

УДК 621.926

## ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**В.И. КОЗЛОВСКИЙ**; д-р техн. наук, проф. **П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ**  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*Исследуется процесс помола материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия. Проанализированы характеристики крупности распределения размера частиц. Построены графические зависимости эффективности диспергирования от скорости вращения мешалки и движения суспензии. Предложен метод предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование.*

**Ключевые слова:** измельчение, шаровая мельница с мешалкой, характеристика крупности распределения размера частиц, эффективность, энергозатраты.

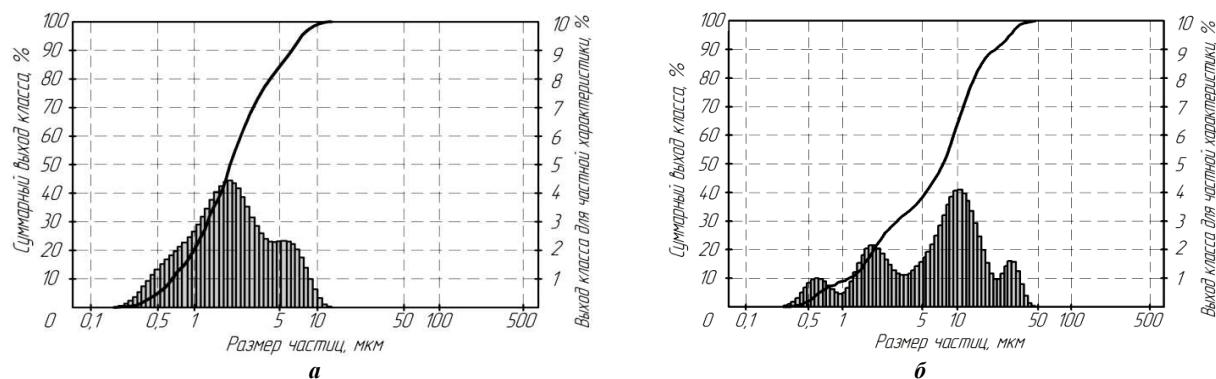
**Введение.** В составе практически всех композиционных материалов различного назначения широко используются наполнители – самые разнообразные по химическому составу и происхождению природные и искусственные материалы, вводимые в композиционные составы, в первую очередь для удешевления или придания им определенных эксплуатационных свойств. Функции наполнителей, вводимых в композиционный материал, разнообразны. Они могут вызывать упрочнение материала, оказывать армирующий, бронирующий, абразивный, уплотняющий, разбавляющий, стабилизирующий и другие эффекты. Наиболее широко применяются такие природные и органические наполнители, как мел, каолин, известняк, тальк, доломит, барит, диатомит, пробковая и древесная мука, белая сажа (гидратированный диоксид кремния), асбесты и др. Основным требованием к наполнителям независимо от происхождения является то, что они применяются в виде тонкодисперсных порошков или суспензий и что степень дисперсности для них – одно из важнейших свойств. Для получения тонкодисперсных суспензий сегодня используются шаровые мельницы с мешалками, причем преимущественно горизонтального типа [1–2].

Авторы данной работы продолжительное время занимаются исследованиями подобных агрегатов, начало которым положило изучение кинетики измельчения различных материалов при циклическом режиме. Установлено, что исходный продукт за несколько минут может быть доведен до долей микрометра. Методика проведения этих исследований и их основные результаты подробно описаны в публикациях [3–5].

**Основная часть.** Изучение основных характеристик мельницы с мешалками при непрерывной подаче исходного продукта и удалении готового с одновременной его циркуляцией по внешнему контуру – стало следующим этапом исследований. Причем на этом этапе были максимально сохранены технологические и конструктивные параметры объекта исследования. В качестве измельчающих тел использовались чугунные шарики диаметром 1 и 3 мм, которые заполняли рабочую камеру на 80...90%. При проведении экспериментов изменяли частоту вращения вала с мешалками от 1100 до 1500 об/мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам мешалок от 8,5 до 10,6 м/с.

Отличительная особенность данной части работы – варьирование подачи исходного продукта, обеспечивающей изменение скорости суспензии на полное сечение мельницы в пределах 0,097...0,226 м/с.

Измельчению подвергались мел, каолин и белая сажа с размером частиц 0,2...3 мкм. Анализ проб проводился на лазерном микроанализаторе фирмы «Fritsch» при помощи измерительного комплекса «Analysette 22», который выдает результаты в виде характеристик крупности распределения размеров частиц в объеме пробы. Две такие характеристики для каолина, полученные при одинаковой скорости движения рабочего органа (мешалки)  $u = 10,6$  м/с (диаметр шаров 1 мм) на разных скоростях движения суспензии, представлены на рисунке 1.



**а** – скорость подачи суспензии 0,097 м/с; **б** – скорость подачи суспензии 0,226 м/с

**Рисунок 1** – Распределение размеров частиц в объеме пробы каолина при скорости вращения мешалки 10,6 м/с

Из рисунка 1 видно, что увеличение скорости движения суспензии приводит к загрублению конечного продукта. Это происходит по двум причинам: во-первых, сокращается время пребывания материала в зоне помола, во-вторых, из-за увеличения скорости движения суспензии между пальцами сепаратора успевают проскочить частички большего размера.

Оценивать по характеристикам крупности влияние различных факторов на эффективность диспергирования довольно трудно. Поэтому мы перешли к параметру  $E = 100 - R$ , где  $R$  – доля конечного продукта размером более 10 мкм, как и в циклическом режиме. В результате большая часть экспериментального материала представлена в виде функциональных зависимостей  $E = f(x_i)$ , где  $x_i$  – изменяемый параметр.

Изменение эффективности диспергирования в зависимости от скорости подачи  $v$  суспензии (диаметр шаров 1 мм) показано на рисунке 2.

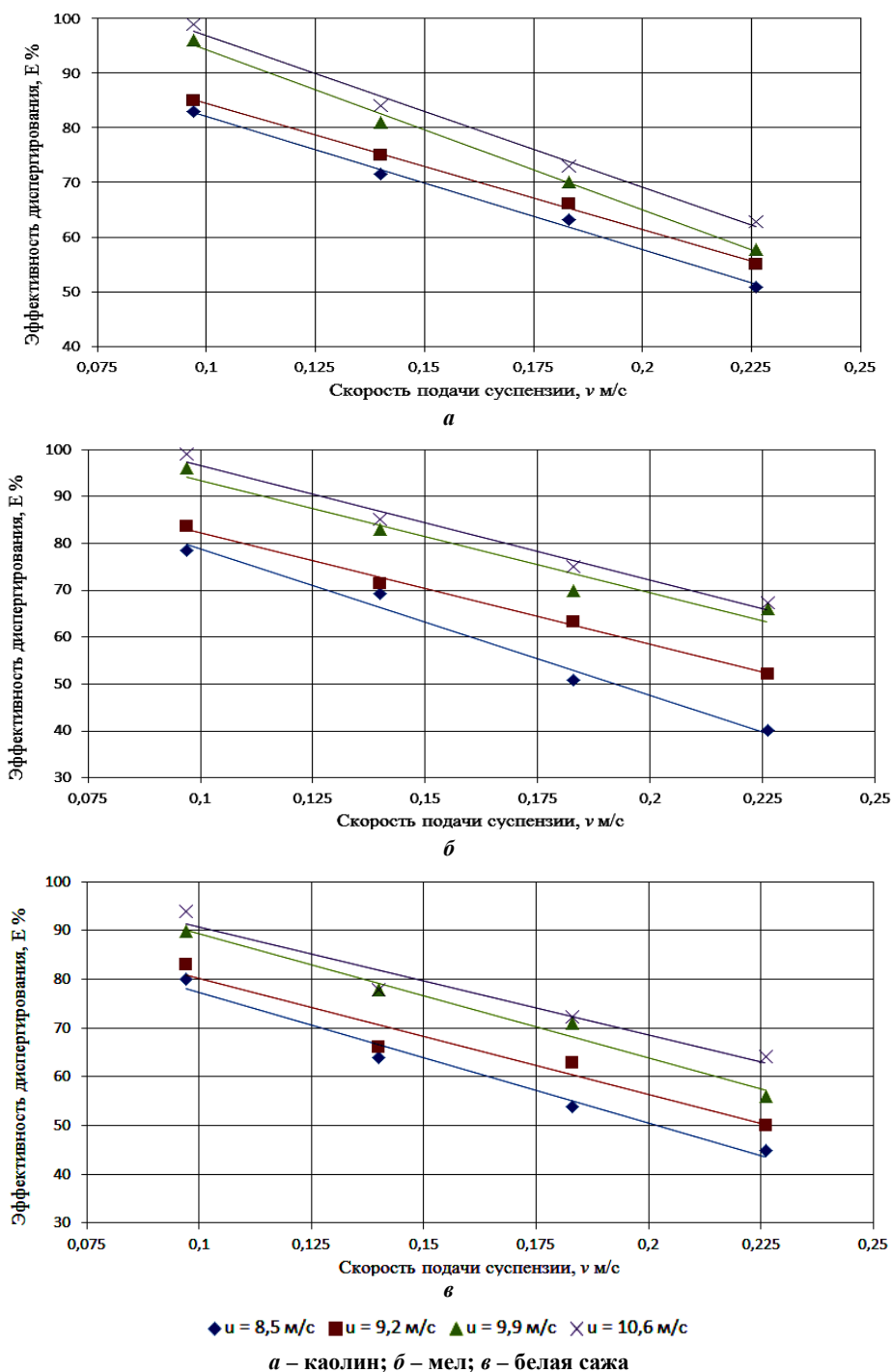


Рисунок 2 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости подачи суспензии (диаметр мелющих тел 1 мм)

Для всех измельчаемых материалов с увеличением скорости подачи суспензии, а соответственно, и производительности эффективность измельчения уменьшается, причем довольно существенно. Причины такого уменьшения указаны при анализе характеристик крупности (см. рис. 1). Вместе с тем повышение скорости вращения мешалок обеспечивает более высокую эффективность и ее падение не столь чувствительно. Например, для каолина (рис. 3) при изменении скорости мешалок от 8,5 до 10,6 м/с эффективность измельчения увеличивается на 15%. Пробные опыты для того же каолина с диаметром мелющих тел 3 мм показали аналогичные закономерности изменения эффективности, что и с диаметром 1 мм. Однако, как и в циклическом режиме, ее значения примерно на 10% ниже (рис. 4).

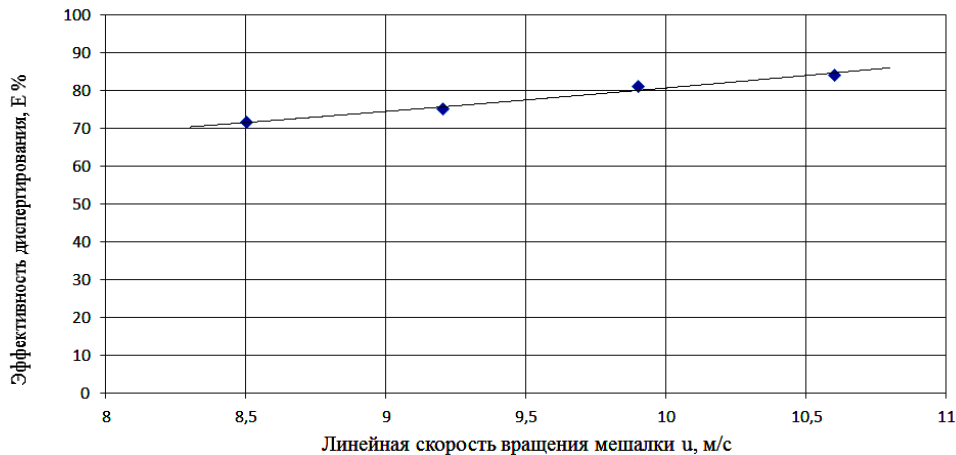


Рисунок 3 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости вращения мешалки при v = 0,097 м/с

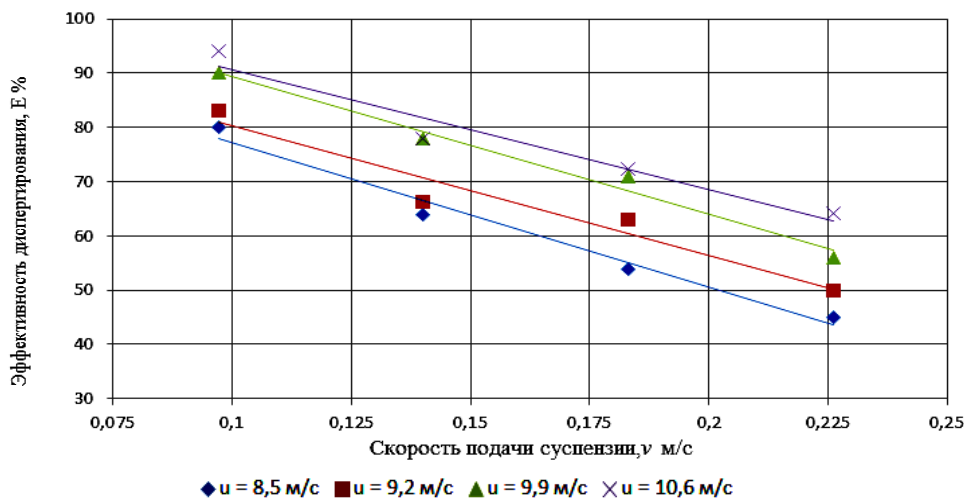


Рисунок 4 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости движения суспензии для каолина (диаметр мелющих тел 3 мм)

Обработка экспериментальных данных с учетом зависимости эффективности измельчения от двух переменных дала возможность получить расчетные эмпирические формулы (1) для каждого исследуемого материала:

$$\begin{aligned}
 & \text{- каолин} & E_k &= \frac{u}{0,186 \cdot u \cdot v^{2,1} - 0,5273v^2 + 0,1473v + 0,083}; \\
 & \text{- мел} & E_m &= \frac{u}{141,25 \cdot u \cdot v^{5,6} + 23,54v^2 - 4,9719v + 0,3773}; \\
 & \text{- белая сажа} & E_{б.с} &= \frac{u}{87,1 \cdot u \cdot v^{3,88} + 10,032v^2 + 0,8563v + 0,0924},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u – скорость движения рабочего органа мешалки; v – скорость подачи суспензии.

Полученные экспериментальные зависимости и расчетные уравнения, связывающие три параметра, могут быть использованы для предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование материала. В общем случае энергия затрачивается на приведение в движение рабочего органа (вала с мешалкой) и подачу суспензии насосом. Энергетическим показателем при этом является мощность привода мельницы и насоса. Для любой механической системы эта мощность рассчитывается по формуле

$$N_m = F \cdot u, \quad (2)$$

где  $F$  – движущая сила.

Движущая сила должна быть больше силы сопротивления среды, в которой вращаются мешалки. Эта сила рассчитывается как

$$F = c \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot S, \quad (3)$$

где  $c$  – коэффициент гидравлического сопротивления среды;  $\rho$  – плотность среды;  $S$  – активная площадь мешалки.

Таким образом, если принять фиксированными все параметры, кроме скорости, и обозначить их, например,  $A$ , то получим

$$N_m = A \cdot u^3, \quad (4)$$

Мощность насоса, необходимая для перемещения суспензии в мельнице:

$$N_n = p \cdot Q, \quad (5)$$

где  $p$  – давление, развиваемое насосом;  $Q$  – расход суспензии.

Но давление должно превышать гидравлическое сопротивление системы, которое определяется по формуле Вейсбаха:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot S, \quad (6)$$

где  $\zeta$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления системы.

Проведя преобразования, аналогичные с приводом мешалок, и введя еще один обобщающий параметр, получим

$$N_n = B \cdot v^3. \quad (7)$$

Таким образом, мы получили кубическую зависимость обеих составляющих энергетических затрат от скоростей движения мешалок и обрабатываемой суспензии соответственно.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим:  $u^3 = U$ ;  $v^3 = V$ .

Следующий этап исследований заключался в построении диаграмм. Строилась координатная сетка, по горизонтальной оси откладывались экспериментальные значения эффективности диспергирования. По одной из вертикальных осей откладывались расчетные значения параметра  $U$ , а по другой –  $V$ . Поскольку эти параметры эквивалентны затрачиваемой мощности, то, соединив расчетные значения, обозначенные точками, плавными кривыми, получим диаграммы, связывающие эффективность диспергирования с энергозатратами (рис. 5). Пересечение любых двух кривых, характеризующих изменение  $U$  или  $V$ , дают точку с максимально возможной эффективностью диспергирования при минимальных суммарных энергозатратах. По координатам точки пересечения легко можно определить скорости мешалок  $\sqrt[3]{U}$  и движения суспензии  $\sqrt[3]{V}$ , при которых обеспечивается этот максимум.

**Заключение.** Результатом исследования измельчения материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия являются характеристики крупности распределения размера частиц, по которым можно определить выход любого класса крупности.

Анализ изменения эффективности диспергирования в зависимости от скоростей вращения мешалки и движения суспензии позволил получить расчетные эмпирические формулы для разных материалов, которые связывают эти три параметра.

Предложен метод предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование, который можно использовать на стадии экспериментальных исследований. Установлено, что суммарные энергозатраты пропорциональны скоростям мешалок и суспензии в третьей степени. В качестве целевой функции при оптимизации выбрана эффективность измельчения, а оптимизирующих критериев – анало-

ги указанных скоростей. В результате оптимизации можно определить максимально возможную эффективность при минимальных энергозатратах.

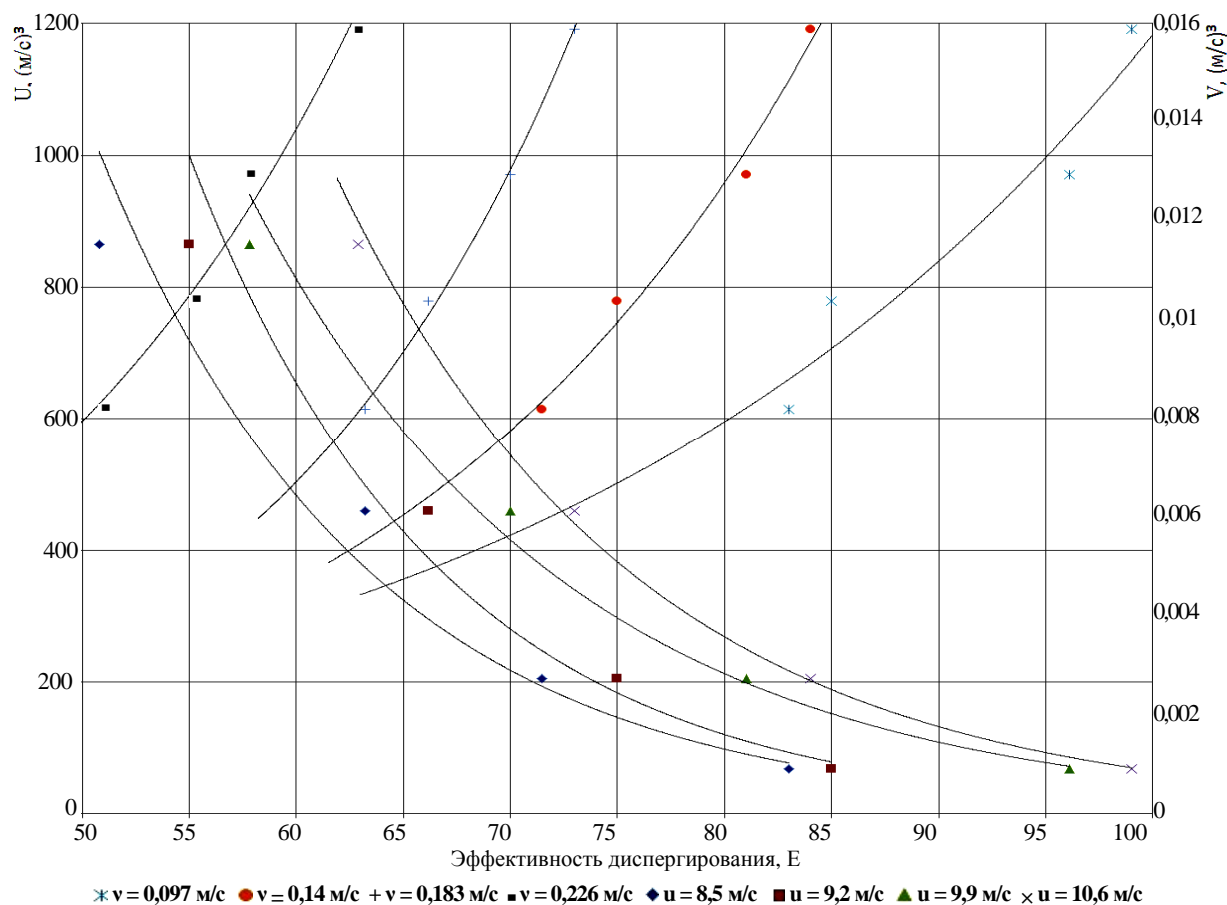


Рисунок 5 – Диаграмма для определения энергозатрат

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Joost, B. Einfluß vor Mahlkörper Eigenschaften auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen / B. Joost, J. Schwedes // Chem. – Ing. Techn. – 1996. – Jhrg. 68, № 7. – S. 809–812.
2. Кухтин, И.В. Усовершенствование диспергирующего оборудования для производства лакокрасочной продукции / И.В. Кухтин, В.Н. Ратников // Лакокрасочные материалы и их применение. – М., 2004. – № 1–2.
3. Козловский, В.И. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Тр. БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – Вып. III. – 200 с.
4. Козловский, В.И. Анализ дисперсности продуктов в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, А.М. Волк, П.Е. Вайтехович // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, вып. 11. – С. 1895–1898.
5. Интенсивность шарового измельчения в быстроходных мельницах / П.Е. Вайтехович [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – Вып. 9. – С. 46–52.

Поступила 27.01.2016

#### GRINDING OF MATERIALS IN THE BALL MILL WITH THE MIXER OF CONTINUOUSLY WORKING

V. KOZLOVSKY, P. VAJTEHOVICH

*In this paper we observe the results of the grinding of materials in the ball mill with a mixer of continuous working. The characteristics of distribution of fragmentation size are analysed, and the graphical dependences of dispersion efficiency on the speed of the mixer rotation and suspension traffic are built. We offer the method of a preliminary estimate and the optimisation of dispersion power inputs.*

**Keywords:** grinding, ball mill with a mixer, characteristics of distribution of fragmentation size, efficiency, power inputs.