

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF ENERGY-EFFICIENT GRINDING PROCESS OF CEMENT CLINKER IN A BALL MILL

**Kuznetsova M.M., Ved V.E.**

*National University of Civil Protection,  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine*

**Abstract.** The article presents results of theoretical and experimental research of grinding process of bulk materials in a ball mill. The new method of determination of energy efficiently mode of operation of ball mills in a process of a cement clinker grinding is proposed and experimentally tested.

**Keywords:** mechanical grinding processes, ball mills, grinding process parameters, energy efficiency, coefficient of efficiency.

### STUDII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE ALE PROCESULUI ENERGOEFICIENT DE MĂCINARE DE CLINCHER DE CIMENT ÎNTR-O MOARĂ CU BILE

**Cuznețova M.M., Vedi V.E.**

*Universitatea Națională de Protecție Civilă,  
Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic din Harkiv", Ucraina*

**Rezumat.** În lucrare se prezintă rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale ale procesului de măcinare a materialelor vrac într-o moară cu bile. S-a propusă și s-a verificat experimental metodă pentru determinarea regimului energoeficient de funcționare a morii cu bile în timpul măcinării clincherului de ciment.

**Cuvinte-cheie:** procese mecanice de măcinare, moara cu bile, parametrii procesului de măcinare, eficiența energetică, randament.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

**Кузнецова М.М., Ведь В.Е.**

*Национальный университет гражданской защиты,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина*

**Аннотация.** В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения сыпучих материалов в шаровой мельнице. Предложен и экспериментально апробирован метод определения энергоэффективного режима работы шаровой мельницы в процессе помола цементного клинкера.

**Ключевые слова:** механические процессы измельчения, шаровая мельница, параметры процесса измельчения, энергоэффективность, коэффициент полезного действия.

**Введение.** Уровень энергоэффективности предприятий различных отраслей промышленности непосредственно влияет на прибыльность, а также на возможности роста и развития бизнеса. Анализ международного опыта работы цементных заводов показывает, что наличие детальной энергетической стратегии позволяет предприятиям выбрать наиболее эффективные пути решения проблемы снижения их зависимости от потребления энергии с учетом рыночных, технических и экономических условий.

Одним из основных технологических этапов, как в производстве цемента, так и переработке разнообразных сырьевых материалов в технический продукт в других отраслях промышленности, является процесс измельчения. Повышенное внимание к измельчению твердых материалов определяется 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 определенным недостатком процесса измельчения посредством шаровых мельниц является низкий коэффициент полезного действия, который составляет от 0,5 до 4% [1].

Пути повышения эффективности процесса измельчения в шаровых мельницах без вмешательства в конструкцию мельницы или химического воздействия на измельчаемый материал на сегодняшний день отсутствуют. Поэтому создание основ теории расчета

оптимальных параметров процессов измельчения и оценки их эффективности должно обеспечить повышение производительности и снижение энергозатрат помольного оборудования. В данной работе предложено решение актуальной научно-практической задачи – создание научно обоснованного метода определения энергоэффективных режимов работы помольного оборудования и применение их в цементной промышленности.

Важную роль в процессе измельчения твердых материалов до заданной степени дисперсности играет скоростной режим работы шаровой мельницы, который задает режим движения загрузки барабана. Основным параметром, определяющим режим работы шаровой мельницы, является скорость (либо же частота) вращения барабана. От скорости вращения барабана мельницы (т.е. от коэффициента режима измельчения) зависит динамика движения загрузки барабана, которая обеспечивает разрушающее воздействие на измельчаемый материал. В шаровых мельницах реализовано измельчение двумя способами: трением и ударом. Согласно исследованиям [2] на процесс измельчения трением расходуется лишь 1,5-2% энергии. Соотношение этих способов измельчения в процессе помола зависит от режима работы мельницы. Оно должно коррелировать с физико-механическими свойствами измельчаемого материала и заданной степенью измельчения. Следовательно, в расчет технологических параметров процесса измельчения должен быть введен параметр, характеризующих долю ударного разрушения и разрушения трением, как предложено в работе [3].

**Основные результаты.** В результате исследований, приведенных в работе [4] авторами создана феноменологическая модель процесса измельчения в шаровой мельнице, 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:

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

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>;  $\sigma_{np}$  – 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;  $t$  – время измельчения материала, с;  $k$  – коэффициент, который соответствует отношению радиуса внутреннего контура загрузки к радиусу внешнего контура;  $\varphi$  – степень загрузки барабана мельницы.

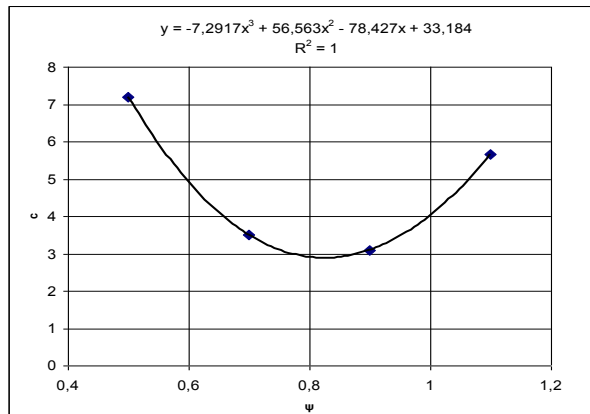
Экстремум предложенной функции (1), описывающей зависимости процесса измельчения, определяет скоростной режим вращения барабана шаровой мельницы, соответствующий максимальному значению коэффициента полезного действия процесса

$$\frac{d}{d\psi} \left( \frac{\sigma_{np}^2 \frac{1-p(\psi)}{1-p(\psi)} + \sigma_T^2 \left( 1-p(\psi) \right)^{\frac{10 \lg \frac{5k}{s} + 1}{s}}}{\omega(\psi)^3 (1-k(\psi)^2) c(\psi)^2} \right) = 0. \quad (2)$$

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  $\psi$  [5]. Зависимость параметра  $c$  от коэффициента режима измельчения  $\psi$  описывается полиномом третьего порядка (величина достоверности аппроксимации  $R^2=1$ ):

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

Полиномиальная зависимость (3) представлена в виде графика на рисунке 1.

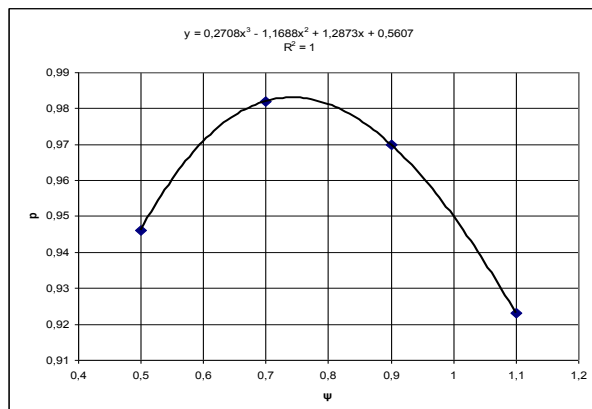


**Рис. 1.** Зависимость параметра  $c$  от коэффициента режима измельчения  $\psi$

Зависимость параметра  $p$  от коэффициента режима измельчения  $\psi$  также описывается полиномом третьего порядка (величина достоверности аппроксимации  $R^2=1$ ):

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

и может быть представлена в виде графика на рис. 2.



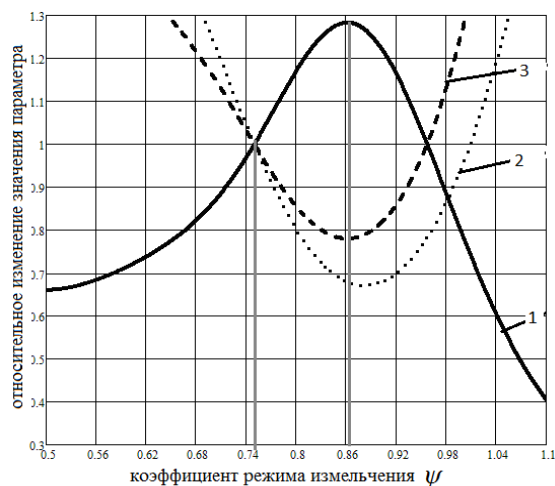
**Рис. 2.** Зависимость параметра  $p$  от коэффициента режима измельчения  $\psi$

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  $\psi$ .

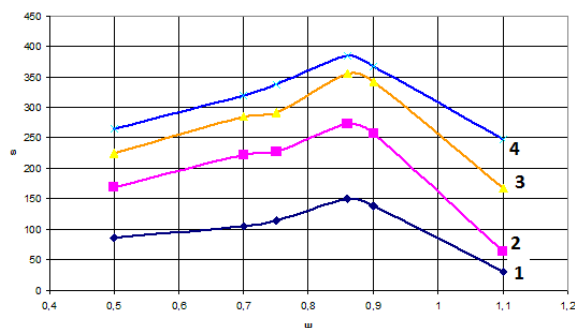
Для процесса помола цементного клинкера, согласно расчетам по формулам (2-4), значение рационального коэффициента режим измельчения равно 0,862.

Зависимости, представленные рис. 3 показывают, что повышение коэффициента режима измельчения с 0,75 до 0,862 позволяет увеличить коэффициент полезного действия процесса измельчения на 28,3% и уменьшить время измельчения на 32,2%, благодаря чему затраты энергии на процесс измельчения уменьшаются на 22% при сохранении степени измельчения цементного клинкера в барабанной мельнице.

Адекватность экспериментальным данным расчетов рационального значения коэффициента режима измельчения, изменения времени измельчения и затрат энергии по формулам (2-4) в сравнении с традиционно рекомендуемым значением коэффициента режима измельчения 0,75 подтверждается результатами экспериментальных исследований процесса помола цементного клинкера. На рис. (4) представлены зависимости удельной поверхности измельчаемого материала от коэффициента режима измельчения при различном времени процесса измельчения.



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



**Рис. 4.** Зависимость удельной поверхности цементного клинкера от коэффициента режима измельчения для разного значения времени помола:  
1 – 15 мин; 2 – 25 мин; 3 – 35 мин; 4 – 45 мин.

Анализ кривых, приведенных на рис (2) показывает, что все они имеют идентичные зависимости изменения дисперсности с последовательностью возрастания этого свойства с

увеличением времени измельчения. При этом для разных изученных материалов наблюдается изменение значения коэффициентов режима измельчения, соответствующих максимальным значениям удельной поверхности, определяемым соответствующими экстремумами функций. Следует отметить, что значения коэффициентов режимов измельчения, полученные в результате экспериментальных исследований, соответствующие максимальной степени измельчения, совпадают с этими теоретически определенными величинами, рассчитанными по предложенной методике (2).

### Выводы

Определение рационального режима работы мельницы в процессе помола конкретного твердого материала с заданными физико-механическими свойствами и степенью измельчения позволяет значительно снизить энергозатраты процесса производства цемента путем увеличения значения коэффициента полезного действия оборудования и повышения качества готового продукта. Приведенные в данной статье исследования показали, что повышение коэффициента режима измельчения с 0,75 до 0,862 позволяет увеличить коэффициент полезного действия процесса измельчения цементного клинкера на 28,3% и уменьшить время измельчения на 32,2%, благодаря чему затраты энергии на процесс измельчения уменьшаются на 22% при сохранении степени измельчения цементного клинкера в барабанной мельнице.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andreev S.E. *Izmelichenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh. Izd. 3, pererab. i dop.* / Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. – М.: Nedra, 1983. – 415 s. (in Russian)
- [2] Taggart A.F. *Spravochnik po obogascheniu poleznyh iskopaemyh* / Taggart A.F. – Metallurgizdat, 1950. – 270 s. – Т. 2 (in Russian)
- [3] Kuznetsova M.M. *Vplyv sposobu podribnenea na virtati protsesu* / M.M. Kuznetsova, B.E. Vedi // *Integrirvani tehnologhii ta energosberejennea / schokvartalinyi naukovo-praktichniiy jurnal.* – Kharkiv: NTU “XPII”, 2013. – Nr. 2. – s. 18 – 22. (in Ukrainian)
- [4] Kuznetsova M.M. *Raschet energoefektivnogorejima raboty sharovoi melinity* / M.M. Kuznetsova, V.E. Vedi // *Visnik Natsionalinogo tehchnogo universitetu “Kharikivskii politehnychnyi institut”.* – Kharkiv: NTU “XPII”, 2013. – Nr.64 (1037). – s. 23–29. (in Russian)
- [5] Kuznetsova M.M. Vedi V.E., Vamboli S.A. *Opredelenie energoeffektivnosti rejimov izmelichenia tverdih materialov v sharovoi melinity* / M.M. Kuznetsova, B.E. Vedi, S.A. Vamboli // *Shidno-Evropetskii jurnal peredobiyh tehnologhii.* – Kharkiv: PP “Tehnologhichnyi tsentr”, 2014. – Nr. 2/1 (68). – s. 20 – 23. (in Russian)

### Сведения об авторах.



Ведь Валерий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Интегрированные технологии, процессы и аппараты» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Научные интересы: высокотемпературное материаловедение, кинетика, катализ, теплообменные процессы и энергосбережение. Автор более 250 научных трудов и изобретений.



Кузнецова Мария Максимовна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры прикладной механики Национального университета гражданской защиты Украины. Научные интересы: процессы измельчения, интенсификация дезинтеграционных процессов, механическая активация, энергосбережение. Автор 15 научных трудов и изобретений.