

УДК 622.736:621.926.3

В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович, Д.В. Кульша*УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ БИСЕРНЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

Аннотация. В статье представлены результаты исследования кинетики измельчения материала в вертикальной и горизонтальной бисерных мельницах с использованием различных видов роторов. Проведен их сравнительный анализ и получены эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования для всех вариантов мельниц.

Ключевые слова: вертикальная и горизонтальная бисерные мельницы, кинетика измельчения, характеристика крупности размеров частиц, эффективность диспергирования.

V.I. Kozlouskiy, P.E. Vaitekhovich, D.V. Kulsha*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***THE EFFICIENCY OF DISPERSING MATERIALS
IN VERTICAL AND HORIZONTAL BEAD MILLS**

Abstract. The paper presents the research results of the grinding material kinetics in vertical and horizontal bead mills using various types of rotors. Their comparative analysis is carried out and empirical dependences for calculation of dispersing efficiency for all variants of mills are obtained.

Keywords: vertical and horizontal bead mills, grinding kinetics, particle size characterisation, dispersion efficiency.

Введение

Наименее энергоемкими способами разрушающего воздействия при диспергировании являются раздавливание и удар. Но в случае сверхтонкого и коллоидного измельчения, несмотря на более высокую энергоемкость, вполне допустим переход на такой способ воздействия, как истирание [1]. Он реализован авторами данной статьи в рамках выполнения диссертационной работы в шаровой мельнице с мешалкой [2], часто называемой в нашей стране бисерной.

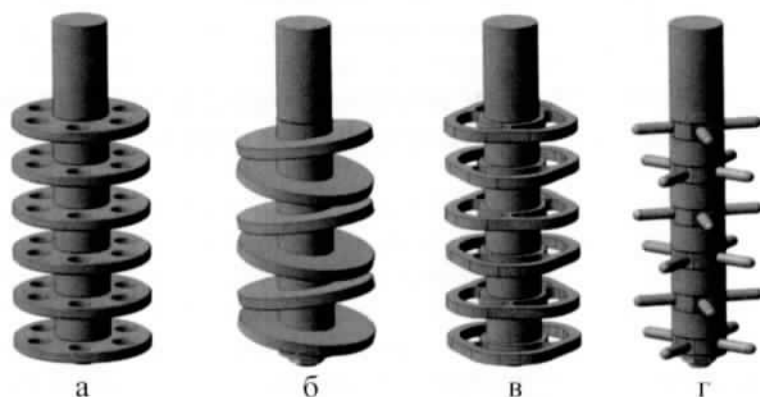
Бисерные мельницы широко используются в промышленности, особенно лакокрасочной, на протяжении нескольких десятков лет [3], [4]. Причем вначале это были мельницы в вертикальном исполнении. В последнее десятилетие значительно активнее стали применяться горизонтальные бисерные или мельницы с мешалками [5], [6]. Более равномерное распределение мелющих тел по объему размольной камеры и организация замкнутого цикла позволили довести в этих мельницах размер конечного продукта до коллоидных частиц и даже зайти в зону наноразмеров [7].

Вместе с тем в отдельных отраслях производства, где востребованы твердые частицы, соответствующие сверхтонкому помолу (1,0–20 мкм), одновременно используются вертикальные и горизонтальные бисерные мельницы. Инженерно-технические работники до сих пор не имеют веских аргументов для выбора оптимальной конструкции данного типа измельчителей.

Основная часть

Именно на решении этой задачи направлена комплексная научная работа нашего творческого коллектива. На ее первом этапе были проведены экспериментальные ис-

следования по изучению кинетики измельчения двух типов бисерных мельниц: вертикальной и горизонтальной с четырьмя видами рабочих органов в каждой из них. Варианты этих роторов представлены на рисунке 1.



а – с круглыми дисками; б – с наклонными дисками;
в – с треугольными дисками; г – со штырями

Рисунок 1 – Варианты роторов исследуемых мельниц

Причем варианты с круглыми дисками (рисунок 1а), с треугольными (рисунок 1в) и со штырями (рисунок 1г) объединены одним конструктивным признаком – перемешивающий орган у них расположен перпендикулярно валу. Такие конструкции широко используются на отечественных и зарубежных предприятиях.

Вариант с наклонными дисками (рисунок 1б) является новым техническим решением, предложенным авторами данной работы [8].

Из описания объектов исследования видно, что их можно назвать сравнительными для восьми конструктивных комбинаций, составленных из двух типов мельниц и четырех видов перемешивающих органов.

Для любых сравнительных исследований ценность и адекватность полученных результатов зависит от двух факторов: геометрического подобия моделей, на которых проводились эксперименты, и идентичность условий их проведения. Это подобие и идентичность достигаются тем, что диаметр корпусов мельниц составлял 120 мм, диаметр роторов – 100 мм, а их рабочий объем – 2 л. Для перемешивания загрузки использовались четыре конструкции роторов с шестью мешалками соответствующего вида. В качестве измельчающих тел использовались керамические шарики диаметром 2 мм, которые заполняли рабочую камеру на 80–85 %. Измельчаемый материал – мел с размером частиц 0,2–0,5 мм. Для получения суспензии он смешивался с водой в объемном соотношении 1:1. Частота вращения вала составляла 1450 об./мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам мешалок около 7,6 м/с. При проведении экспериментальных исследований отбор проб из зоны помола производился через определенные промежутки времени в интервале 0,5–5 мин.

В связи с тем, что помол осуществлялся мокрым способом, и предполагаемый конечный размер продукта должен был получиться менее 20 мкм, классический ситовой анализ для оценки дисперсности здесь не подходит. Поэтому для изучения фракционного состава проб их анализ проводился на лазерном микроанализаторе фирмы Fritsch при помощи измерительного комплекса Analysette 22, который выдавал результаты в виде характеристик крупности распределения размеров частиц в объеме пробы.

Пример одной из таких характеристик, полученной из проб, отобранной после пятиминутного измельчения, показан на рисунке 2.

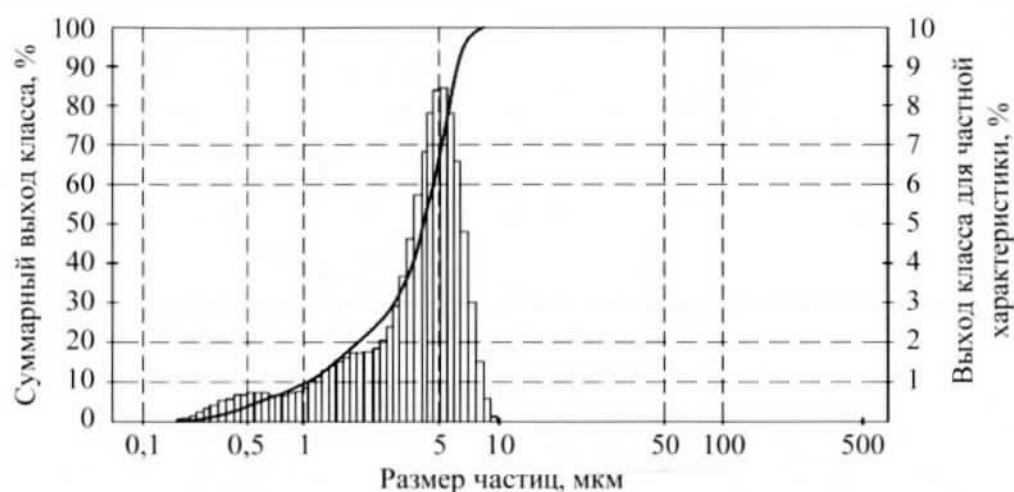


Рисунок 2 – Характеристика крупности размеров частиц

Здесь в виде столбиковой диаграммы представлена частная характеристика, а сплошной линией – суммарная характеристика крупности по «минусу», которые построены по методике, изложенной в работе [9].

Естественно, что указанные характеристики дают полную и развернутую картину распределения продуктов измельчения по размерам. Однако оценить по этим характеристикам влияние конструктивных параметров мельниц на эффективность измельчения довольно трудно. Поэтому, как и в предыдущих работах [10], [11], в качестве критерия эффективности диспергирования использовался параметр R_x , отображающий долю конечного продукта с размером частиц менее какого-то граничного размера. Это своеобразный аналог остатка на сите с отверстиями соответствующего размера. Причем ранее [10], [11] показано, что эффективность диспергирования E лучше рассчитывать по формуле:

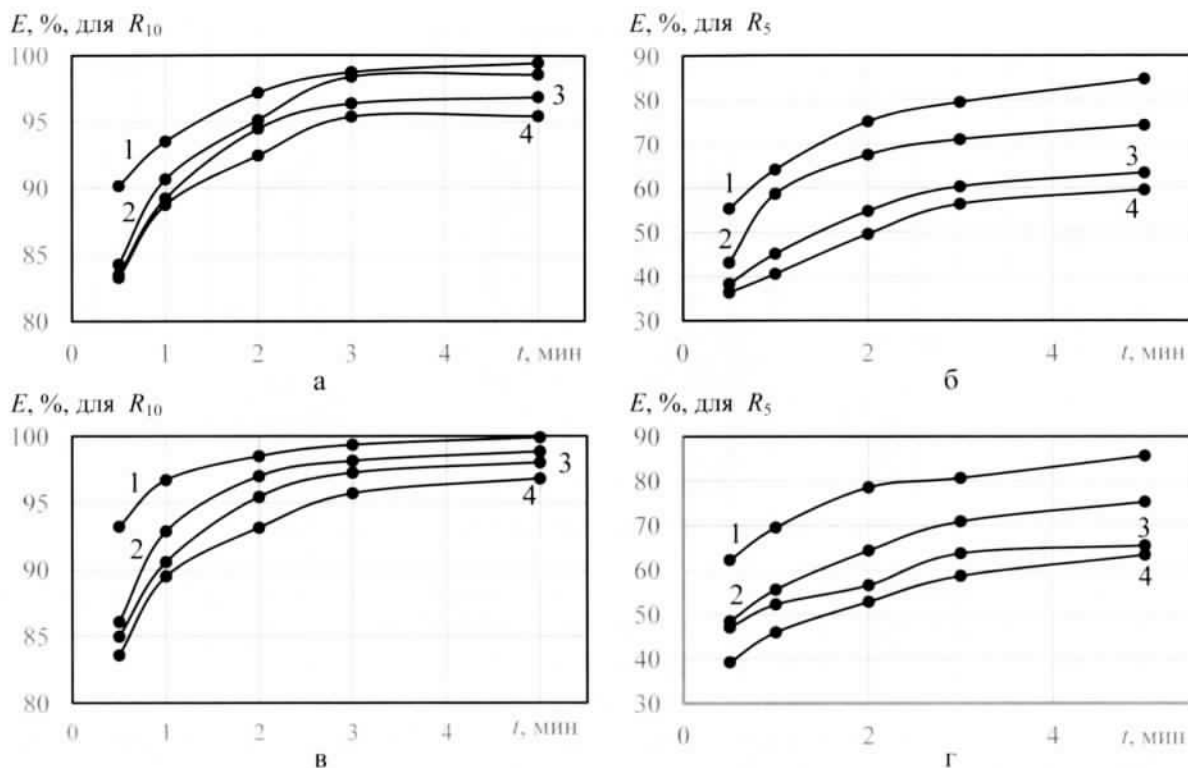
$$E = 100 - R_x, \% \quad (1)$$

После изучения характеристик крупности в объеме проб в качестве граничных размеров приняты частицы в 5 мкм и 10 мкм, что соответствует сверхтонкому помолу, реализуемому в бисерных мельницах. Их обозначение в формуле (1) будет R_5 и R_{10} .

В результате обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости $E = f(t)$ (где t – время диспергирования, мин). Они представлены на рисунке 3 и являются кинетическими кривыми процесса измельчения. Причем, как и для многих других процессов, кинетика измельчения во времени изменяется по логарифмическому закону. Графики, характеризующие увеличение эффективности, асимптотически приближаются к своему максимуму.

На них четко прослеживается уменьшение размера частиц (увеличение эффективности) при увеличении времени помола как для фракции R_5 , так и R_{10} . Причем граничный размер в 10 мкм наблюдается в пробах уже после 0,5 мин обработки, и его количество достаточно высокое – 80–90 %.

Однако, по изменению эффективности для R_{10} (рисунки 3а и 3в) не просматривается существенной и четкой разницы между исследуемыми конструктивными вариантами мельниц. Очевидно, что на начальной стадии помола она несколько выше для варианта с наклонными дисками. Но в конце помола, когда все кинетические кривые приближаются к своему максимуму, эта разница вообще нивелируется до минимального значения. Совсем другая картина наблюдается в случае выбора граничного размера частиц в 5 мкм (R_5), графики для которого показаны на рисунках 3б и 3г.



а, б – вертикальная бисерная мельница; в, г – горизонтальная бисерная мельница;

1 – ротор с наклонными дисками; 2 – ротор с треугольными дисками;

3 – ротор с круглыми дисками; 4 – ротор со штырями

Рисунок 3 – Зависимость эффективности диспергирования от времени помола

Здесь во все периоды измельчения (0,5–5 мин) очевидно влияние конструктивных параметров мельниц на эффективность диспергирования. Особенно это влияние определяется видом рабочего органа. Разница между лучшим по эффективности ротором с наклонными дисками и штыревым составляет 20 %. Это обусловлено тем, что за счет наклона дисков создается нестационарный режим движения загрузки с большим градиентом скорости.

В меньшей степени на эффективность диспергирования влияет положение корпуса. Но при горизонтальном расположении корпуса для вышеуказанных роторов эффективность диспергирования в среднем на 5 % выше.

Обработка графических зависимостей дала возможность получить эмпирические уравнения для расчета эффективности диспергирования. В общем виде они представлены в виде логарифмической зависимости:

$$E = B \cdot \ln(t) + C, \quad (2)$$

где B и C – эмпирические коэффициенты (таблица 1);

t – время измельчения, мин.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных данных не превышает 0,1–0,5 %.

Заключение

В результате исследования измельчения материала в вертикальной и горизонтальной бисерных мельницах установлен дисперсный состав конечного продукта. Получены характеристики распределения размеров частиц в объеме пробы, по которым можно определить выход любого класса крупности.

Таблица 1 – Эмпирические коэффициенты для расчета эффективности диспергирования от времени измельчения

Вид ротора	R_5		R_{10}	
	B	C	B	C
Вертикальная бисерная мельница				
Ротор с наклонными дисками	13,75	64,70	4,86	93,55
Ротор с треугольными дисками	15,46	55,80	7,95	90,16
Ротор с круглыми дисками	12,37	46,23	7,32	88,86
Ротор с штырями	11,15	42,64	6,59	88,13
Горизонтальная бисерная мельница				
Ротор с наклонными дисками	10,72	69,78	3,78	96,03
Ротор с треугольными дисками	12,44	56,39	6,40	90,78
Ротор с круглыми дисками	8,72	52,49	6,65	89,62
Ротор с штырями	10,61	46,23	6,55	87,49

Проанализирована кинетика измельчения материала для бисерных мельниц с вертикальным и горизонтальным расположением помольной камеры с использованием разного вида роторов. Установлено, что продукт размером 0,2–0,5 мм в течение 0,5–2 минут обработки может иметь более 90 % частиц с размером менее 10 мкм, что свидетельствует о высокой эффективности измельчения в этом типе мельниц. Получены эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования для всех вариантов мельниц.

Сравнительный анализ показал, что создание нестационарного режима движения загрузки за счет изменения наклонов дисков позволило увеличить эффективность измельчения в среднем на 20 %. Изменение положения помольной камеры с вертикального на горизонтальное способствовало увеличению эффективности диспергирования примерно на 5 %.

Даже из этого простого сравнения по эффективности измельчения очевидно, что конструктивные параметры мельниц оказывают существенное влияние только вблизи нижней границы сверхтонкого помола при размере частиц конечного продукта менее 5 мкм. Но эффективность – это качественный параметр процесса. Объективную оценку преимуществ той или иной конструкции можно установить по удельным энергозатратам на единицу эффективности, что входит в дальнейшие планы авторского коллектива.

Список использованных источников

1. Вайтехович, П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил: монография / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Козловский, В. И. Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Козловский Виталий Игоревич; Белорусский государственный технологический университет. – Минск, 2017. – 24 с.
3. Масунов, Е. Б. Преимущество различных типов отечественного диспергирующего оборудования с мелющими телами / Е. Б. Масунов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1983. – № 2. – С. 37–39.
4. Кухтин, И. В. Усовершенствование диспергирующего оборудования для производства лакокрасочной продукции / И. В. Кухтин, В. Н. Ратников // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 1/2. – С. 56–59.
5. Joost, B. Einfluss vor Mahlkörper Eigenschaften auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen / B. Joost, J. Schwedes // Chem. – Ing. Techn. – 1996. – Jhrg. 68, No. 7. – S. 809–812.

6. Hiem, A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills / A. Hiem, A. Powlak // *Physicochem. Probr. Miner. Process.* – 2004. – No. 38. – P. 147–155.

7. Козловский, В. И. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // *Лакокрасочные материалы и их применение.* – 2015. – № 7. – С. 43–45.

8. Патент ВУ 19532, МПК В02С17/16, В02В15/12. Шаровая мельница с мешалкой: № а 20121354: заявлено 26.09.2012: опубл. 30.10.2015 / Козловский В. И., Вайтехович П. Е.; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – URL: <https://ncip.by/upload/iblock/7c9/7c9b0db6174b6c49fcf68d850e951ba0.pdf>. (Дата обращения: 20.05.2025).

9. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учеб. для вузов / С. Е. Андреев, В. М. Зверевич, В. А. Перов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 415 с.

10. Козловский, В. И. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // *Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ.* – 2012. – № 3. – С. 126–129.

11. Козловский, В. И. Комплексная технология диспергирования меловых наполнителей композитов мокрым способом / В. И. Козловский, О. А. Петров, Д. Н. Боровский // *Вестник ПГУ. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки.* – 2020. – № 8. – С. 71–75.

Информация об авторах

Виталий Игоревич Козловский – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: mr.vit.koz@mail.ru.
ID ORCID: 0009-0005-5898-3913.

Петр Евгеньевич Вайтехович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: vpe51@mail.ru. ID ORCID: 0000-0002-0355-4717.

Дмитрий Владимирович Кульша – магистрант кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: d.prostosmile@gmail.com. ID ORCID: 0009-0007-8177-2916.

Information about the authors

Vital Kozlouskiy – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Machines and Apparatus of Chemical and Silicate Productions”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: mr.vit.koz@mail.ru.
ID ORCID: 0009-0005-5898-3913.

Peter Vaitekhovich – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department “Machines and Apparatus of Chemical and Silicate Productions”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: vpe51@mail.ru. ID ORCID: 0000-0002-0355-4717.

Dzmitry Kulsha – Master's student of the Department “Machines and Apparatus of Chemical and Silicate Productions”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: d.prostosmile@gmail.com. ID ORCID: 0009-0007-8177-2916.

Поступила в редакцию 23.05.2025 г.