

УДК 621.926

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С КЛАССИФИКАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ

*Д.Н. БОРОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

Исследуется процесс измельчения материала в вертикальной центробежно-шаровой мельнице с классификационной камерой. Рассмотрены проблемы шарового измельчения в барабанных мельницах. Предложена перспективная установка для помола материала при помощи мелющих тел. Приведены режимы работы вертикальной центробежно-шаровой мельницы. Получены экспериментальные данные, которые позволили оценить эффективность процесса измельчения в вертикальной центробежной мельнице в зависимости от линейной скорости корзины классификатора. Построенные по экспериментальным данным графики наглядно показывают, что для достижения наибольшей удельной поверхности материала до 4500 см²/г необходимо использовать классификационную камеру, которая будет возвращать крупные частицы на домол.

Введение. Во многих технологических процессах требуется использовать тонкодисперсные материалы с определенным фракционным составом. В связи с этим следует проектировать помольные агрегаты с замкнутым циклом работы, который может быть реализован путем установки классификационной камеры. С помощью ее будет отбираться необходимая конечная фракция продукта и повышаться эффективность при помоле за счет увеличения разрушающих воздействий на более крупный материал [1 – 3].

Основная часть. В предыдущих работах [3; 4] показано, что наименее энергоемкими способами воздействия на материал при тонком измельчении можно считать раздавливание и удар. Для сверхтонкого измельчения не обойтись без использования более энергозатратного способа – истирания. Этот способ в комбинации с ударом реализуется в тихоходных барабанных мельницах, которые в Беларуси являются основным помольным агрегатом. Существенный их недостаток – это высокая металлоемкость и энергоемкость проведения процесса. Причем эти недостатки обусловлены не только высокими энергозатратами процесса истирания, но и конструктивными особенностями указанных агрегатов. Десятки и сотни тысяч тонн измельчающих тел с небольшой скоростью поднимаются на определенную высоту и примерно с такой же скоростью падают вниз. При этом интенсивность воздействия измельчающих тел на материал невысока. Повысить эффективность процесса измельчения можно за счет интенсификации движения измельчающих тел в рабочей камере, что может быть реализовано в быстроходных шаровых мельницах: планетарных, центробежно-шаровых, вибрационных. Простота конструкции и организации замкнутого цикла работы предопределяют преимущественную возможность использования центробежно-шаровых мельниц.

Вертикальная центробежно-шаровая мельница [5 – 7] представляет собой корпус, в нижней части которого на вертикальном валу установлен чашеобразный ротор. К ротору с зазором примыкает статическое кольцо, прикрепляемое к цилиндрической стенкам корпуса, переходящего в коническую сепарационную камеру. Сверху над мельницей установлена классификационная камера, которая состоит из статического корпуса 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.

На первом этапе исследований [4; 8 – 10] была изучена траектория движения загрузки внутри мельницы и определены ее основные режимы работы, зависящие от линейной скорости ротора, проанализировано изменение дисперсности продукта в зависимости от скорости газа в кольцевом зазоре между ротором и корпусом и линейной скорости ротора. Установлено, что в зависимости от частоты вращения ротора и степени его заполнения мельница может работать в одном из трех технологических режимов [4]. 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, действующих на каждое мелющее тело. 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 наблюдаются раздавливающее и ударное воздействия. Этот режим наиболее эффективен для тонкого помола. В третьем режиме (циркуляционном) линейная скорость ротора более 7,9 м/с, загрузка совершает циркуляционное движение внутри мельницы. Измельчение материала происходит в основном за счет удара и в меньшей степени за счет истирания и раздавливания.

Также было установлено, что при измельчении материала в мельнице без классификационной камеры с увеличением скорости газа в кольцевом зазоре (более 15 м/с) возрастает унос более крупных частиц из помольной зоны и, как следствие, удельная поверхность готового продукта снижается. Было выявлено, что для непрерывной работы необходимо, чтобы мельница работала в переходном или циркуляционном режиме. При центрифугальном режиме, наблюдаемом при линейных скоростях ротора менее 5,8 м/с, не происходит удаление материала из зоны помола, и его целесообразно применять для периодической работы мельницы.

Цель данной работы – определение степени влияния линейной скорости корзины классификационной камеры на качество помола, характеризующееся удельной поверхностью и фракционным составом измельченного продукта.

Исследования проводились на экспериментальной установке, включающей центробежно-шаровую мельницу с классификационной камерой с диаметром ротора $D = 185$ мм и высотой $H = 55$ мм. В качестве мелющих тел применялись стальные шары диаметром 6...18 мм. Измельченный материал представлял собой клинкер с размером частиц 3...5 мм. Опыты проводились 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. Линейная скорость корзины классификационной камеры варьировалась от 0 до 3,3 м/с. Скорость газа в кольцевом зазоре оставалась неизменной $v_f = 20$ м/с и достаточной для предотвращения провала материала. Эффективность измельчения оценивалась 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 на рисунке 1 в виде графической зависимости удельной поверхности материала $S_{y\partial}$ от линейной скорости наибольшего кольца корзины классификатора v_k при фиксированных значениях: линейной скорости ротора $v_p = 11,6$ м/с ($n = 600$ об/мин), степени заполнения ротора $\varphi = 100$ %, диаметре мелющих тел 6 и 12 мм при их массовом соотношении 1:1 и начальном размере частиц клинкера 2...3 мм. Удельная поверхность материала $S_{y\partial}$ в данном случае изменяется по следующей зависимости:

$$S_{y\partial} = -71,15 \cdot v_k^3 + 299,53 \cdot v_k^2 + 188,28 \cdot v_k + 3114,1. \quad (1)$$



Рис. 1. Зависимость удельной поверхности материала $S_{y\partial}$ от линейной скорости корзины классификатора v_k

Из графика (рис. 1) видно, что при использовании классификационной камеры удельная поверхность материала увеличивается с 3100 до 4500 см²/г. Это показывает целесообразность установки классификатора после помольной зоны. При этом увеличение $S_{y\partial}$ в диапазоне линейной скорости корзины от 0 до 2,6 м/с имеет практически линейный характер. При большей скорости корзины изменение удельной поверхности незначительно, а кривая асимптотически приближается к максимальному значению.

Очевидно, что при сухом помолу и диаметре мелющих тел 6 и 12 мм (см. рис. 1) получение клинкера с удельной поверхностью более 4500 см²/г является трудной задачей. Для больших значений $S_{y\partial}$ необходимо использовать мелющие тела меньших размеров [2]. Но при этом необходимо учитывать, что диаметр мелющих тел должен быть больше кольцевого зазора между ротором и статическим кольцом, чтобы предотвратить остановку мельницы.

При помощи ситового анализа был получен фракционный состав измельченного клинкера (рис. 2), полученного в зависимости от различной линейной скорости корзины классификатора v_k . Суммарную характеристику крупности материала в виде кривой строим «по плюсу», т.е. по суммарному остатку ма-

териала R на ситах, начиная с самых крупных. При этом на оси абсцисс в масштабе откладывается размер отверстий сит, на которых производился ситовый анализ, а на оси ординат – суммарный остаток на ситах.

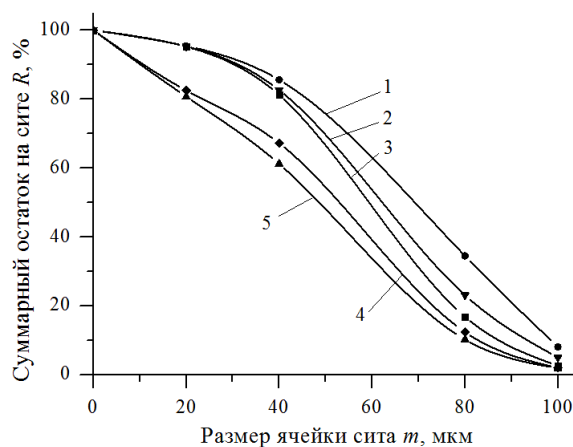


Рис. 2. Фракционный состав измельченного клинкера:
1 – $v_k = 0$ м/с; 2 – $v_k = 1,3$ м/с; 3 – $v_k = 2,0$ м/с; 4 – $v_k = 2,6$ м/с; 5 – $v_k = 3,3$ м/с

Закономерности изменения суммарного остатка на сите представлены уравнениями (2), полученными в результате обработки экспериментальных кривых (см. рис. 2).

$$\begin{aligned}
 1 - R &= -0,01 \cdot m^2 - 0,11 \cdot m + 100,54; \\
 2 - R &= -0,03 \cdot m^2 - 0,52 \cdot m + 99,15; \\
 3 - R &= 0,01 \cdot m^2 - 0,31 \cdot m + 100; \\
 4 - R &= 0,05 \cdot m^2 - 1,44 \cdot m + 100; \\
 5 - R &= -0,01 \cdot m^2 - 0,65 \cdot m + 99,51.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Как видно из графика (рис. 2), доля фракции с размером частиц менее 40 мкм возрастает с увеличением линейной скорости корзины классификатора и при $v_k = 3,3$ м/с составляет почти 40 %. Вместе с тем уменьшается доля более крупной фракции (более 80 мкм), но для фракции 40...80 мкм она остается постоянной. Можно предположить, что при увеличении линейной скорости ротора можно достичь 100 %-ной доли фракции менее 80 мкм.

Тенденцию уменьшения остатка на сите 80 мкм в зависимости от линейной скорости корзины классификатора можно проследить на рисунке 2, более наглядно она представлена на рисунке 3. Изменение остатка на сите 80 мкм описывается закономерностью (3).

$$R_{08} = 36,625 \cdot e^{-0,383v_k} \tag{3}$$

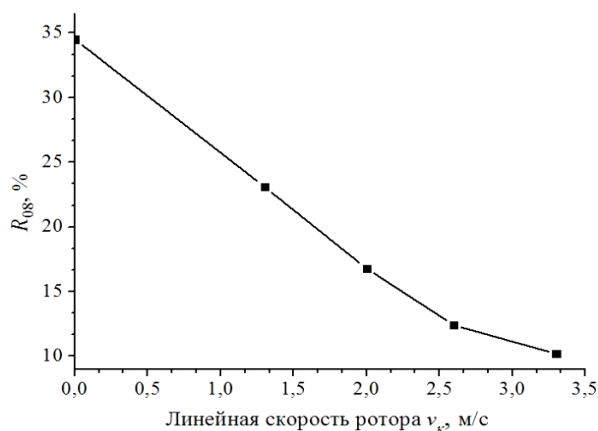


Рис. 3. Зависимость остатка на сите 80 мкм от линейной скорости корзины ротора

Из графика (см. рис. 3), как и из предыдущих, видно, что в диапазоне линейной скорости корзины от 0 до 2,6 м/с процент частиц с размером менее 80 мкм увеличивается практически линейно. Для других

материалов, таких как полимеризационные иониты, используемые для водоподготовки, пигментирующие вещества, применяемые в лакокрасочной промышленности, а также иных кривые, представленные на графиках выше, носят аналогичный характер.

Заключение. Полученные результаты позволили оценить эффективность процесса измельчения в вертикальной центробежной мельнице в зависимости от линейной скорости корзины классификатора. Построенные по экспериментальным данным графики наглядно показывают, что для достижения наибольшей удельной поверхности материала до 4500 см²/г необходимо использовать классификационную камеру, которая будет возвращать крупные частицы на домол. Причем целесообразно задавать линейную скорость корзины меньше 2,6 м/с, при больших скоростях изменение удельной поверхности незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
2. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
3. Вайтехович, П.Е. Тенденции и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции / П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 106 – 112.
4. 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: материалы междунар. науч. техн. конф., Минск, 25 – 27 ноября 2009 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2009. – С. 309 – 313.
5. 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 Рос. Федер. по патентам и товарным знакам. – 1995 – № 7. – С. 107.
6. 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 Рос. Федер. по патентам и товарным знакам. – 1995 – № 6. – С. 127.
7. 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.
8. Боровский, Д.Н. Ударное взаимодействие мелющих тел в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы / Д.Н. Боровский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. 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 мельницы / Д.Н. Боровский, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность 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 // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 6. – С. 50 – 56.

Поступила 21.12.2012

MILLING MATERIALS IN THE VERTICAL CENTRIFUGAL-SPHERICAL MILL WITH THE CLASSIFICATION CHAMBER

D. BOROVSKIY, P. VAITSIAKHOVICH

The article examines the process of grinding the material in vertical centrifugal ball mill with the classification chamber. The problems of the ball grinding mill drum are considered. A promising device for grinding material by grinding media is offered. Modes of vertical centrifugal-spherical mill are given. The experimental data, which allowed to estimate the effectiveness of the grinding process in vertical centrifugal mill, depending on the linear velocity basket classifier is presented. Graphs constructed from experimental data clearly show that for reaching the highest specific surface area of the material up to 4500 cm²/g it is necessary to use the classification chamber, which will return the larger particles to regrinding.