

УДК 621.926

**В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович, Т. В. Камлюк**  
Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА МЕЛЮЩИХ ТЕЛ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА  
В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ**

В статье представлены результаты исследования влияния диаметра мелющих тел на эффективность диспергирования материалов в шаровой мельнице. Для измельчения использовались шарики диаметрами от 0,5 до 3,0 мм. При проведении экспериментов для перемешивания использовались перпендикулярные и наклонные диски, а в качестве измельчаемых материалов – каолин, мел и белая сажа. Анализ дисперсности конечного продукта проводился на лазерном микроанализаторе. В результате обработки характеристик крупности были построены графические зависимости эффективности диспергирования от размера мелющих тел для дисков, расположенных перпендикулярно и под углом. Установлено, что уменьшение диаметра шариков с 3,0 до 0,5 мм приводит к увеличению дисперсности продукта и повышению эффективности измельчения на 20–35%. Существенное влияние на размер конечного продукта оказывает вид перемешивающего органа. Использование для перемешивания наклонных дисков, по сравнению с перпендикулярными, позволило увеличить эффективность на 10–15%. Измельчение различных материалов показало, что увеличение твердости от 1 до 6 по шкале Мооса приводит к уменьшению эффективности измельчения на 15–20%. Обработка экспериментальных зависимостей позволила получить эмпирические уравнения для определения эффективности измельчения в зависимости от диаметра мелющих тел.

С помощью планирования многофакторного эксперимента были получены уравнения регрессии, по которым можно определить максимальное значение эффективности измельчения при оптимальных технологических параметрах: диаметр мелющих тел, плотность измельчаемого материала, скорость движения мешалки и скорость подачи суспензии.

**Ключевые слова:** шаровая мельница с мешалкой, эффективность диспергирования, мелющие тела, планирование многофакторного эксперимента.

**V. I. Kozlovskiy, P. Ye. Vaytekhovich, T. V. Kamlyuk**  
Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF SIZE OF GRINDING BODIES  
ON EFFICIENCY OF MATERIAL DISPERSION IN BALL MILL WITH MIXER**

The article presents the research results of the influence of the diameter of the grinding bodies on the efficiency of materials dispersed in the ball mill. For grinding balls ranging from 0.5 to 3.0 mm in diameter were used. At carrying out the experiments perpendicular and inclined discs were used for mixing, and kaolin, white black and chalk were used as the crushed materials. The analysis of the end-product of dispersion was performed on the laser microanalyzer. As a result of processing of fineness characteristics, the graphic dependences of dispersion efficiency from the size of grinding bodies for disks located perpendicularly and at an angle were constructed. It is found that the reduction of the diameter of balls from 3.0 to 0.5 mm results in the increase of the dispersion of the product, and thus the grinding efficiency is increased by 20–35%. Significant impact on the size of the end-product has the type of the agitating body. Using stirring inclined disks, compared with perpendicular, allowed increasing the efficiency by 10–15%. Grinding different materials showed that the increase in hardness from 1 to 6 on the Mohs scale leads to the decrease in grinding efficiency of 15–20%. The processing of experimental dependences allowed to receive the empirical equations for definition of efficiency of crushing depending on the diameter of the grinding bodies.

Using multifactorial experiment planning regression equations were obtained, which can determine the maximum value of the efficiency of the grinding under optimal process parameters: the diameter of the grinding bodies, the density of the crushed material, agitator speed and feed rate of the suspension.

**Key words:** ball mill with the mixer, efficiency dispersion, grinding bodies, planning of multifactorial experiment.

**Введение.** Тонкодисперсные материалы используются в таких многотоннажных отраслях промышленности, как строительная, химическая, лакокрасочная, фармацевтическая, сте-

кольная, пищевая и др. Применение этих материалов способствует улучшению различных эксплуатационных свойств выпускаемой продукции, а использование их в качестве напол-

нителей снижает себестоимость конечного продукта за счет уменьшения количества основного продукта [1–4].

Одним из основных агрегатов для получения сверхтонких материалов является шаровая мельница с мешалкой, в которой помол осуществляется в жидкой среде за счет истирания [5]. Применение данного помольного агрегата для получения тонкодисперсных материалов обусловлено тем, что, в отличие от удара, при истирании происходит снятие небольшого слоя материала, а жидкая среда способствует вымыванию и очищению поверхности от мелких частиц и не позволяет им агломерироваться.

На начальном этапе авторами данной работы была изучена гидродинамика шаровой мельницы с мешалкой при помощи программ компьютерного моделирования. После изучения распределения скоростей загрузки было установлено, что на гидродинамику значительное влияние оказывает наклон перемешивающих дисков. В этом случае наблюдается нестационарный режим движения загрузки с большим градиентом скоростей [5]. Для проверки этих данных была смонтирована лабораторная шаровая мельница с мешалкой, в которой проведен ряд экспериментов. В результате установлено, что применение наклонных дисков способствовало увеличению эффективности диспергирования на 10–15% [5].

**Основная часть.** Главной задачей работы в целом является получение минимально возможного конечного размера частиц. Поэтому далее проводились опыты с уменьшающимся размером мелющих тел, что, по идее, должно привести к увеличению дисперсности продукта.

Методика проведения экспериментов описана в работе [5]. В качестве измельчающих тел использовались чугунные шарики диаметром 0,5, 1,0 и 3,0 мм, которые заполняли рабочую камеру на 80–90%. Для перемешивания использовались диски, расположенные как перпендикулярно, так и под углом относительно оси вала. Линейная скорость по их кромкам составляла 10,6 м/с. Измельчению подвергались каолин, мел и белая сажа с твердостью по шкале Мооса, соответственно 1, 3 и 6. Эти материалы смешивались с водой в пропорции 1 : 2 и подавались внутрь мельницы, которая работала в непрерывном режиме со скоростью движения суспензии в ней 0,01 м/с. Анализ проб проводился на лазерном микроанализаторе.

В результате эксперимента были получены характеристики крупности распределения размера частиц в пробе. Три такие характеристики для мешалки с дисками, расположенными под углом, в случае помола шариками 0,5 мм представлены на рис. 1.

По этим характеристикам видно, что с возрастанием твердости материалов происходит увеличение максимального размера частиц с 5 мкм (каолин) до 10 мкм (белая сажа). Также можно отметить присутствие на характеристиках фракции с размером менее 0,1 мкм (100 нм), которая составляет 3–10% в зависимости от материала. Дальнейшая работа будет развиваться в направлении уменьшения максимального размера частиц в готовом продукте.

Далее, как и в работе [6], авторами проведена оценка эффективности измельчения, %, рассчитываемая по формуле

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

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

За определяющий принят размер в 5 мкм. Были построены зависимости эффективности диспергирования от диаметра мелющих тел для дисков, расположенных перпендикулярно (рис. 2а) и под углом (рис. 2б). На полученных графических зависимостях наблюдается увеличение эффективности диспергирования с уменьшением размера мелющих тел. Это происходит за счет уменьшения расстояния между шарами, что способствует более плотному их размещению и контакту с материалом в рабочем пространстве мельницы. Например, для каолина уменьшение диаметра мелющих тел с 3 до 0,5 мм позволило увеличить эффективность диспергирования на 20–35%. Такая же закономерность наблюдается и для других материалов. Полученные данные еще раз подтвердили повышение эффективности измельчения при использовании наклонных дисков. Так, для каолина при диаметре шариков 0,5 мм эффективность повышается с 92 до 99%, а для белой сажи – с 80 до 94%.

Обработка экспериментальных данных дала возможность получить эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования. Они представлены в виде логарифмических уравнений:

1) диски расположены перпендикулярно:  
– каолин

$$E = -15,91 \ln(d_T) + 88,45; \quad (2)$$

– мел

$$E = -19,83 \ln(d_T) + 84,247; \quad (3)$$

– белая сажа

$$E = -24,15 \ln(d_T) + 76,847; \quad (4)$$

2) диски расположены под углом:  
– каолин

$$E = -16,14 \ln(d_T) + 81,4; \quad (5)$$

– мел

$$E = -17,16 \ln(d_T) + 74,566; \quad (6)$$

– белая сажа

$$E = -21,29 \ln(d_T) + 64,158; \quad (7)$$

где  $E$  – эффективность диспергирования, %;  
 $d_T$  – диаметр мелющих тел, мм.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных по уравнениям (2–7) значений эффективности измельчения не превышает 2,0%.

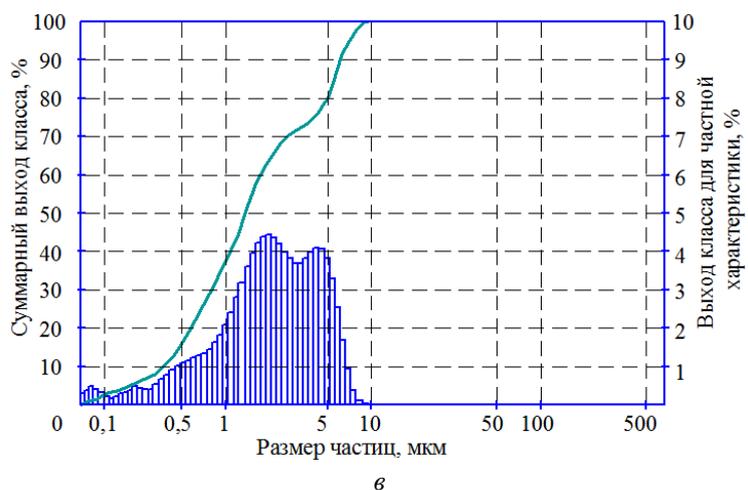
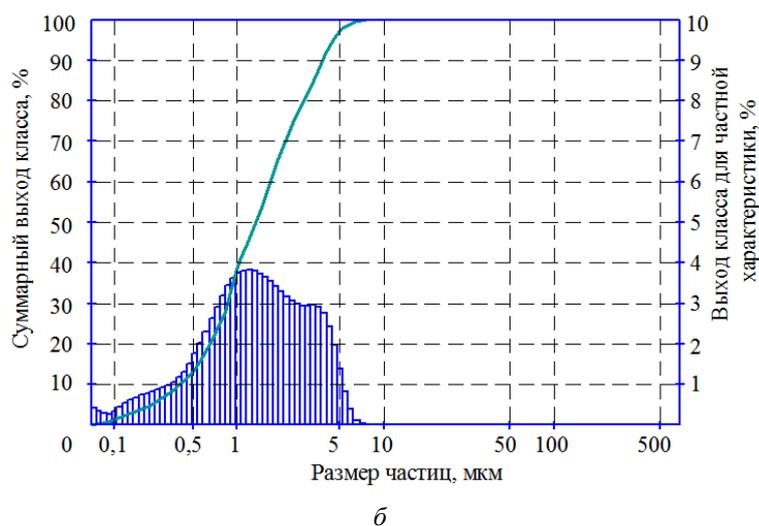
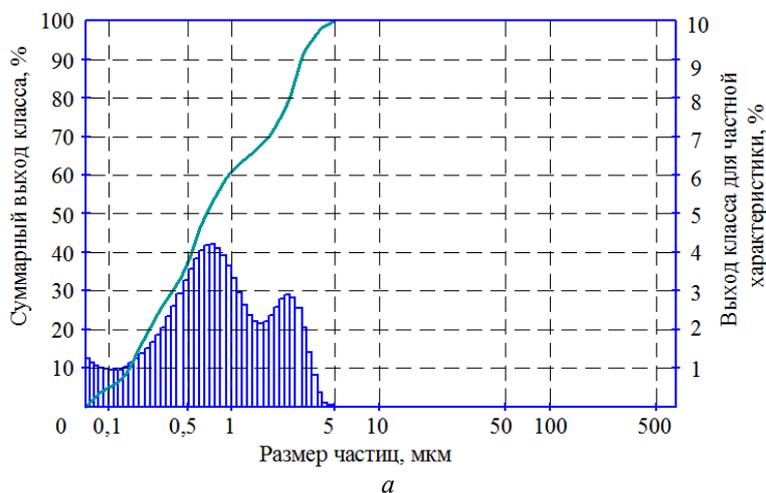


Рис 1. Характеристики крупности распределения размеров частиц:  
 а – каолин; б – мел; в – белая сажа

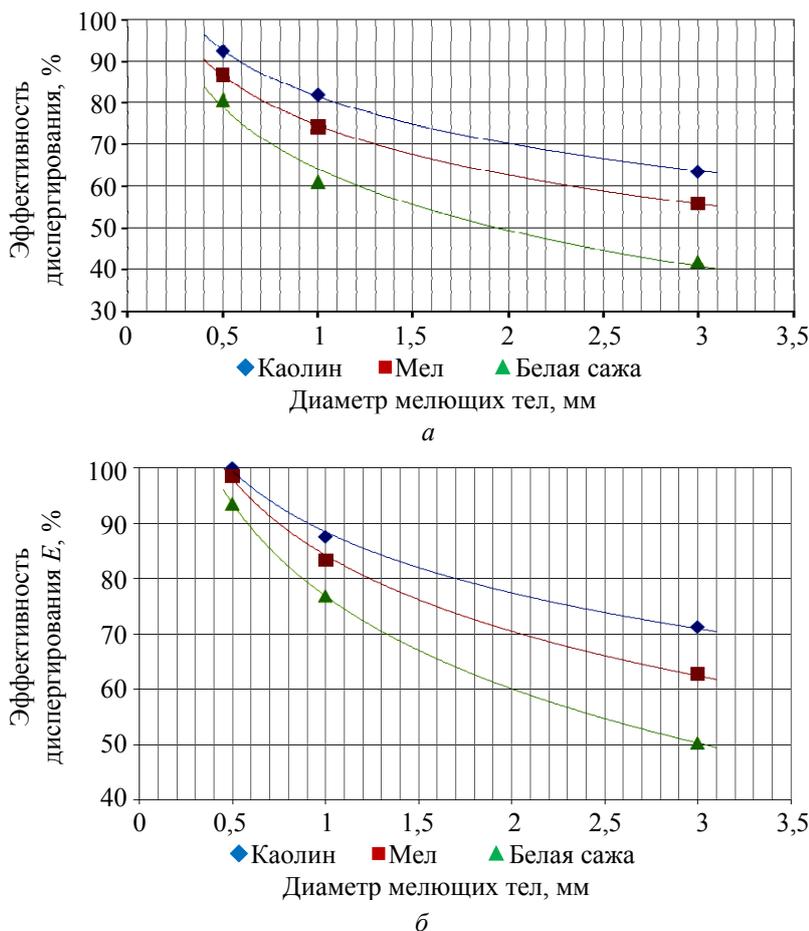


Рис. 2. Зависимость эффективности диспергирования от размера мелющих тел: *а* – диски расположены перпендикулярно; *б* – диски расположены под углом

В результате анализа ранее полученных экспериментальных данных [5–7] можно сделать вывод, что на такой параметр, как эффективность диспергирования, влияет очень много факторов и его определение для шаровой мельницы с мешалкой является весьма сложной задачей. Этот параметр для мельницы с определенными геометрическими размерами можно записать в виде функции, зависящей от нескольких параметров, таких как диаметр мелющих тел  $d_T$  (м), плотность измельчаемого материала  $\rho_M$  (кг/м<sup>3</sup>), скорость движения мешалок  $u$  (м/с) и скорость подачи суспензии  $v$  (м/с).

$$E = f(d_T, \rho_M, u, v). \tag{8}$$

Определить функциональные связи этих параметров можно используя планирование эксперимента [8] как основного метода экспериментально-статистической оптимизации. В качестве плана для проведения многофакторного эксперимента был выбран центральный композиционный ротатбельный план типа  $B_n$ , и были получены следующие уравнения регрессии для определения эффективности измельчения:

– для дисков, расположенных перпендикулярно

$$E = 80,3 - 5,3d_T + 4u - 7v - 2,5\rho_M + 0,15d_Tu - 0,1d_Tv - 1,1d_T\rho_M + 0,4uv - 0,1v\rho_M - 0,3d_Tvu + 0,2d_Tu\rho_M + 0,1d_Tv\rho_M + 0,1uv\rho_M + 0,2d_T\rho_Muv; \tag{9}$$

– для дисков, расположенных под углом

$$E = 88,9 - 4,9d_T + 2,7u - 5,1v - 3\rho_M + 0,5d_Tu - 1,2d_Tv - 0,8d_T\rho_M + 0,7uv - 0,54v\rho_M - 0,4d_Tvu + 0,1d_Tu\rho_M + 0,3d_Tv\rho_M - d_T\rho_Muv. \tag{10}$$

Адекватность уравнений (9)–(10) оценивалась по критериям Фишера.

Для шаровых мельниц с мешалками, имеющими, другие геометрические параметры, можно получить аналогичные зависимости, при этом достаточно провести эксперименты в крайних значениях факторов, определяющих характер протекания исследуемого процесса.

**Заключение.** Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что размер мелющих тел оказывает существенное влияние на эффективность диспергирования. С уменьшением их диаметра увеличивается дисперсность продукта и эффективность измельчения. Частицы конечного продукта могут быть доведены до наноразмера. Выбор оптимального размера измельчающих тел может способствовать увеличению эффективности диспергирования до 20% в зависимости от твердости измельчаемых материалов.

По результатам экспериментов получены эмпирические уравнения для определения эффективности измельчения в зависимости от диаметра мелющих тел для мельницы с перпендикулярными и наклонными дисками.

Использование методов планирования многофакторного эксперимента позволило получить уравнения регрессии для определения максимальной величины эффективности измельчения при оптимальных технологических параметрах.

### Литература

1. Hiem A., Powlak A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills // *Physicochem. Probr. Miner. Process.* 2004, no. 38, pp. 147–155.
2. Kwade A., Schwedes J. Autogenzerkleinerung in Ruhrwerksmühlen // *Chem. Ing. Techn.* 1996. N. 7. P. 12–14.
3. Уилдер М., Микола З. Преимущества и экономическая эффективность новой технологии диспергирования // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2003. № 7. С. 46–48.
4. Фромхерз Х., Спорнбергер С. Прогрессивные технологии обеспечивают эффективность диспергирования // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2002. № 3. С. 16–19.
5. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2015. № 7. С. 43–45.
6. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой // *Труды БГТУ, 2012, № 3: Химия и технология неорганич. в-в.* С. 96–99.
7. Козловский В. И., Вайтехович П. Е., Волк А.М. Анализ дисперсности продуктов в шаровой мельнице с мешалкой // *Журнал прикладной химии.* 2012. Т. 85. Вып. 11. С. 1895–1898.
8. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: БГУ, 1982. С. 30–32.

### References

1. Hiem A., Powlak A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills. *Physicochem. Probr. Miner. Process.* 2004, no. 38, pp. 147–155.
2. Kwade A., Schwedes J. Autogenzerkleinerung in Ruhrwerksmühlen. *Chem. Ing. Techn.* 1996, no. 7, pp. 12–14.
3. Wilder M., Mykola Z. Advantages and economic efficiency of new dispersion technology. *Lakokrasochnye materialy i ikh ispol'zovanie* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2003, no. 7, pp. 46–48 (In Russian).
4. Fromkherz H., Spornberger S. Breakthrough technologies provide efficiency of dispersion. *Lakokrasochnye materialy i ikh ispol'zovanie* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2002, no. 3, pp. 16–19 (In Russian).
5. Kozlovskiy V. I., Vaytekhovich P. Ye. Influence of characteristics of ball mill with mixer on its efficiency. *Lakokrasochnye materialy i ikh ispol'zovanie* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2015, no. 7, pp. 43–45 (In Russian).
6. Kozlovskiy V. I., Vaytekhovich P. Ye. Grinding materials in ball mill with mixer. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], 2012, no. 3: Chemistry and technology of inorganic substances, pp. 96–99 (In Russian).
7. Kozlovskiy V. I., Vaytekhovich P. Ye., Volk A. M. The analysis of product dispersion in ball mill with mixer. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Applied chemistry journal], 2012, vol. 85, no. 11, pp. 1895–1898 (In Russian).
8. Krasovskiy G. I., Filaretov G. F. *Planirovanie eksperimenta* [Experimental design], Minsk, BGU Publ., 1982, pp. 30–32.

### Информация об авторах

**Козловский Виталий Игоревич** – ассистент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

**Вайтехович Петр Евгеньевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

**Камлюк Татьяна Владимировна** – младший научный сотрудник центра физико-химических методов исследования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kamlik@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Kozlovskiy Vitaliy Igorevich** – assistant lecturer, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

**Vaytekhovich Petr Yevgen'yevich** – DSc (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

**Kamlyuk Tat'yana Vladimirovna** – Junior Researcher, the Center of Physical and Chemical Methods of Investigation. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kamlik@mail.ru

*Поступила 23.02.2016*