

Денис Николаевич БОРОВСКИЙ, ассистент кафедры "Машины и аппараты химических и силикатных производств"
Белорусского государственного технологического университета

Петр Евгеньевич ВАЙТЕХОВИЧ, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
"Машины и аппараты химических и силикатных производств"
Белорусского государственного технологического университета

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА МЕЛЮЩИХ ТЕЛ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОМОЛА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

EFFECT OF THE SIZE OF GRINDING MEDIA ON THE EFFICIENCY OF GRINDING IN VERTICAL CENTRIFUGAL-BALL MILL

Исследуется процесс измельчения материала в вертикальной центробежно-шаровой мельнице. Рассмотрены проблемы шарового измельчения в барабанных мельницах. Предложена перспективная установка для помола материала при помощи мелющих тел. Приведены режимы работы вертикальной центробежно-шаровой мельницы. Представлены экспериментальные данные, которые позволили оценить эффективность процесса измельчения в вертикальной центробежно-шаровой мельнице в зависимости от размера мелющих тел и степени заполнения ротора. Проведена оценка изменения объема пустот в зависимости от различных моделей упаковки тел.

We investigate the process of grinding the material in vertical centrifugal ball mill. Considers the problems the ball grinding mill drum. Offered a promising device for grinding material by grinding media. Operation modes are vertical centrifugal ball mill. Shows the experimental data, which allowed us to estimate the effectiveness of the grinding process in vertical centrifugal ball mill, depending on the size of grinding media and the degree of filling of the rotor. The estimation of changes in the volume of voids according to the different models of packing bodies.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве строительных материалов (цемента, гипса, доломита и др.) измельчение занимает одно из важнейших мест в технологическом цикле. При этом необходимо получить готовый продукт с определенной степенью дисперсности и наименьшими энергозатратами.

В процессе помола на удельную поверхность существенное влияние оказывают конструктивные и геометрические особенности помольного агрегата, его технологические параметры и физико-химические свойства сырья. Для получения тонко- и сверхтонкодисперсных порошков широко используется шаровое измельчение [1–3]. При этом необходимо учитывать размер и форму мелющих тел, которые оказывают существенное влияние на эффективность измельчения в помольном агрегате.

Шаровое измельчение в большей степени реализуется в таких металлоемких агрегатах, как барабанная мельница. Снизить затратную часть процесса и интенсифицировать его можно путем изменения конструкции мельницы и механизма движения измельчающих тел в ней. Это достигается в высокоскоростных шаровых мельницах, к которым относятся центробежно-шаровые [2, 4–6]. Специфика названных агрегатов заключается в интенсивности циркуляции измельчающих тел в вертикальной плоскости с переходом с одного конструктивного элемента на другой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вертикальная центробежно-шаровая мельница [4–6] представляет собой корпус, в нижней части которого на вертикальном валу установлен чашеобразный ротор. К ротору с зазором примыкает статическое кольцо, прикрепляемое к цилиндрическим стенкам корпуса, переходящего в коническую сепарационную камеру. Сверху над мельницей установлена классификацион-

ная камера, которая состоит из статического корпуса, закрепленного на верхней части мельницы и классифицирующей корзины. Измельчающие тела (шары) загружаются в чашу ротора, туда же подается и измельчаемый материал. При вращении ротора под действием инерционных сил шары и материал отбрасываются от центра к периферии, соприкасаются с элементами корпуса и возвращаются в центр ротора. Измельчение материала в мельнице происходит за счет раздавливающего, ударного и истирающего воздействий, возникающих при контакте с мелющими телами, а также другими частицами материала. Наиболее тонкий помол наблюдается при истирающем воздействии.

При теоретическом исследовании центробежно-шаровых мельниц [7–10] была изучена траектория движения загрузки внутри мельницы и определены основные режимы ее работы. В первом режиме (центрифугальном) при линейной скорости ротора менее 5,8 м/с загрузка прижата к стенкам ротора и ей не хватает энергии для вылета из него. Материал измельчается под действием центробежной силы и сил трения, воздействующих на каждое мелющее тело. Этот режим целесообразно применять только для периодической работы мельницы. Во втором режиме (переходном), где линейная скорость ротора составляет 5,8–7,9 м/с, загрузка в большей степени движется по статическому кольцу корпуса, и измельчение, главным образом, происходит за счет действия сил трения. Одновременно имеют место раздавливающее и ударное воздействия. Этот режим наиболее эффективен для тонкого помола. В третьем режиме (циркуляционном) линейная скорость ротора более 7,9 м/с, и загрузка совершает циркуляционное движение внутри мельницы. Измельчение материала происходит в основном за счет удара и в меньшей степени за счет истирания и раздавливания.

Также в ходе теоретических исследований проанализировано изменение дисперсности продукта в зависимости от скорости газа в кольцевом зазоре между ротором и корпусом и линейной скорости ротора. В результате было установлено, что для предотвращения

провала материала в кольцевом зазоре необходимо поддерживать скорость газа $v_r \geq 15$ м/с.

Целью проводимых авторами исследований являлось определение влияния размера мелющих тел и степени заполнения ротора на качество помола, характеризующееся удельной поверхностью измельченного продукта. Исследования проводили на экспериментальной установке, включающей центробежно-шаровую мельницу с диаметром ротора $D = 185$ мм и высотой $H = 55$ мм. В качестве мелющих тел применяли стальные шары диаметром 6–18 мм. Измельченный материал представлял собой клинкер с размером частиц 3–5 мм. Степень заполнения ротора ϕ изменялась от 20 % до 100 %.

Опыты проводили при трех линейных скоростях ротора $v_p = 5,8, 11,6$ и $17,4$ м/с, соответствующих частотам его вращения $n = 300, 600$ и 900 об/мин. При данных скоростях наблюдались переходной и циркуляционный режимы. Скорость газа в кольцевом зазоре v_r варьировали в пределах от 15 до 25 м/с. Эффективность измельчения оценивали по удельной поверхности частиц, определяемой за счет различной воздухопроницаемости материалов на приборе ПСХ-8А, и по фракционному составу материала, который был получен на рассеивающей машине фирмы Retsch AS 200 (Германия) с набором сит 20, 40, 80, 100 и 200 мкм.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей удельной поверхности материала $S_{уд}$ от диаметра мелющих тел d при различных линейных скоростях ротора и его степени заполнения. Зависимость $S_{уд}$ от d при различных линейных скоростях ротора мельницы v_p , фиксированных значениях степени заполнения ротора $\phi = 40$ % и скорости газа в кольцевом зазоре $v_r = 20$ м/с представлена на рис. 1. Закономерности изменения удельной поверхности характеризуются уравнениями (1), полученными в результате обработки экспериментальных кривых (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} 1-S_{уд} &= -8,54d^2 + 71,49d + 4186,6, \\ 2-S_{уд} &= -6,06d^2 + 34,57d + 3871, \\ 3-S_{уд} &= -4,11d^2 + 15,27d + 3447, \end{aligned} \quad (1)$$

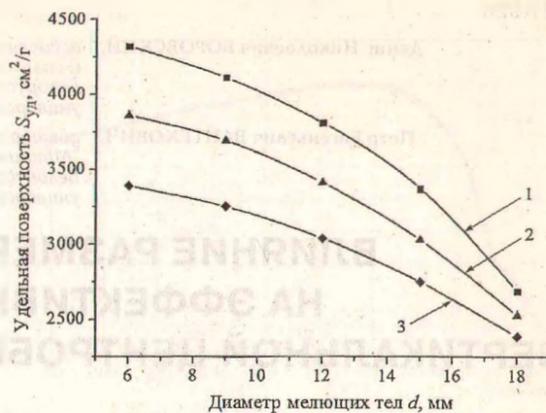
где $S_{уд}$ — удельная поверхность материала, $см^2/г$; d — диаметр мелющих тел, мм.

По зависимостям рис. 1 четко просматривается, что при увеличении диаметра мелющих тел d удельная поверхность $S_{уд}$ готового продукта снижается. Это в большей степени объясняется тем, что для получения наименьшего размера частиц материала необходимо, чтобы объем пустот между телами был минимальным [3], что наблюдается в данном случае с уменьшением диаметра мелющих тел.

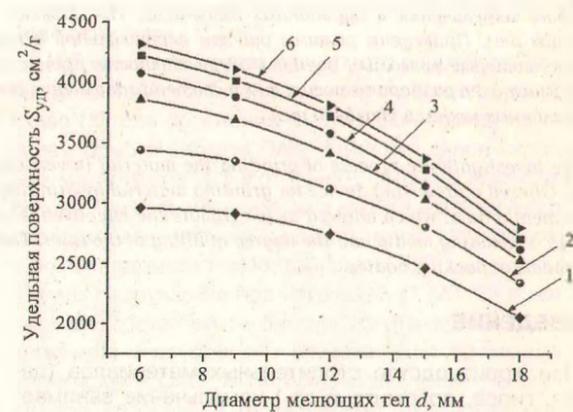
С увеличением линейной скорости ротора (см. рис. 1) удельная поверхность также уменьшается, что объясняется переходом в циркуляционный режим (кривая 3, рис. 1), который для непрерывной работы мельницы без классификационной камеры является малоэффективным.

Зависимость удельной поверхности материала $S_{уд}$ от диаметра мелющих тел d при различных степенях заполнения ротора — и фиксированных значениях линейных скоростей ротора мельницы $v_p = 11,6$ м/с и скорости газа в кольцевом зазоре $v_r = 20$ м/с представлена на рис. 2.

По зависимостям рис. 2 видно, что возрастание удельной поверхности материала наблюдается при уменьшении размера мелющих тел и при увеличении степени заполнения ротора. Причем изменение удельной поверхности наиболее заметно при степени заполнения 20 %–60 %. Далее интенсивность изменения $S_{уд}$ незначительна. Увеличение удельной поверхности в обоих случаях (см. рис. 1, 2) связано с уменьшением



1 — $v_p = 5,8$ м/с; 2 — $v_p = 11,6$ м/с; 3 — $v_p = 17,4$ м/с
Рис. 1. Зависимость удельной поверхности материала $S_{уд}$ от диаметра мелющих тел d при линейных скоростях ротора мельницы v_p



1 — $\phi = 20$ %; 2 — 30 %; 3 — 40 %; 4 — 60 %; 5 — 80 %; 6 — $\phi = 100$ %
Рис. 2. Зависимость удельной поверхности материала $S_{уд}$ от диаметра мелющих тел d при различных степенях заполнения ротора ϕ

объема пустот между мелющими телами и увеличением поверхности контакта тел и материала. При обработке экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости (2):

$$\begin{aligned} 1-S_{уд} &= -6,49d^2 + 80,41d + 2714,4, \\ 2-S_{уд} &= -6,52d^2 + 64,95d + 3288,6, \\ 3-S_{уд} &= -6,06d^2 + 34,57d + 3871, \\ 4-S_{уд} &= -6,23d^2 + 27,69d + 4138, \\ 5-S_{уд} &= -6,83d^2 + 37,81d + 4244, \\ 6-S_{уд} &= -6,79d^2 + 36,91d + 4340,6. \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки поверхности контакта между мелющими телами и материалом в практике шарового измельчения принято несколько моделей упаковок шаров [3], наиболее распространены из них — кубическая и тетраэдрическая. На рис. 3 представлены различные модели упаковки шарообразных мелющих тел в мельнице.

При одинаковом диаметре шаров и кубической упаковке (см. рис. 3а) доля пустот составляет 48 % от общего объема, а при тетраэдрической (см. рис. 3в) — 26 %, то есть она уменьшается в 1,85 раза. В реальных условиях в объеме загрузки эти две модели реализуются одновременно. Поэтому можно считать, что доля пустот изменяется в диапазоне 25 %–50 %. Уменьшение объема пустот также получается и при использовании одновременно тел различного диаметра. Так, например, для кубической упаковки с диаметрами мелющих тел

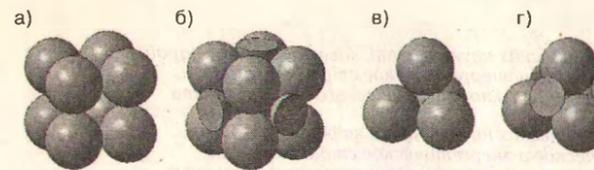
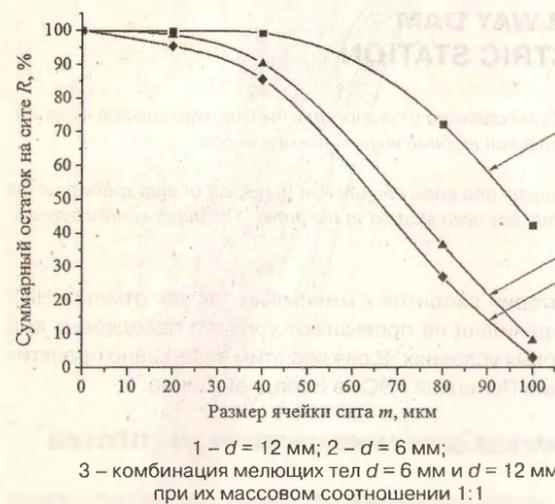


Рис. 3. Модели упаковки шарообразных мелющих тел: а — кубическая, с одинаковым диаметром шаров; б — кубическая, с двумя различными диаметрами шаров; в — тетраэдрическая, с одинаковым диаметром шаров; г — тетраэдрическая, с двумя различными диаметрами шаров



1 — $d = 12$ мм; 2 — $d = 6$ мм; 3 — комбинация мелющих тел $d = 6$ мм и $d = 12$ мм при их массовом соотношении 1:1
Рис. 4. Фракционный состав измельченного клинкера

12 и 6 мм (см. рис. 3б) он уже составляет 41 %, а для тетраэдрической (см. рис. 3г) — 22 %.

Идеальная ситуация достигается, когда меньшие шары максимально вписываются между большими. При этом соотношение диаметров шаров должно составлять 1:0,732. В результате даже модель с кубической упаковкой показывает снижение доли пустот до 22 %.

Из тенденции изменения объема пустот в зависимости от модели упаковки тел видно, что для его уменьшения необходимо использовать комбинированную загрузку. В этом случае контакт тел и материала будет максималь-

ный, и качество помола улучшится, что прослеживается по экспериментальным данным, представленным на графике рис. 4. Здесь показан фракционный состав измельченного клинкера, полученный методом ситового анализа, в зависимости от различной линейной скорости ротора мельницы при использовании мелющих тел диаметрами 6 и 12 мм и степени заполнения ротора 60 %. Суммарные характеристики крупности материала в виде кривых построены "по плюсу", то есть по суммарному остатку материала R на ситах, начиная с самых крупных.

Изменения суммарного остатка на сите описываются следующими эмпирическими уравнениями:

$$\begin{aligned} 1-R &= -0,01m^2 + 0,39m + 98,43, \\ 2-R &= -0,01m^2 + 0,07m + 101,14, \\ 3-R &= 0,01m^2 - 0,16m + 101,53, \end{aligned} \quad (3)$$

где R — суммарный остаток на сите, %; m — размер ячейки сита, мкм.

Выпуклый характер экспериментальных кривых, представленных на рис. 4, свидетельствует о преобладании в готовом продукте крупной фракции более 40 мкм. По фракционному составу также видно, что наименьший остаток на ситах наблюдается при измельчении клинкера комбинацией мелющих тел с диаметрами $d = 6$ мм и $d = 12$ мм в массовом соотношении 1:1. Это еще раз подтверждает, что для получения наименьшего размера частиц материала необходимо, чтобы объем пустот между телами был минимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили оценить эффективность процесса измельчения в вертикальной центробежной мельнице в зависимости от диаметра мелющих тел и степени заполнения ротора. Построенные по экспериментальным данным графики наглядно показывают, что для получения наибольшей удельной поверхности необходим максимальный контакт материала и мелющих тел, который достигается при увеличении степени заполнения мельницы мелющими телами и использовании комбинированной загрузки телами разного диаметра. Это позволяет уменьшить размеры пустот между телами, повысить поверхность контакта с материалом и соответственно качество помола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. — М.: Стройиздат, 1972. — 238 с.
2. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. — 2-е изд. — М.: Химия, 1977. — 368 с.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. — М.: Недра, 1980. — 415 с.
4. Центробежная мельница: пат. 2030214 Рос. Федер., МПК7 В02С 15/08 / В. Н. Калашников, М. А. Саламатов, В. А. Боборов; заявитель Урал. горный ин-т им. В. В. Вахрушева. — № 4935056/33; заявл. 05.05.91; опубл. 10.03.95 // Бюл. / Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам. — 1995 — № 7. — С. 107.
5. Центробежная мельница: пат. 2029619 Рос. Федер., МПК6 В02С 15/08 / В. И. Козлов, Л. П. Фадиенко; заявитель Краснояр. политехн. ин-т. — № 5048263/33; заявл. 16.06.92; опубл. 27.02.95 // Бюл. / Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам. — 1995 — № 6. — С. 127.
6. Центробежная мельница встречного измельчения: пат. 2274492 Рос. Федер., МПК7 В02С 13/20 / П. Ф. Корчагин; заявитель П. Ф. Корчагин. — № 2004111474/03; заявл. 14.04.2004; опубл. 20.04.2006 // Бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — 2006 — № 11. — С. 112.
7. Боровский, Д. Н. Исследование процесса помола в центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семенов // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: матер. Междунар. науч.-техн. напр., Минск, 25–27 ноября 2009 г.: в 2 ч. / БГТУ; редкол.: И. М. Жарский [и др.] — Минск: БГТУ, 2009. — С. 309–313.
8. Боровский, Д. Н. Ударное взаимодействие мелющих тел в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский // Вестник ПГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. — 2011. — № 3. — С. 58–62.
9. Боровский, Д. Н. Учет размера измельчающих тел и их взаимодействия на движение в роторе центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Хим. пром. сегодня. — 2012. — № 5. — С. 40–46.
10. Боровский, Д. Н. Движение измельчающих тел по статическому кольцу центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Хим. пром. сегодня. — 2012. — № 6. — С. 50–56.

Статья поступила в редакцию 23.08.2012.