  $c$  и значение параметра  $p$  зависят только от режима вращения барабана мельницы, т.е. от коэффициента режима измельчения  $\psi$ . Учитывая (1) и (10), функциональная зависимость  $\eta(\psi)$  приобретает следующий вид:

$$\eta(\psi) = \frac{8\pi m_M \varphi}{E \rho m_{\psi} \psi(\psi)^3 R^2 t (1 - k(\psi)^2) c(\psi)^2} \left( y_{np}^2 \frac{1 - p(\psi) \left| 10 \lg \frac{s_k}{s} \right| + 1}{1 - p(\psi)} + y_T^2 \left( 1 - p(\psi) \left| 10 \lg \frac{s_k}{s} \right| \right) \right) \quad (11)$$

Упростим выражение (11):

$$z(\psi) = \frac{B}{\psi(\psi)^3(1-k(\psi)^2)c(\psi)^2} \left( y_{np}^2 \frac{1-p(\psi)^{b+1}}{1-p(\psi)} + y_T^2(1-p(\psi)^b) \right), \quad (12)$$

где  $B = \frac{8\pi m_M \varphi}{E \rho m_u R^2 t}$ ;  $b = \left| 10 \lg \frac{s_k}{s} \right|$ .

Исследование функции (12) на экстремум дает возможность определить значение коэффициента режима измельчения, которое соответствует максимальному значению коэффициента полезного действия процесса измельчения:

$$\frac{d}{d\psi} \left( \frac{y_{np}^2 \frac{1-p(\psi)^{b+1}}{1-p(\psi)} + y_T^2(1-p(\psi)^b)}{\psi(\psi)^3(1-k(\psi)^2)c(\psi)^2} \right) = 0. \quad (13)$$

Графическое изображение выражений (12) и (13) представлено рисунком.

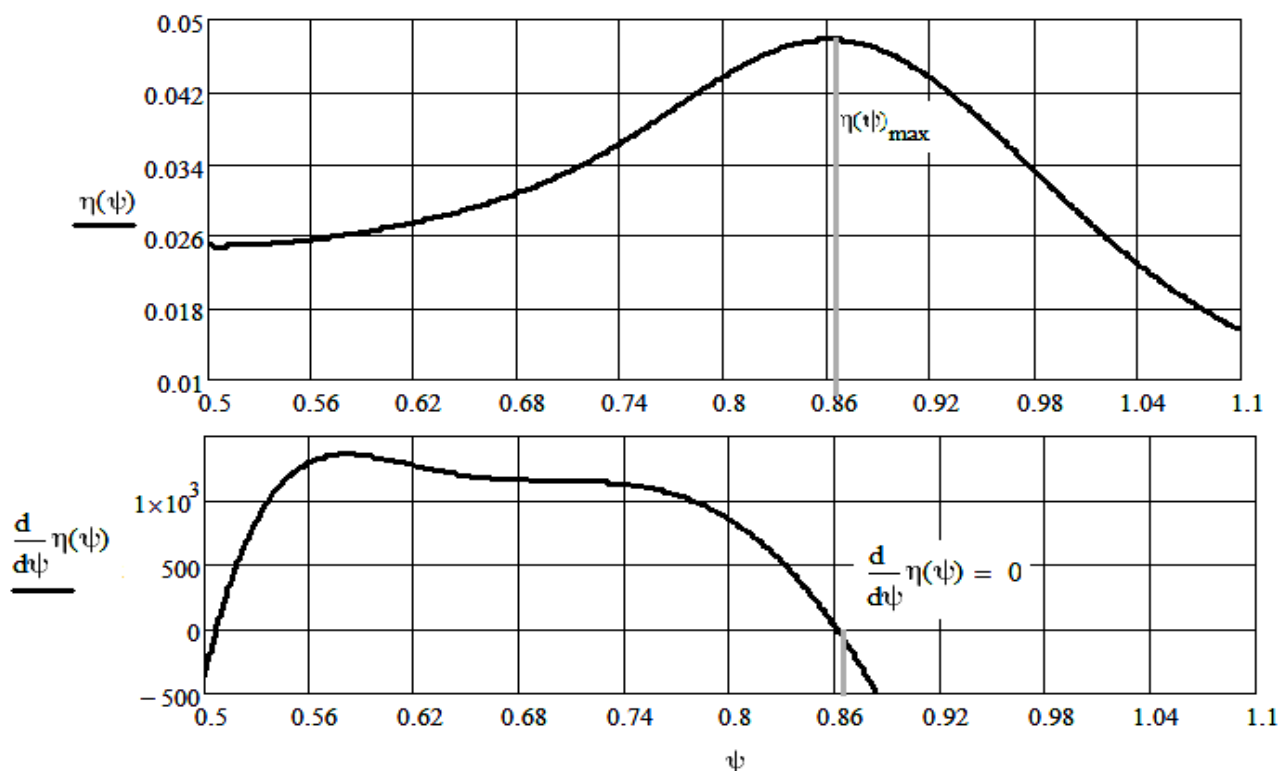


Рисунок – Зависимость коэффициента полезного действия и функции дифференциала коэффициента полезного действия от коэффициента режима измельчения

Решение дифференциального уравнения (13) определяет значение коэффициента режима измельчения  $\psi$  – доли значения расчетной критической скорости, которое соответствует максимальному значению коэффициента полезного действия процесса измельчения.

Таким образом впервые предложено теоретическое обоснование расчета энергоэффективного режима измельчения материала в шаровой мельнице с учетом характеристик измельчаемого материала.

**Список литературы:** 1. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / М.Я. Сапожников. – М.: Высшая школа, 1971. – 382 с. 2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – [2-е изд., перераб.]. – М.: Химия, 1977 – 368 с. 3. Андреев С.Е. Измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А.Перов, В.В. Зверевич. – [3-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Недра, 1983. – 415 с. 4. Кузнецова М.М. Вплив способу подрібнення на енерговитрати процесу / М.М. Кузнецова, В.Є. Ведь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2013. – № 2. – С. 18 – 22.

*Поступила в редколлегию 12.12.13*

УДК. 666.9.022.3

**Расчет энергоэффективного режима работы шаровой мельницы / М.М. КУЗНЕЦОВА, В.Е. ВЕДЬ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 64 (1037). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 13 – 18. – Бібліогр.: 4 назв.**

У статті представлено результати аналітичних досліджень процесу помелу сипких матеріалів у кульовому млині. Отримано диференціальне рівняння, розв'язання якого визначає значення коефіцієнту режиму подрібнення, який відповідає максимальному значенню коефіцієнта корисної дії процесу подрібнення.

**Ключові слова:** подрібнення, кульовий млин, коефіцієнт режиму подрібнення.

The article presents the results of analytical research of the grinding process of a granular materials in a ball mill. The solution of the differential equation determines the value of the coefficient of grinding mode, that corresponds to the high efficiency of the grinding process.

**Keywords:** grinding, ball mill, coefficient of grinding mode.