

## Экспериментальные исследования энергоэффективного режима измельчения твердых материалов

© Yu. Zheng,<sup>1</sup> М.М. Кузнецова,<sup>2,3</sup> В.Е. Ведь,<sup>3</sup> А.А. Алексина<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61022 Харьков, Украина

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины, 61023 Харьков, Украина

<sup>3</sup> Государственный технический университет „Харьковский политехнический институт“, 61002 Харьков, Украина

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: annet.bones@gmail.com

(Поступило в Редакцию 15 июля 2015 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований энергоэффективного режима измельчения твердых материалов в шаровой мельнице. Полученные данные подтверждают целесообразность использования разработанных методов определения рациональных параметров процесса измельчения и анализа энергоэффективности помольного оборудования.

Значение процесса измельчения в химической и других отраслях современной промышленности трудно переоценить. В первую очередь процесс дезинтеграции представляет собой механический метод ускорения химических реакций. Д.И. Менделеев обратил внимание на способ интенсификации протекания реакции между твердыми телами: „... необходимо сколь возможно мелко измельчить и перемешать их между собой. Через это взаимодействие значительно ускорится...“.

Установление того факта, что часть механической энергии, подводимой к твердому телу во время дезинтеграции, расходуется на образование новой поверхности, линейных и точечных дефектов, обуславливает особый интерес к диспергированию и механической активации твердых тел и реакциям с их участием. Механическая активация являет собой способ использования в химии ряда физических явлений, происходящих в твердых телах при больших скоростях деформации. К таким явлениям можно отнести изменение структуры твердых тел, ускорение процессов диффузии при пластической деформации, образование активных центров на свежесформированной поверхности, возникновение импульсов высоких локальных температур и давлений. Впервые к использованию перечисленных эффектов подошли при изучении влияния высоких давлений со сдвиговыми деформациями [1–3] и ударных волн на свойства твердых тел [2,4]. Следует отметить, что указанные эффекты можно получить в результате использования помольного оборудования [5], что является более целесообразным с практической точки зрения и имеет возможность реализации для непрерывных процессов.

Методы механической активации позволяют решить разнообразные задачи химической промышленности: повышение реакционной способности твердых тел, изменение структуры, ускорение твердофазных реакций. Следует отметить, что теоретических знаний в области

механизмов дефектообразования, кинетики процессов диспергирования, динамики процесса помола в мельницах накоплено недостаточно для прогнозирования возможностей методов механической активации. Следовательно, исследования в данной области являются актуальными и приоритетными для современной науки и промышленности.

В работах [6,7] предложен метод расчета энергозатрат процесса измельчения в зависимости от соотношения влияния способов ударного разрушения и разрушения трением, а также изменения прочностных характеристик материала в процессе измельчения. Рассматривается процесс измельчения, протекающий в шаровой мельнице, так как данный вид помольного оборудование широко распространен в современной промышленности [8]. Предложенный подход к определению энергозатрат процесса измельчения можно считать универсальным, поскольку он позволяет учесть влияние двух видов разрушающей нагрузки, а также в случае определения энергии, затрачиваемой при процессе сверхтонкого измельчения, влияние масштабного фактора. На его основе авторами была разработана феноменологическая модель процесса измельчения материалов в шаровой мельнице, представленная в работе [9] которая имеет вид:

$$\eta(\psi) = \frac{B}{\omega(\psi)^3(1 - k(\psi)^2)c(\psi)^2} \times \left( \sigma_{pr}^2 \frac{1 - p(\psi)^{b+1}}{1 - p(\psi)} + \sigma_i^2(1 - p(\psi)^b) \right), \quad (1)$$

$$B = 8\pi m_M / E\rho\rho_s p R^2 t, \quad (2)$$

$$b = 10 \lg \frac{s_k}{s}, \quad (3)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного действия процесса измельчения,  $\psi$  — коэффициент режима измельчения,

$m_{sp}$  — масса шаровой загрузки, kg;  $m_M$  — масса измельчаемого материала, kg;  $c$  — коэффициент скорости движения мелющих тел;  $R$  — радиус внутренней поверхности барабана мельницы, m;  $\omega$  — угловая скорость вращения барабана мельницы, rad/s;  $E$  — модуль упругости измельчаемого материала, Pa;  $\rho$  — плотность измельчаемого материала, kg/m<sup>3</sup>;  $\sigma_{pr}$  — практическое значение предела прочности материала, Pa;  $\sigma_t$  — теоретический значение предела прочности, Pa;  $s$  — удельная поверхность материала, который подается в мельницу, m<sup>2</sup>/kg;  $s_k$  — удельная поверхность измельченного материала, m<sup>2</sup>/kg;  $p$  — параметр, характеризующий долю энергии, которая приходится на измельчение ударом;  $t$  — время измельчения материала, s;  $k$  — коэффициент, который соответствует отношению радиуса внутреннего контура загрузки к радиусу внешнего контура,  $\varphi$  — степень загрузки барабана мельницы.

Скоростной,  $c$  и энергетический,  $p$ , параметры процесса измельчения определяются экспериментально [10].

Экстремум предложенной функции (1), описывающей зависимости процесса измельчения, определяет скоростной режим вращения барабана шаровой мельницы, соответствующий максимальному значению коэффициента полезного действия процесса [9,10]

$$\frac{d}{d\psi} \left( \sigma_{pr}^2 \frac{1 - p(\psi)^{b+1}}{1 - p(\psi)} + \sigma_t^2 (1 - p(\psi)^b) / (\omega(\psi)^3 (1 - k(\psi)^2) c(\psi)^2) \right) = 0. \quad (4)$$

Для сравнения эффективности использования рассчитанного по созданной методике коэффициента режима измельчения к рекомендуемым в литературе предложено ввести в методику определения рациональных параметров процесса измельчения характеристики, представляющие собой отношения коэффициентов полезного действия, энергозатрат и времени измельчения при двух различных режимах — рассчитанным нами [10] и рекомендуемым [11]. Согласно приведенным работам, для всех измельчаемых материалов в качестве рекомендуемого предлагается вводить в расчеты коэффициент режима измельчения 0.75.

Если проводить процесс измельчения каменной соли в шаровой мельнице, то, согласно расчетам по формуле (4), значение рационального коэффициента режима измельчения составляет 0.835. Величина этого коэффициента определяет экстремумы зависимостей изменения коэффициента полезного действия, энергозатрат и времени процесса измельчения (рис. 1).

Кривые, приведенные на рис. 1, позволяют сделать вывод, что повышение коэффициента режима измельчения с 0.75 до 0.835 позволяет увеличить коэффициент полезного действия процесса измельчения на 16.1% при уменьшении времени измельчения на 22.7%. Это обеспечивает энергоэффективность процесса измельчения, которая определяется уменьшением затрат энергии

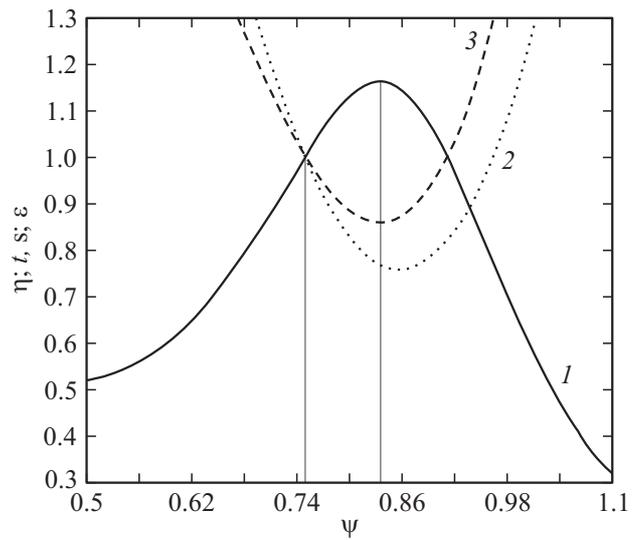


Рис. 1. Изменения значения коэффициента полезного действия процесса измельчения каменной соли (1), времени измельчения (2) и затрат электроэнергии (3) в сравнении с процессом при значении коэффициента режима измельчения 0.75.

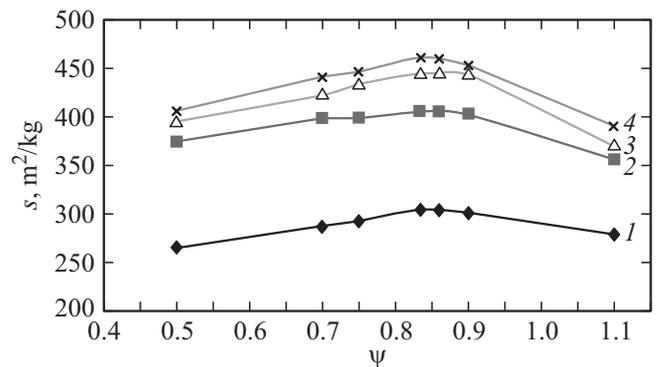


Рис. 2. Зависимость удельной поверхности каменной соли от коэффициента режима измельчения для разного значения времени помолы: 1 — 15, 2 — 25, 3 — 35, 4 — 45 min.

на 13.9% при сохранении равной степени измельчения каменной соли в шаровой мельнице.

Экспериментальные данные измельчения каменной соли в шаровой мельнице представлены зависимостями, приведенными на рис. 2, 3.

На рис. 2 представлены зависимости удельной поверхности измельчаемого материала от коэффициента режима измельчения при различном времени процесса измельчения.

Анализ кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что все они имеют идентичный характер изменения дисперсности с последовательностью возрастания этого свойства с увеличением времени измельчения для всех измельченных материалов. Следует отметить, что значения коэффициентов режимов измельчения, полученные в результате экспериментальных исследований, совпада-

## Экспериментальные и расчетные данные изменения показателей процессов измельчения материалов

Материал	Рациональное значение $\psi$	Изменение кпд процесса измельчения, %	Изменение времени измельчения, %		Погрешность расчета изменения времени, %	Изменение затрат энергии, %		Погрешность расчета изменения энергозатрат, %
			расчетное	экспериментальное		расчетное	экспериментальное	
Мрамор	0.861	27.6	-31.7	-28.9	2.8	-21.6	-18.4	3.2
Цементный клинкер	0.862	28.3	-32.2	-28.9	3.3	-22	-18.3	3.7
Каменный уголь	0.833	15.5	-22.1	-18.4	3.7	-13.4	-9.4	4
Каменная соль	0.835	16.1	-22.7	-19.6	3.1	-13.9	-10.4	3.5

ют с этими теоретически определенными величинами, рассчитанными по предложенной методике (4).

На рис. 3 представлены кинетические зависимости измельчения исследуемого материала для различных значений коэффициентов режимов. Эти зависимости были получены при изучении процесса измельчения каменной соли в шаровой мельнице. Скоростные режимы работы мельницы в процессе измельчения соответствовали значениям коэффициентов режимов измельчения 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 0.75 и таковому, определенному вычислением по уравнению (4), а именно для каменной соли — 0.835. Сравнительная оценка изменения энергозатрат и времени измельчения проводилась по данным, полученным на основе экспериментальных зависимостей 1 и 2 рис. 3. Кривые, обозначенные номером 1 на рис. 3, соответствуют коэффициентам режима измельчения, определенным по предложенной методике. Зависимости 2 построены по экспериментальным данным процессов измельчения, которые характеризуются коэффициентом режима 0.75. Фиксация при постоянном значении величины удельной поверхности для измельчаемого материала позволила определить пресечением построенной постоянной прямой с кривыми 1 и 2 точки, соответствующие временам процесса измельчения, которые необходимы для получения этой удельной поверхности. Такое построение не только позволяет получить значения времени процессов измельчения, но и показывает преимущество реализации определенных по предложенной методике режимов работы шаровой мельницы по сравнению с режимами, использующими обычно рекомендуемое значение коэффициента.

Для оценки адекватности значений, полученных опытным путем, с расчетными данными, полученными с помощью методики, изложенной в работе [8], необходимо определить экспериментальное изменение энергозатрат и времени процесса измельчения при использовании коэффициента режима, определенного по предложенной методике.

Вышеизложенное определило необходимость ввести оценочный режимный параметр процесса измельчения,

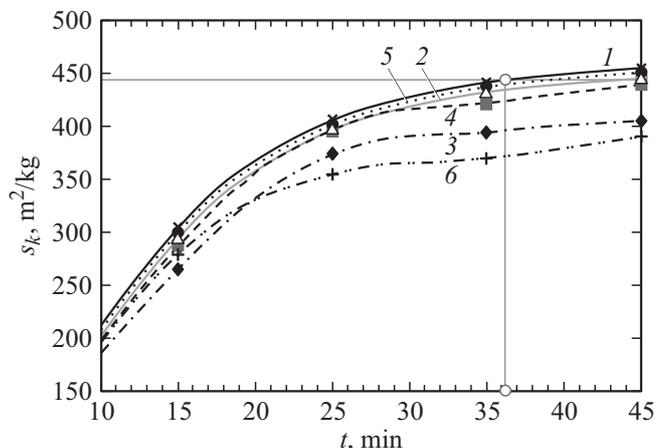


Рис. 3. Зависимость удельной поверхности каменной соли от времени измельчения при разных значениях коэффициента режима измельчения: 1 —  $\psi = 0.835$ , 2 — 0.75, 3 — 0.5, 4 — 0.7, 5 — 0.9, 6 — 1.1.

который определяет достигнутое уменьшение времени процесса измельчения. Он вычисляется с помощью предложенной нами зависимости, основанной на экспериментальных данных

$$\Delta T_{\text{exp}} = \frac{t_1 - t_2}{t_2}, \quad (5)$$

где  $t_1$  — время измельчения материала при значении коэффициента режима, определенном по предложенной методике,  $s$ ;  $t_2$  — время измельчения материала при значении коэффициента режима 0.75,  $s$ .

Достигнутое уменьшение времени процесса измельчения обусловило появление выражения, определяющего изменение энергозатрат процесса измельчения при реализации рассчитанного режима по сравнению с рекомендуемым. Этот параметр, учитывая выражение (3), определяется по экспериментальным данным

$$\Delta \epsilon_{\text{exp}} = \frac{\psi_1 t_1 - \psi_2 t_2}{\psi_2 t_2}. \quad (6)$$

Аналогичные экспериментальные исследования и расчеты были проведены для материалов, которые наиболее часто подвергаются измельчению в шаровой мельнице в современной промышленности: каменный уголь, цементный клинкер и мрамор.

Расчетные и экспериментальные значения параметров, характеризующих изменение времени и энергозатрат процесса измельчения различных материалов, переведенные в проценты, приведены в таблице.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что разница между величинами изменения времени и энергозатрат процесса измельчения, полученная в результате расчета по предложенным зависимостям и экспериментальным путем, не превышает 4%.

## Выводы

Применение предложенной методики определения рационального коэффициента режима измельчения 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%. Уменьшение же 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. Полученные экспериментальные данные подтверждают целесообразность применения разработанной методики определения рационального режима работы помольного оборудования и оценки энергоэффективности процесса измельчения. В теории расчета затрат энергии на измельчение наиболее известны методы, предложенные Риттингером, Кирпичевым и Киком, Бондом и Рундквистом [1–3]. Но ни один из них не нашел практического применения из-за того, что они учитывают только геометрические размеры частиц, которые измельчаются, и характеристики материала, несмотря на способ и условия измельчения. Все это затрудняет использование известных методов для описания реальных процессов измельчения.

Работа выполнена при поддержке фондов: The Harbin City Key Technologies R & D Program under Grant N 2013AE1BW054, The Key Program of National Natural Science Foundation of Heilongjiang N ZD201309, The Key Program for International S&T Cooperation Projects of China N 2013DFA71120.

## Список литературы

- [1] Соловьева А.Б. // Докл. АН СССР. 1974. Т. 240. Вып. 3. С. 125–127.
- [2] Жорин В.А., Жаров А.А., Киссин Ю.В. // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219. Вып. 3. С. 647–652.
- [3] Жорин В.А., Нефедьев А.Е., Линский В.А. // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256. Вып. 3. С. 598–600.
- [4] Массалимов И.А. // Баш. хим. журн. 1998. Т. 5. № 1. С. 55–58.
- [5] Авакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1986. 305 с.
- [6] Dr. Guangbin Yu, Кузнецова М.М., Мараховский М.Б., Алексина А.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 5. С. 145–147.
- [7] Кузнецова М.М., Ведь В.Е. // Інтегровані технології та енергозбереження. 2013. № 2. С. 18–22.
- [8] Мешалкин В.П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Кузнецова М.М., Ведь В.Е. // Химическая промышленность сегодня. 2014. № 4. С. 53–56.
- [9] Кузнецова М.М., Ведь В.Е. // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут“. 2013. № 64 (1037). С. 13–18.
- [10] Кузнецова М.М., Ведь В.Е., Вамболь С.А. // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 2/1 (68). С. 20–23.
- [11] Андреев С.Е., Перов В.А., Зверичев В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.