

УДК 621.926

В. И. Козловский, аспирант (БГТУ); **П. Е. Вайтехович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ

В статье представлены результаты помола таких различающихся по размолоспособности материалов, как мел, каолин, аморфный оксид кремния, в шаровой мельнице с мешалкой. В качестве помольных тел использовались чугунные шарики диаметром 2,8–3,0 мм. Скорость рабочего органа составляла 10 м/с. Исходная фракция 0,5–3,0 мм в результате помола была доведена до конечного размера 0,2–50,0 мкм. Примерно 80% частиц имели размер меньше 10 мкм. Получены зависимости эффективности диспергирования от продолжительности воздействия для разных определяющих размеров частиц. Показана возможность аналитического представления суммарной характеристики в виде уравнения Розина – Раммлера.

In article results of a grinding such differing on the ability for grinding materials as a chalk, kaolin, amorphous silicon oxide, in a spherical mill with a mixer are presented. In quality milling bodies of 2,8–3,0 mm were used pig-iron a ball in diameter. Speed of working body made 10 m/s. The initial fraction of 0,5–3,0 mm as a result of a grinding is finished till the final size 0,2–50,0 microns. Approximately 80% of particles had the size less than 10 microns. Dependences of efficiency dispersion from duration of influence for the different defining sizes of particles are received. Possibility of analytical representation of the total characteristic in the form of the equation of Rozina – Rammlera is shown.

Введение. В последнее время в зарубежной и российской литературе появилось довольно много информации по исследованию шаровых мельниц с мешалками [1–6], которые применяются в различных отраслях промышленности для измельчения частиц до микронных размеров и даже менее 1 мкм. В качестве измельчающих тел в них используются стеклянные и корундовые шарики диаметром 1–3 мм. Приводятся сведения о создании крупногабаритных шаровых мельниц с мешалками [7] производительностью до 20 т/ч. Анализ процесса шарового измельчения показал [8], что такие агрегаты могут иметь большие перспективы для сверхтонкого измельчения, когда основным способом воздействия на материал становится истирание. Перспективность указанного измельчающего агрегата как механической системы предопределила актуальность тематики научных исследований по изучению его технологических и конструктивных параметров и их оптимизации.

Основная часть. Объектом исследования в работе выбрана шаровая мельница с мешалкой горизонтально типа (рис. 1).

Диаметр корпуса установки составляет 196 мм, общий объем – 9 л. Роль перемешивающего устройства выполняют диски с отверстиями, установленные на приводном валу. Обязательными элементами исследуемой мельницы, как и всех современных мельниц с мешалками, являются решетчатый динамический сепаратор и сетчатый фильтр. В качестве измельчающих тел использовались чугунные шарики диаметром 2,8–3,0 мм, а измельчаемого материала – мел с размером частиц 1–3 мм, каолин – 0,5–2,0 мм, аморфный оксид кремния («белая сажа») – 0,2–0,5 мм. Выбор материалов обусловлен широким использованием их тонкодисперсных

фракций в производстве различных продуктов: резины, красителей, бумаги и керамических изделий. К тому же эти материалы значительно отличаются по размолоспособности.

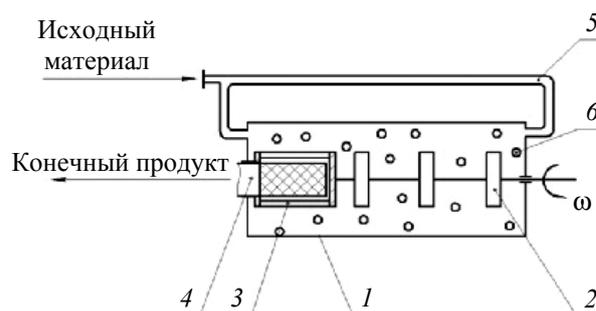


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1 – цилиндрический корпус; 2 – вращающиеся диски (мешалки); 3 – сепаратор; 4 – сетчатый фильтр;
5 – циркуляционный патрубок;
6 – измельчающие шарики

На начальной стадии изучения любого измельчающего агрегата важна кинетика помола материала в нем. Поэтому исследования проводились на мельнице, работающей в периодическом режиме. Помол осуществлялся исключительно в мокром состоянии при объемном соотношении измельчающих тел, материала и воды, равном 1 : 0,75 : 0,5. При этом частота вращения вала с мешалками оставалась постоянной – 1420 об/мин, что соответствует линейной скорости по кромкам мешалок – 10,03 м/с. Через определенные промежутки времени в интервале 5–30 мин из зоны помола отбирались пробы измельченного продукта. Анализ проб проводился на лазерном микроанализаторе фирмы Fritsch, при помощи измерительного комплекса Analysette 22.

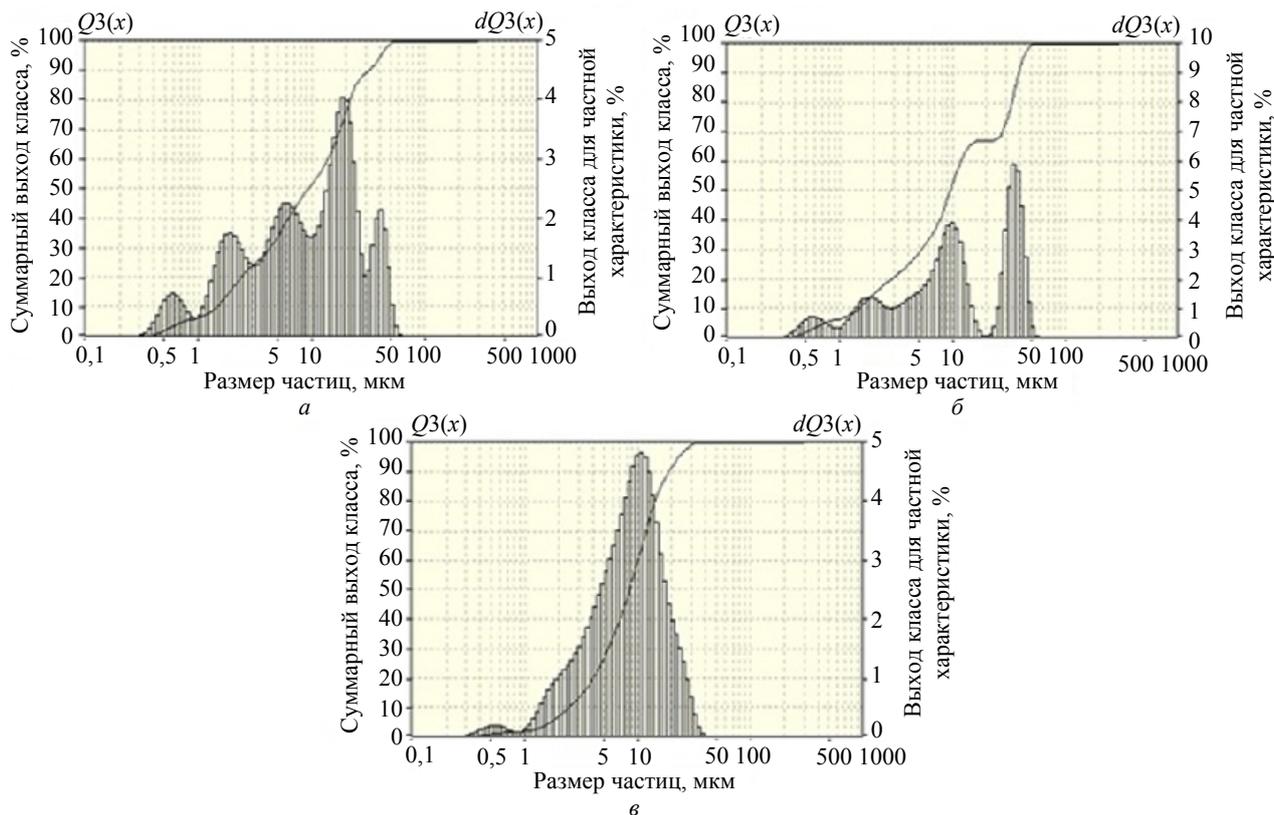


Рис. 2. Характеристика крупности распределения размера частиц в объеме пробы через 15 мин помола:
 а – мел; б – каолин; в – «белая сажа»

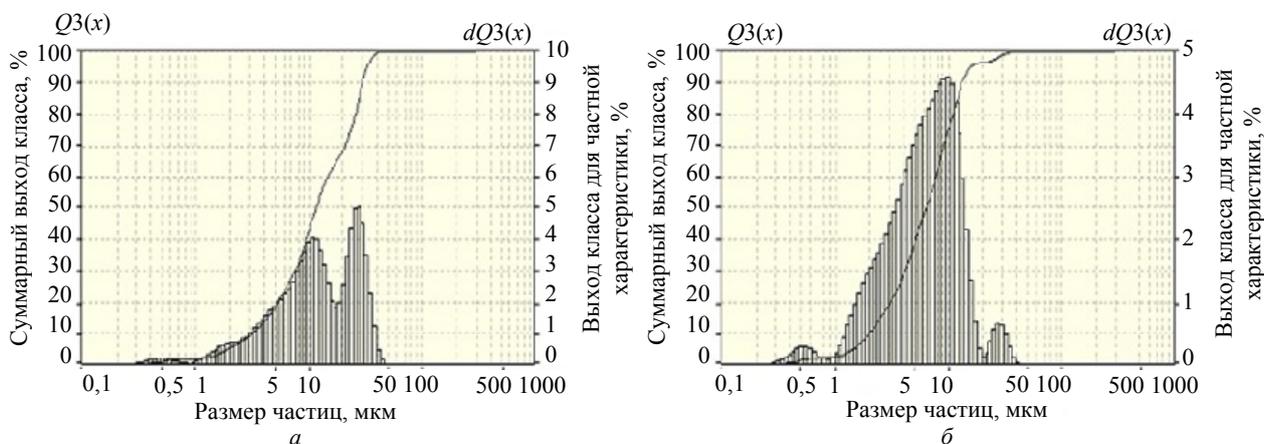


Рис. 3. Характеристика крупности распределения размера частиц в объеме пробы «белой сажи»:
 а – 5 мин; б – 30 мин

На рис. 2 представлены характеристики крупности для трех исследуемых материалов после 15-минутной обработки в мельнице с мешалкой. Во всех случаях максимальный размер частиц не превышает 50 мкм. Минимальный размер составил 0,2 мкм и увеличивался от «белой сажи» до каолина и мела, что свидетельствует о лучшей размоловоспособности этих материалов. При этом дисперсный состав измельченного продукта для «белой сажи» более равномерен. На частной характеристике «белой сажи» отмечается один максимум примерно 5%-ного содержания частиц диаметром 10 мкм. Для мела,

и особенно каолина, таких пиков на характеристике несколько, что указывает на более высокую полидисперсность продукта. Причиной этому может быть неоднородность состава этих материалов, в частности присутствие в них значительной доли такого трудно измельчаемого компонента, как кварцевый песок, в котором преобладает кристаллический оксид кремния.

В этой связи кинетика измельчения лучше всего прослеживается по изменению дисперсности «белой сажи» (рис. 3). Здесь представлены характеристики крупности указанного продукта при 5- и 30-минутной обработке в мельнице с

мешалкой. В совокупности с 15-минутной обработкой (рис. 2, в) они отражают реальную картину изменения дисперсности продукта измельчения во времени. Очевиден факт ее увеличения с течением времени, но одновременно и снижение скорости этого увеличения. Так, сравнение частных характеристик при 15- и 30-минутном помоле указывает на ее некоторое смещение в сторону более мелкого продукта, но при этом его максимум, характеризуемый размером в 10 мкм, уменьшается незначительно.

Изучение суммарных характеристик крупности, полученных с помощью лазерного микроанализатора, дает возможность установить взаимосвязь между размером определенного класса и его долей в общей массе продукта.

В табл. 1 представлены данные для «белой сажи» при разном времени помола. Причем за определяющий параметр принята некоторая доля класса (фракции) от 5 до 99% и установлен ее максимальный размер.

Таблица 1
Содержание размеров частиц в пробе при разной продолжительности помола

Доля фракции, %	Максимальный размер частиц при разном времени помола, мкм		
	5 мин	15 мин	30 мин
5	1,997	1,728	1,468
50	11,583	8,518	6,392
80	25,276	14,260	10,926
99	38,310	29,594	30,657

По данным табл. 1 четко прослеживается уменьшение размера частиц и повышение доли меньших фракций при увеличении времени помола. За 30 мин обработки в шаровой мельнице с мешалкой размер частиц «белой сажи» не превышает 30 мкм, а 80% из них – 11 мкм.

Используя суммарные характеристики крупности «по минусу», которые представлены как результаты анализа дисперсности, можно решить и обратную задачу – задавшись каким-то размером, определить в размолотом продукте долю частиц меньше этого размера. В табл. 2 приведены такие данные для разных материалов. Эти показатели еще раз подтверждают снижение размолотоспособности материалов от мела до «белой сажи».

Таблица 2
Доля частиц размолотого продукта в отобранных пробах

Определяющий размер, мкм	Доля фракций, %, для разных материалов при продолжительности помола 5 мин		
	мел	каолин	«белая сажа»
1,0	9,7	8,7	2,5
10	71,1	62,9	42,5

По полученным результатам для «белой сажи» построены зависимости эффективности диспергирования от времени воздействия (рис. 4). Эффективность при этом рассчитывалась по формуле

$$E = 100 - R, \quad (1)$$

где R – доля продукта, превышающего какой-то определенный размер, %.

За определяющий размер на рис. 4, а принят размер частиц 1 мкм, а на рис. 4, б – 10 мкм.

По кинетическим кривым (рис. 4) четко прослеживается уменьшение размера частиц (увеличение дисперсности) как для фракции 1 мкм, так и для фракции 10 мкм. Причем в исследуемом временном отрезке (5–30 мин) доля мелкой фракции (1 мкм) снижается всего на 1%, а крупной (10 мкм) – более чем на 30%. Это свидетельствует о том, что при уменьшении размера частиц процесс их диспергирования затрудняется.

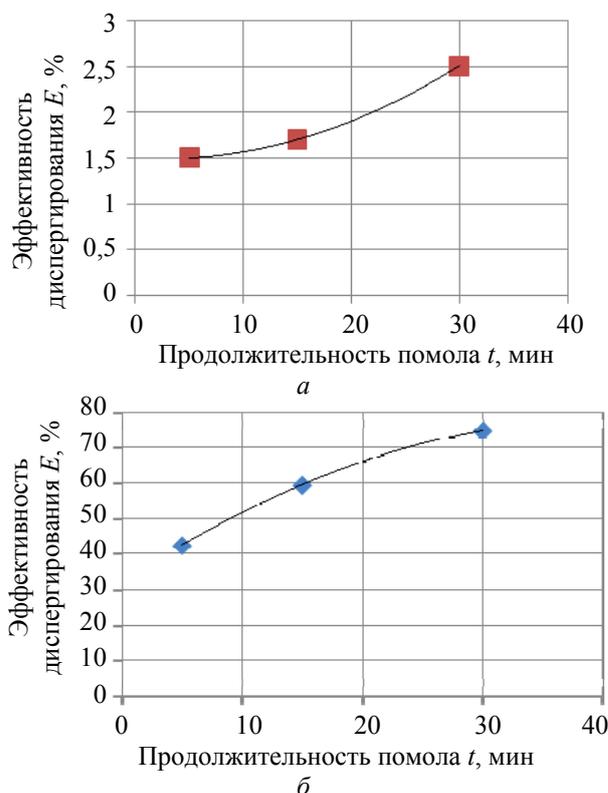


Рис. 4. Зависимость эффективности диспергирования от времени воздействия для разных определяющих размеров частиц: а – 1 мкм; б – 10 мкм

Обработка экспериментальных данных дала возможность получить эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования. Они представлены в виде полинома второй степени:

– для фракции менее 1 мкм:

$$E_1 = 0,0013t^2 - 0,0067t + 1,5; \quad (2)$$

– для фракции менее 10 мкм:

$$E_{10} = -0,0263t^2 + 2,253t + 32,08, \quad (3)$$

где E_1 и E_{10} – эффективность измельчения для размера 1 и 10 мкм соответственно, %; t – время измельчения, мин.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных данных не превышает 0,013–0,05%.

Основной, общепринятой в технологии и технике является суммарная характеристика, по которой можно определить выход любого класса крупности [9]. В логарифмической системе координат эта характеристика чаще всего преобразуется в прямую. Исходя из этого, экспериментальные данные принято обрабатывать в виде уравнения Розина – Раммлера [9]:

$$R_p = 100e^{-bd^n}, \quad (4)$$

где R_p – суммарный выход класса «по плюсу» (крупнее d); d – определяющий размер частиц (размер класса), мкм; b и n – параметры, зависящие от свойства материала и размерности d .

Обработка экспериментальных результатов, представленных в виде суммарной характеристики для «белой сажи» с временем помола 15 мин (рис. 2, в), позволила получить уравнение Розина – Раммлера с соответствующими коэффициентами:

$$R_p = 100e^{-8,4136d^{-0,2169}}. \quad (5)$$

Погрешность расчета по уравнению (5) не превышает 0,004%.

Такие уравнения можно получить для всех суммарных характеристик.

Закключение. В результате исследований измельчения материалов с различной размолоспособностью в шаровой мельнице с мешалкой установлен дисперсный состав конечного продукта. Получены их суммарные характеристики, по которым можно определить выход любого класса крупности. Показана возможность аналитического представления суммарной характеристики в виде уравнения Розина – Раммлера.

Проанализирована кинетика измельчения материалов в шаровой мельнице с мешалкой и получены уравнения для расчета изменения дисперсного состава конечного продукта во времени.

Установлено, что исходный продукт размером 0,2–3,0 мм в течение 5–30 мин может быть доведен до частиц размером 0,2–50,0 мкм. В некоторых

случаях минимальный размер не превышает 30 мкм, а 80% этих частиц – меньше 10 мкм. Это свидетельствует о высокой эффективности измельчения в шаровой мельнице с мешалкой.

Литература

1. Hiem, A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills / A. Hiem, T. P. Olejnik, A. Powlak // *Physicochem. Probr. Miner. Process.* – 2004. – Vol. 38. – P. 147–155.
2. Joost, B. Einfluß vor Mahlköper Eigenschaften auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen / B. Joost, J. Schwedes // *Chem.-Ing. Techn.* – 1996. – Jhrg. 68, № 7. – S. 809–812.
3. Kwade, A. Autogenzerkleinerung in Rührwerksmühlen / A. Kwade, J. Schwedes // *Chem.-Ing. Techn.* – 1996. – Jhrg. 68, № 7. – S. 12–14.
4. Hofmann, P. Feinvermahlung wirtschaftlich und technisch optimieren / P. Hofmann // *Welt Farben.* – 1998. – № 4. – S. 12–14.
5. Мельница мокрого помола: пат. 2081704 Российская Федерация, МПК6 В 02 С 17/16 / В. П. Соловьев, В. И. Кулаков; заявитель Научно-производственное малое предприятие «Диспод». – № 3521668; заявл. 30.09.94; опубл. 20.06.97 // *Официальный бюл. / Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам.* – 1997. – № 17. – С. 108.
6. Лабораторная бисерная мельница: пат. 2389555 Российская Федерация, МПК6 В 02 С 17/16 / М. А. Чернов; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» – № 2008146442/03; заявл. 24.11.2008; опубл. 20.11.2008 // *Официальный бюл. / Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам.* – 2008. – № 14. – С. 108.
7. Stehr, N. Großrührwerkskugelmühlen für die Mineralstoffmahlung / N. Stehr. – *Chem.-Ing. Techn.* – 1998. – Jhrg. 70, № 8. – S. 937.
8. Вайтехович, П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил: монография / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
9. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учебник для строительных вузов / С. Е. Андреев [и др.]. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980. – 415 с.

Поступила 29.02.2012