



## ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК. 666.9.022.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

**Кузнецова Мария Максимовна**Кафедра прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины,  
ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023**Контактный тел.:** 099-436-25-72**E-mail:** marta\_shu@ukr.net**Ведь Валерий Евгеньевич**, доктор технических наук, профессорКафедра «Интегрированные технологии, процессы и аппараты»,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002**Контактный тел.:** 097-832-69-49**E-mail:** ved@kpi.kharkov.ua**Вамболь Сергей Александрович**, доктор технических наук, доцентКафедра прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины,  
ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023**Контактный тел.:** 050-902-86-24**E-mail:** sergvambol@gmail.com

*В статье представлены результаты аналитических исследований процесса измельчения сыпучих материалов в шаровой мельнице. Предложен метод определения эффективности использования рационального режима измельчения, определенного с помощью дифференциального уравнения, решение которого соответствует значению коэффициента режима измельчения, обеспечивающему максимальный коэффициент полезного действия процесса измельчения.*

*Ключевые слова:* измельчение, шаровая мельница, коэффициент режима измельчения, энергоэффективность, коэффициент полезного действия.

*У статті представлено результати аналітичних досліджень процесу помелу сипких матеріалів у кульовому млині. Запропоновано метод визначення ефективності використання раціонального режиму подрібнення, який визначено за допомогою диференційного рівняння, розв'язання якого відповідає значенню коефіцієнту режиму подрібнення, що забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії процесу подрібнення.*

*Ключові слова:* подрібнення, кульовий млин, коефіцієнт режиму подрібнення, енерго-ефективність, коефіцієнт корисної дії.

#### 1. Введение

Среди технологических процессов в химической промышленности наиболее энергоемкими и низкоэффективными являются процессы измельчения твердых материалов. Вследствие простоты конструкции, эксплуатации и обслуживания наиболее распространенными помольными агрегатами являются барабанные шаровые мельницы [1–7]. Существенным недостатком процесса измельчения посредством шаровых мельниц является низкий

коэффициент полезного действия — 2–5 %. Следовательно, вопросы повышения эффективности процесса измельчения являются приоритетными направлениями исследований в данной области.

#### 2. Анализ исследований и публикаций

Проблему определения энергозатрат процесса измельчения рассматривали в своих работах Ребиндер, Кирпичев, Кик [8]. Полученные ими законы являются фундаментом теории измельчения, но

имеют весьма ограниченное практическое применение.

В работе [9] предложен новый подход к определению энергозатрат процесса измельчения, учитывающий соотношение между ударным разрушением и измельчением посредством трения. На этой основе создана феноменологическая модель процесса измельчения в шаровой мельнице [10], связывающая параметры: геометрию барабана, степень, соотношение и распределение загрузки барабана, скорость вращения барабана, геометрические и физико-механические свойства измельчаемого материала и коэффициент полезного действия (КПД) процесса измельчения. Впервые введен в расчеты параметр, характеризующий долю энергии, которая приходится на измельчение ударом. Выражение, определяющее коэффициент полезного действия процесса измельчения, имеет вид:

$$\eta(\psi) = \frac{8\pi m_M \phi}{E r m_{ш} \omega(\psi)^3 R^2 t (1 - k(\psi)^2) c(\psi)^2} \times \left( \sigma_{пр}^2 \frac{1 - p(\psi)^{10 \lg \frac{s_k}{s} + 1}}{1 - p(\psi)} + \sigma_t^2 \left( 1 - p(\psi)^{10 \lg \frac{s_k}{s}} \right) \right), \quad (1)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного действия процесса измельчения;  $\psi$  — коэффициент режима измельчения;  $m_{ш}$  — масса шаровой загрузки, кг;  $m_M$  — масса измельчаемого материала, кг;  $c$  — коэффициент скорости движения мелющих тел;  $R$  — радиус внутренней поверхности барабана мельницы, м;  $\omega$  — угловая скорость вращения барабана мельницы, рад/с;  $E$  — модуль упругости измельчаемого материала, Па;  $\rho$  — плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{пр}$  — 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;  $t$  — время измельчения материала, с;  $k$  — коэффициент, который соответствует отношению радиуса внутреннего контура загрузки к радиусу внешнего контура;  $\phi$  — степень загрузки барабана мельницы.

Экстремум предложенной функции (1), описывающей зависимости процесса измельчения, определяет скоростной режим вращения барабана шаровой мельницы, соответствующий максимальному значению коэффициента полезного действия процесса

$$\frac{d}{d\psi} \left( \frac{\sigma_{пр}^2 \frac{1 - p(\psi)^{10 \lg \frac{s_k}{s} + 1}}{1 - p(\psi)} + \sigma_t^2 \left( 1 - p(\psi)^{10 \lg \frac{s_k}{s}} \right)}{\omega(\psi)^3 (1 - k(\psi)^2) c(\psi)^2} \right) = 0. \quad (2)$$

### 3. Постановка задачи исследования

Целью данного исследования являлась разработка метода определения эффективности применения рационального режима измельчения твердых материалов в шаровой мельнице. Для достижения поставленной цели необходимо определить изменение энергозатрат, времени и КПД процесса измельчения при реализации рассчитанного, как рациональный, режима измельчения по сравнению с обычно рекомендуемым режимом.

### 4. Метод определения эффективности применения рационального режима измельчения

С целью практического применения предложенной модели процесса измельчения были экспериментально определены виды зависимостей энергетического  $p$  и скоростного  $c$  параметров этого процесса от коэффициента режима измельчения  $\psi$ .

$$c(\psi) = -7,291\psi^3 + 56,563\psi^2 - 78,427\psi + 33,184; \quad (3)$$

$$p(\psi) = 0,2708\psi^3 - 1,1688\psi^2 + 1,2873\psi + 0,5607. \quad (4)$$

При этом учитывалось, что значение коэффициента скорости движения мелющих тел  $c$  и значение параметра  $p$  зависят только от режима вращения барабана мельницы, т. е. от коэффициента режима измельчения  $\psi$ .

При измельчении материалов до одинаковой удельной поверхности при различных скоростях вращения барабана мельницы, которым соответствуют определенные значения коэффициента полезного действия, требуется различное время длительности процесса. При этом на высвобождение свободной поверхности затрачивается равное количество энергии для получения равной удельной поверхности измельчаемых материалов.

Для сравнения эффективности использования рассчитанного по предложенной методике коэффициента режима измельчения к рекомендуемым в литературе, как оптимальные [11], предложено ввести в методику определения рациональных параметров процесса измельчения характеристики, представляющие собой отношения коэффициентов полезного действия, энергозатрат и времени измельчения при двух различных режимах — рассчитанном нами и рекомендуемом [11]. Согласно приведенным работам, для всех измельчаемых материалов в качестве рекомендуемого предлагается вводить в расчеты коэффициент режима измельчения 0,75.

Для теоретического определения эффективности процесса измельчения при использовании режима измельчения, определенного по предложенной методике, предложено рассматривать величины, соответствующие отношениям параметров,

по рассчитанному режиму к параметрам, которые определяются применением коэффициента режима измельчения 0,75.

Можно утверждать, что для помола материала до одинаковой удельной поверхности отношение затрат энергии для реализации разных режимов обратно пропорционально отношению коэффициентов полезного действия этих режимов измельчения:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{\eta(\psi_2)}{\eta(\psi_1)}, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_1$  – затраты энергии на реализацию режима, с которым сравнивается текущий режим измельчения, Дж;  $\eta(\psi_1)$  – значение коэффициента полезного действия режима, с которым сравнивается текущий режим измельчения;  $\mathcal{E}_2$  – затраты энергии на реализацию текущего режима измельчения, Дж;  $\eta(\psi_2)$  – значение коэффициента полезного действия текущего режима.

Учитывая, что

$$\mathcal{E} = Nt = M\omega t, \quad (6)$$

где  $N$  – мощность двигателя, Вт;  $t$  – время измельчения, с;  $M$  – крутящий момент барабана мельницы, Н · м;  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана мельницы,  $\text{с}^{-1}$ .

Подстановка выражения (6) в (5) позволяет получить отношение времен измельчения при разных режимах для получения материала с одинаковой удельной поверхностью:

$$T = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\psi_2 \eta(\psi_2)}{\psi_1 \eta(\psi_1)}. \quad (7)$$

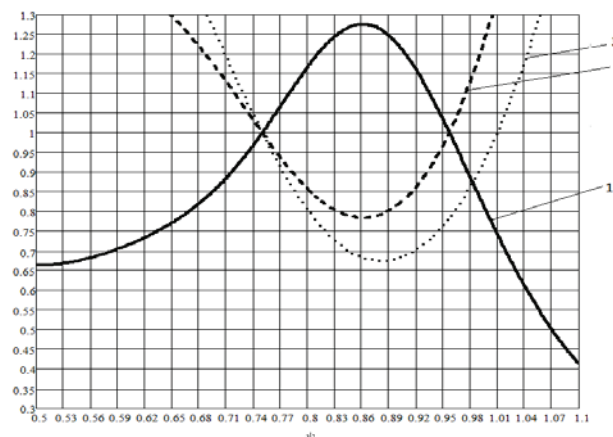
Отношение коэффициентов полезного действия процесса измельчения шаровой мельницы при реализации различных режимов представляет собой выражение:

$$\Theta = \frac{\eta(\psi_1)}{\eta(\psi_2)}. \quad (8)$$

Для измельчения мрамора, согласно расчетам по уравнению (2), значение рационального коэффициента режима измельчения составляет 0,861, что соответствует значению коэффициента полезного действия 0,048. Функции, изменения коэффициента полезного действия процесса измельчения (уравнение (8)), энергозатрат (5) и продолжительности (7) представлены на **рис. 1**.

Анализ зависимостей, представленных **рис. 1** показывает, что повышение коэффициента режима измельчения с 0,75 до 0,861 определяет увеличение коэффициента полезного действия процесса измельчения на 27,6 % с уменьшением времени измельчения на 31,7 %. Это позволяет снизить за-

траты энергии на процесс измельчения на 21,6 % при равной степени измельчения мрамора в шаровой мельнице.



**Рис. 1.** Изменения значения коэффициента полезного действия процесса измельчения мрамора (кривая 1), времени измельчения (кривая 2) и затрат энергии (кривая 3) в сравнении с процессом при значении коэффициента режима измельчения 0,75

Аналогичным образом были определены коэффициенты режима измельчения для цементного клинкера, каменного угля и каменной соли, а также соответствующие им расчетные изменения коэффициентов полезного действия, энергозатрат и времени измельчения в сравнении с рекомендуемым режимом.

#### 4. Выводы

Применение предложенной методики определения рационального коэффициента режима измельчения и эффективности использования этого режима позволило получить уменьшение времени измельчения цементного клинкера на 28,9 %, каменного угля – на 18,4 %, мрамора – на 28,9 % и каменной соли – на 19,6 %. При этом уменьшение энергозатрат на процесс измельчения составило: 18,3 % для цементного клинкера, 9,4 % для каменного угля, 18,4 % для мрамора и 10,4 % для каменной соли. Таким образом, использование энергоэффективных режимов измельчения материалов с разными физико-механическими свойствами в шаровых мельницах обуславливает значительную экономию энергоресурсов в технологических процессах разных отраслей современной промышленности.

#### Литература

1. Wills, B. A. Mineral Processing Technology [Text] / B. A. Wills, T. J. Napier-Munn. – Elsevier Science & Technology Books. 7th Edition, 2006. – 450 p.

2. Ajaal, T. The Development and Characterization of a Ball Mill for Mechanical Alloying [Text] / T. Ajaal, R. W. Smith, W. T. Yen. – Canadian Metallurgical Quarterly. – 2002. – Vol. 41, № 1. – 7–14.
3. Hennart, S. L. A., Identification of the Grinding Mechanisms and Their Origin in a Stirred Ball Mill Using Population Balances [Text] / S. L. A. Hennart, W. J. Wildeboer, P. van Hee, G. M. H. Meesters. – Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64. – 4123–4130.
4. Powell, M. S. The Selection and Design of MillLiners [Text] / M. S. Powell, I. Smit, P. Radziszewski, P. Cleary, B. Rattray, K. Eriksson, L. Schaeffer. – Advances in Comminution. S. K. Kawatra, Ed. ISBN-13:978-0-87335-246-8, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, USA, 2006. – 331–376.
5. Wei, D. Grinding Mill Circuits [Text] / D. Wei, I. K. Craig. – A Survey of Control and Economic Concerns. – In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008. – 1000–1005.
6. Deniz, V. A Study on the Specific Rate of Breakage of Cement Materials in a Laboratory Ball Mill [Text] / V. Deniz. – Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33. – 439–445.
7. Bauer, M. Economic Assessment of Advanced Process Control [Text] / M. Bauer, I. K. Craig. – A Survey and Framework. – Journal of Process Control. – 2008. – Vol. 18. – 2–18.
8. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности: изд. 2-е, перераб. [Текст] / П. М. Сиденко. – М.: Химмия, 1977. – 368 с.
9. Кузнецова М. М. Вплив способу подрібнення на енерговитрати процесу [Текст] / М. М. Кузнецова, В. Є. Ведь // Інтегровані технології та енергозбереження / щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПИ», 2013. – № 2. – С. 18–22.
10. Кузнецова М. М. Расчет энергоэффективного режима работы шаровой мельницы [Текст] / М. М. Кузнецова, В. Е. Ведь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ», 2013. – № 64 (1037). – С. 23–29.
11. Сергеев В. П. Строительные машины и оборудование: учеб. для вузов по спец. «Строит. Машины и оборудование» [Текст] / В. П. Сергеев. – М.: Высш. шк., 1987. – 376 с.

*Abstract. Theoretical, analytical and experimental studies of the solid materials grinding process in the ball mill have shown that it is possible to improve the energy efficiency of the grinding process by implementing the direct blow effect, ensuring rational grinding mode and correlation of destructive loads during dispersion of specific material with the prescribed physical and mechanical properties. A phenomenological model of energy efficiency of grinding solid materials in the ball mill was developed, and the theory of calculating the grinding mode coefficient, which corresponds to the maximum efficiency factor of the process of grinding the specific material, was scientifically substantiated. The method for comparative evaluation of the effectiveness of implementing the calculated mode with the traditionally recommended was developed. Using the proposed scientifically grounded method of determining the rational coefficient of the grinding mode allowed reducing the grinding time of cement clinker by 28,9 %, coal — by 18,4 %, marble — by 28,9 % and rock salt — by 19,6 %. Herewith, the decrease in energy consumption for the grinding process was 18,3 % for cement clinker, 9,4 % for coal, 18,4 % for marble and 10,4 % for rock salt.*

*Keywords: grinding, ball mill, grinding mode coefficient, energy efficiency, efficiency factor.*