

Теоретические основы химической технологии
Theoretical bases of chemical technologies

УДК 66.03

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-95-103>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Приготовление тонкодисперсных суспензий с использованием бисерных мельниц

Л.С. Елиневская, Д.В. Дзарданов, О.В. Улыбина, Р.Н. Иванов✉

Фирма Август, Москва, 129515 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: r.ivanov@avgust.com

Аннотация

Цели. Изучение закономерностей изменения основных физических свойств суспензий после их измельчения в бисерных мельницах с перспективой оптимизации технологии приготовления и распространения полученных результатов на другие дисперсионные фазы.

Методы. Размеры частиц определяли с помощью лазерной дифракции Фраунгофера. Полученные данные по дисперсному составу суспензий качественно проверяли оптической микроскопией. Для оценки реологических свойств полученных суспензий использовали метод определения кажущейся динамической вязкости по Брукфильду. Плотность полученных суспензий измеряли навесным методом с помощью калиброванного пикнометра.

Результаты. Установлены зависимости изменения дисперсного состава после измельчения суспензий в бисерной мельнице. Было обнаружено увеличение вязкости суспензий после процесса размола. Установлены общие закономерности изменения плотности рассматриваемых суспензий.

Выводы. Проведенные исследования показали, что на физико-механические свойства суспензий влияют вид и степень загрузки используемого бисера, время пребывания суспензии в размольной камере, количество операций измельчения, конструкции мельницы.

Ключевые слова

бисерная мельница, диспергирование, размер частиц, суспензии, функции распределения частиц, микрогетерогенные дисперсные системы, дифракция Фраунгофера, вязкость суспензий

Поступила: 01.03.2023

Доработана: 12.05.2023

Принята в печать: 14.03.2024

Для цитирования

Елиневская Л.С., Дзарданов Д.В., Улыбина О.В., Иванов Р.Н. Приготовление тонкодисперсных суспензий с использованием бисерных мельниц. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(2):95–103. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-95-103>

RESEARCH ARTICLE

Preparation of fine suspensions using stirred media bead mill

Larisa S. Elinevskaya, Danil V. Dzardanov, Olga V. Ulybina, Roman N. Ivanov✉

Firma August, Moscow, 129515 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: r.ivanov@avgust.com

Abstract

Objectives. To determine the change patterns for the main physical properties of suspensions after their grinding in bead mills, with the prospect of optimizing the preparation technology and extending the results obtained to other dispersed phases.

Methods. The study used the Fraunhofer laser diffraction method to determine particle size. The obtained data on the particle size distribution of suspensions were qualitatively verified by optical microscopy. The Brookfield relative viscosity method was used to evaluate the rheological properties of the resulting suspensions. The density of the resulting suspensions was measured by the hanging method using a calibrated pycnometer.

Results. The dependencies of the change in the particle size distribution after grinding in a bead mill were established. The viscosity of the suspensions was observed to increase following grinding. Common regularities of changes in the density of the considered suspensions were established.

Conclusions. The conducted studies showed that the physical and mechanical properties of suspensions are affected by the type and the filling ratio of the grinding media; the residence time of the suspension in the grinding chamber; the number of grinding operations; mill designs.

Keywords

bead mill, stirred media mill, grinding, particle size distribution, suspensions, disperse systems, Fraunhofer diffraction, suspension viscosity

Submitted: 01.03.2023

Revised: 12.05.2023

Accepted: 14.03.2024

For citation

Elinevskaya L.S., Dzardanov D.V., Ulybina O.V., Ivanov R.N. Preparation of fine suspensions using stirred media bead mill. *Tonk. Khim. Tekhnol.* = *Fine Chem. Technol.* 2024;19(2):95–103. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-95-103>

ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные системы в форме суспензий являются широко применимыми и утилитарно удобными продуктами во многих сферах производства и жизнедеятельности человека. В зависимости от своего применения и физико-химических свойств входящих в их состав компонентов, они сильно различаются по своим качественным характеристикам и способу производства. В данной статье рассмотрен процесс получения именно тонкодисперсных продуктов при помощи бисерных мельниц.

Бисерные мельницы получили широкое распространение в последние годы в таких областях, как производство химических средств защиты растений, лакокрасочных, фармацевтических и пищевых продуктов, а также при производстве стройматериалов, добыче природных ископаемых и др. По сравнению с другими устройствами диспергирования, бисерные мельницы обычно имеют более низкие энергетические затраты на процесс измельчения [1]. Однако, несмотря на довольно широкое распространение таких аппаратов, закономерности

их работы изучены пока крайне слабо [2], что, в частности, можно связать со сложностью происходящих в них во время размола процессов и значительном количестве параметров [3], влияющих на фактическое измельчение частиц дисперсионной фазы. Кроме сугубо технологических характеристик, таких как размер, твердость и степень наполнения измельчающих тел, расход суспензии, конструкции мельницы и др., среди подлежащих осмыслению и контролю вещей стоит отметить происходящее увеличение площади активной поверхности измельчаемых компонентов, что, в свою очередь, может быть сопряжено с различными поверхностными явлениями, влияющими на финальный продукт. К тому же, в зависимости от его целевого назначения, само понятие качества будет определяться разным сочетанием физико-химических характеристик. В числе последних, кроме непосредственного размера частиц до и после помола, стоит отметить также реологическое поведение суспензий, их агрегативную и седиментационную устойчивость, равномерность распределения частиц дисперсионной фазы и др.

Построение единого, опирающегося на доступные теории и способного включить в себя все перечисленные выше параметры, алгоритма работы с бисерной мельницей представляется процессом едва ли не более трудоемким и сложным, чем сам помол, поэтому обычно режимы работы данных аппаратов подбираются экспериментально [2, 4]. Таким образом, научной информации по процессу помола суспензий в бисерных мельницах на данный момент собрано крайне мало. Подходы к теоретическому описанию закономерностей работы бисерных мельниц и некоторые данные, полученные при экспериментальных исследованиях рассматриваемого процесса, приведены в работах [1, 3, 5–14].

Целью данной работы является подкрепление упомянутой выше теоретической базы, экспериментальное изучение влияния основных технологических параметров работы бисерных мельниц на физико-механические свойства получаемых суспензий (дисперсный состав, вязкость, плотность), а также поиск вероятных закономерностей для их дальнейшего распространения на иные системы и практического применения в процессах производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были взяты водные суспензии мела и каолина, которые используются при производстве целого ряда продуктов: средств защиты растений, тонкодисперсных наполнителей, строительных смесей, красок, косметики, изделий из бумаги и стекла и др. Процесс размала суспензий в бисерных мельницах напрямую сопряжен с коллоидными явлениями. В частности, увеличивающаяся во время измельчения поверхность твердой фазы может по-разному взаимодействовать с дисперсионной средой, что не исключает образования агрегатов из полученных измельченных частиц. Изучаемые суспензии мела и каолина в воде обладают достаточной агрегативной устойчивостью, что позволяет пренебречь влиянием поверхностных явлений на процесс размала.

Эксперименты проводили на лабораторных мельницах LabStar (Netsch, Германия) и MultiLab (WAB, Швейцария). Данные машины различаются между собой размерами камер измельчения, видами перемешивающих устройств на роторе и системами отделения бисера от продукта. Мельница LabStar имеет объем камеры измельчения 0.9 л, внутренний диаметр размольной камеры 90 мм и длину размольной камеры 187.9 мм. В качестве

системы отделения бисера от продукта используется сетчатый патрон с центробежной системой отбрасывания бисера. В качестве мелющих тел в данной мельнице использовали керамический бисер ZetaBeads (Netsch, Германия) 0.6 с загрузкой в 61.7 об. %.

Мельница MultiLab имеет объем камеры измельчения 0.561 л, внутренний диаметр размольной камеры 77 мм и длину размольной камеры 150 мм. В качестве системы отделения бисера от продукта используется щелевой классификатор (WAB, Швейцария). В качестве мелющих тел в данной мельнице использовали стеклянный бисер SL 7505 (Sigmund Lindner GmbH, Германия) с загрузкой в 80 об. %.

В ходе экспериментов использовался мел марки МТД-2 (МелСтром, Россия), каолин сухого обогащения Чекмакульского месторождения (ГОСТ 19608-84¹, (Новокаолиновый ГОК, Россия) и дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144-2018². Содержание твердой фазы в суспензии мела составляло 40 мас. %, в водной суспензии каолина 25 мас. %. Эксперименты проводили на лабораторной установке, схема которой изображена на рис. 1. Приготовление суспензии производили в стакане C_1 , для перемешивания использовали лопастную мешалку. В заданное количество дистиллированной воды при непрерывном перемешивании добавляли заданное количество мела или каолина. После загрузки всех компонентов полученную суспензию дополнительно перемешивали 10–15 мин. Далее отбирали пробу полученной суспензии для измерения ее начальной дисперсности, вязкости и плотности.

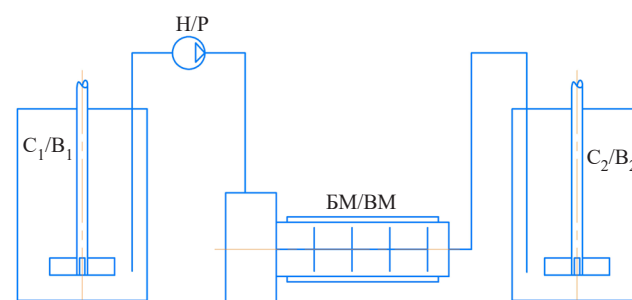


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
 C_1 , C_2 — лабораторные стаканы с верхнеприводной мешалкой; Н — перистальтический насос; БМ — бисерная мельница

Fig. 1. Scheme of the laboratory assembly: B_1 and B_2 are chemical beakers with an overhead stirrer; P is a peristaltic pump; BM is an agitator bead mill

¹ ГОСТ 19608-84. Государственный стандарт Союза ССР. Каолин обогащенный для резинотехнических и пластмассовых изделий, искусственных кож и тканей. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по стандартам; 1984. [GOST 19608-84. State Standard of the USSR. Enriched kaolin for rubber and plastic products, artificial leather and fabrics. Technical conditions. Moscow: USSR State Committee for Standards; 1984.]

² ГОСТ Р 58144-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Вода дистиллированная. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации; 2022. [GOST R 58144-2018. National Standard of the Russian Federation. Distilled water. Technical conditions. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022.]

После приготовления исходной суспензии устанавливали определенные параметры эксперимента и проводили размол суспензии в проходном режиме. Исходную суспензию подавали в бисерную мельницу (БМ) с помощью перистальтического насоса (Н), снабженного питающим шлангом диаметром 13×2.5 мм. Заполнение мельниц обычно проводили при частоте вращения ротора насоса 15 об/мин и частоте вращения ротора мельницы 1000 об/мин для мельницы LabStar и выключенном роторе для мельницы MultiLab. Во всех экспериментах частота вращения ротора насоса в процессе размола составляла 50 об/мин, что соответствует объемному расходу $V = 350$ мл/мин для мельницы LabStar и $V = 195$ мл/мин для мельницы MultiLab. Во всех экспериментах частота вращения ротора ω мельницы LabStar составляла 3000 об/мин, а MultiLab 2986 об/мин. Как только суспензия в C_1 заканчивалась, процесс размола останавливали. После этого для усреднения свойств перемешивали полученную суспензию в стакане C_2 10–15 мин. Затем отбирали пробу для измерения дисперсности, вязкости и плотности готового продукта. Далее стаканы C_2 и C_1 меняли местами и проводили дополнительные проходы с отбором проб.

Рубашки мельниц были подключены к жидкостному термостату с установленной температурой 3°C и заполненным водно-гликолевым раствором. В процессе каждого эксперимента фиксировались технологические параметры и проводился анализ дисперсного состава, вязкости и плотности полученных суспензий, как наиболее общих характеристических свойств суспензий.

Дисперсный состав исследуемых суспензий измеряли на лазерном анализаторе частиц Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Великобритания). Для измерения образец суспензии в количестве 1 г добавляли к 30 г дистиллированной воды и перемешивали 2 мин стеклянной палочкой с резиновым наконечником. После этого полученную суспензию помещали в измерительную ячейку и измеряли размер частиц. Для оценки дисперсного состава измельчаемых материалов были выбраны следующие характеристики [15]:

- процент частиц размером менее 5 мкм, a_5 ;
 - средневзвешенный объемный диаметр частиц, $d(4,3)^3$.
- Плотность исходных суспензий измеряли навесным методом с помощью пикнометра по ГОСТ 31992.1⁴. Кажущуюся динамическую

вязкость суспензий η измеряли на вискозиметре Брукфильда (AMETEK Brookfield, США) в соответствии с ГОСТ 25271-93⁵ при трех разных скоростях вращения шпинделя, n : 20, 60 и 100 об/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных данных на рис. 2 и рис. 3 видно, что после одного прохода пик распределения для суспензий мела и каолина смещается влево — в область более низких значений размеров частиц. При этом распределение частиц становится более мономодальным.

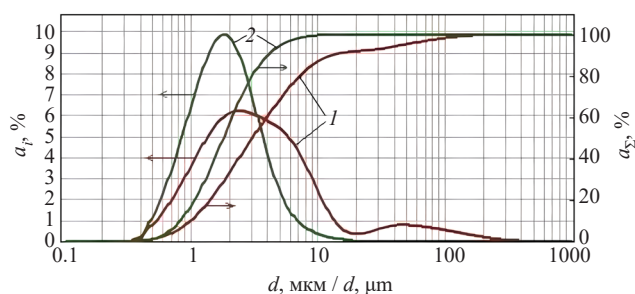


Рис. 2. Дифференциальные a_i и интегральные a_Σ функции распределения частиц суспензии мела в воде по размерам при различном количестве проходов: (1) исходная суспензия; (2) один проход

Fig. 2. Differential a_i and integral a_Σ size distribution functions of the chalk suspension particles in water for different number of passes: (1) initial suspension; (2) one pass

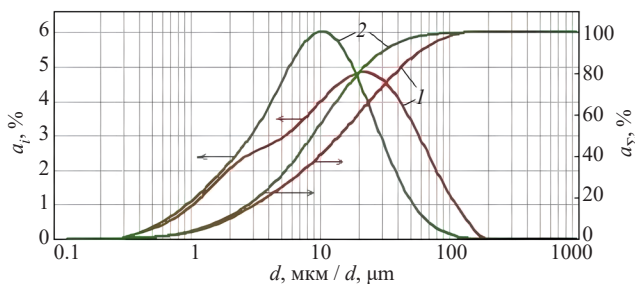


Рис. 3. Дифференциальные a_i и интегральные a_Σ функции распределения частиц суспензии каолина в воде по размерам при различном количестве проходов: (1) исходная суспензия; (2) один проход

Fig. 3. Differential a_i and integral a_Σ size distribution functions of the kaolin suspension particles in water for different number of passes: (1) initial suspension; (2) one pass

³ $d(4,3)$ — средний диаметр Де Брукера или Хардена — средневзвешенный на массу или объем (средний диаметр сферы эквивалентного объема), является центром масс для функций плотности распределения в единицах объема/массы.

⁴ ГОСТ 31992.1. Межгосударственный стандарт. Материалы лакокрасочные. Метод определения плотности. Часть 1. Пикнометрический метод. М.: Стандартинформ; 2013. [GOST 31992.1. Interstate Standard. Paint and varnish materials. Method for determining density. Part 1. Pycnometric method. Moscow: Standartinform; 2013.]

⁵ ГОСТ 25271-93. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 1993. [GOST 25271-93. Interstate Standard. Plastics. Resins are liquid, emulsions or dispersions. Determination of apparent viscosity according to Brookfield. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; 1993.]

Значение $d(4,3)$ для суспензий мела за один проход изменилось с 9.76 до 2.25 мкм, для каолина — с 23.55 до 17.09 мкм. Изменение вязкости полученных суспензий, связанное с уменьшением размеров частиц твердой фазы видно на графиках, приведенных на рис. 4. Из зависимостей видно, что кажущаяся динамическая вязкость при низких скоростях вращения шпинделя вискозиметра после одного прохода увеличивается примерно в 200 раз для суспензий мела и практически в 4 раза для суспензий каолина. Стоит отметить, что вязкость готовых суспензий зависит не только от размера частиц, но и от физико-химических свойств дисперсной фазы и дисперсионной среды. Основное вещество в каолиновых

суспензиях — каолинит — способно набухать в воде, образуя непрочные структуры. Поэтому данные дисперсные системы имеют более высокую вязкость, чем более нагруженные меловые суспензии, даже несмотря на более высокий показатель $d(4,3)$. При увеличении скорости вращения шпинделя вискозиметра увеличивается скорость сдвига в испытуемом образце. Таким образом, из приведенных на рис. 4 зависимостей можно утверждать, что все рассматриваемые суспензии являются псевдопластичными жидкостями.

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что плотность суспензий мела и каолина после помола увеличивается и близка к плотности, рассчитанной по формуле аддитивности удельных объемов твердой

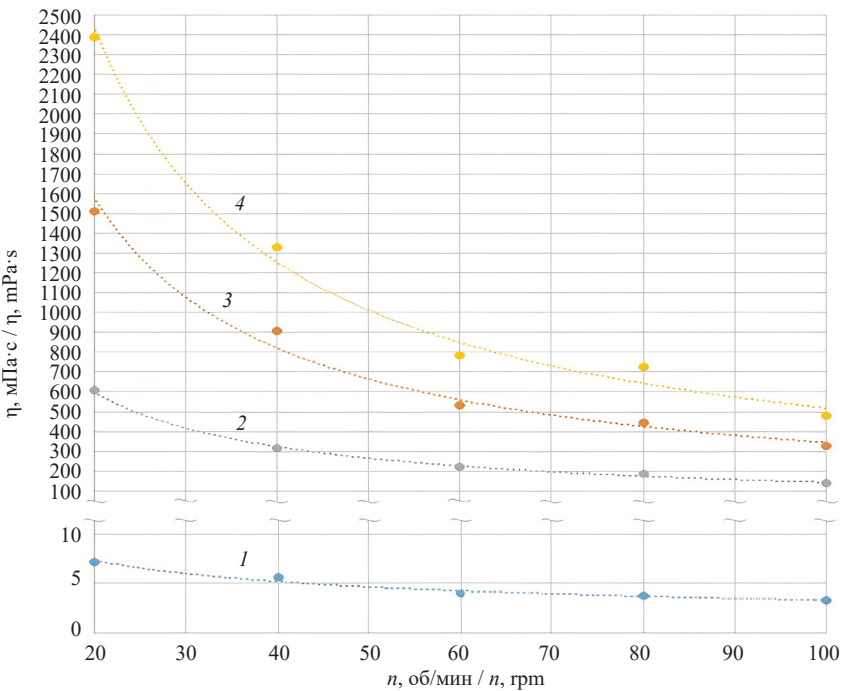


Рис. 4. Зависимость кажущейся динамической вязкости суспензий от частоты вращения шпинделя вискозиметра (мельница LabStar): (1) исходная суспензия мела; (2) исходная суспензия каолина; (3) суспензия мела после одного прохода; (4) суспензия каолина после одного прохода

Fig. 4. Dependence of the relative viscosity of suspensions on the frequency of rotation of the viscometer spindle (LabStar mill): (1) the initial suspension of chalk; (2) the initial suspension of kaolin; (3) the suspension of chalk after one pass; (4) the suspension of kaolin after one pass

Таблица 1. Плотность изучаемых суспензий в зависимости от степени помола

Table 1. Density of the studied suspensions depending on the degree of grinding

Суспензия Suspension	Плотность суспензии после смешения компонентов, кг/м³ Density of suspension after grinding, kg/m³	Плотность суспензии после одной операции измельчения (прохода), кг/м³ Density of suspension after one pass grinding, kg/m³	Расчетная плотность суспензии, кг/м³ Calculated density of suspension, kg/m³
40% мела в воде 40% chalk in water	1316	1333	1341
25% каолина в воде 25% kaolin in water	1162	1180	1182

и жидкой фазы. По всей видимости это связано с тем, что в процессе размла происходит высвобождение воздуха, который содержался в агрегатах и агломератах частиц твердой фазы.

При изучении многопроходного режима измельчения на примере суспензий мела было обнаружено, что при увеличении числа проходов пик распределения смещается влево, и суспензия становится монодисперсной (рис. 5). После проведения трех проходов значение средневзвешенного объемного диаметра $d(4,3)$ изменилось с 9.76 до 1.77 мкм. Из зависимостей, приведенных на рис. 6, видно, что с увеличением количества проходов вязкость получаемых суспензий возрастает. За три цикла размла показатель вязкости при частоте вращения шпинделя вискозиметра 20 об/мин увеличился приблизительно в 500 раз.

При изучении дисперсного состава исходных и полученных суспензий нами также использовался оптический микроскоп (*Olympus*, Япония). На рис. 7 в качестве примера приведены изображения проб таких суспензий. В частности, на фото исходных суспензий (рис. 7а) видны довольно крупные кристаллические частицы твердой фазы. После трех операций измельчения все частицы дисперсной фазы имеют меньший и более равномерный размер (рис. 7б).

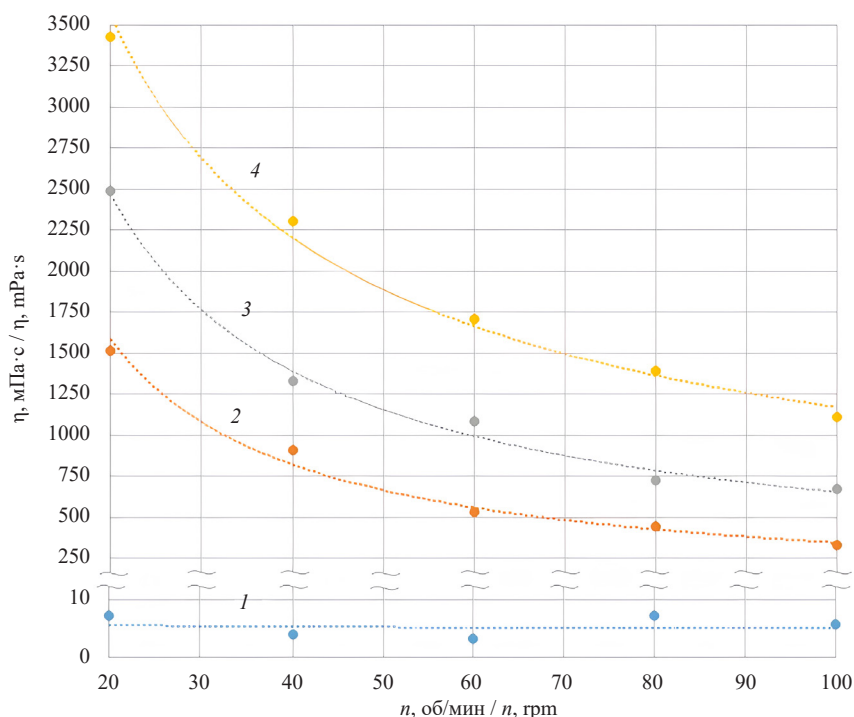


Рис. 6. Зависимость кажущейся динамической вязкости меловых суспензий от скорости вращения шпинделя вискозиметра: (1) исходная суспензия; (2) один проход; (3) два прохода; (4) три прохода

Fig. 6. Dependence of the relative viscosity of chalk suspensions on the speed of rotation of the viscometer spindle: (1) initial suspension; (2) one pass; (3) two passes; (4) three passes

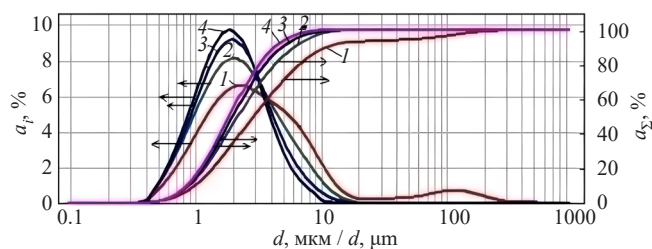


Рис. 5. Распределение частиц суспензии мела в воде при различном количестве проходов (мельница LabStar): (1) исходная суспензия; (2) один проход; (3) два прохода; (4) три прохода

Fig. 5. Particle size distribution of chalk suspension particles in water with different number of passes (LabStar mill): (1) initial suspension; (2) one pass; (3) two passes; (4) three passes

Проведенные исследования показали, что при одинаковом количестве проходов частицы размером менее 5 мкм для суспензии мела в условиях эксперимента размалываются лучше на мельнице LabStar, чем на мельнице MultiLab (рис. 8). За три прохода параметр a_5 для MultiLab изменился от 68 до 94.1%, а для LabStar от 68 до 99.9%. Средневзвешенный объемный диаметр $d(4,3)$ за 3 прохода для MultiLab изменился от 9.76 до 2.27 мкм, а для LabStar от 9.76 до 1.77 мкм.

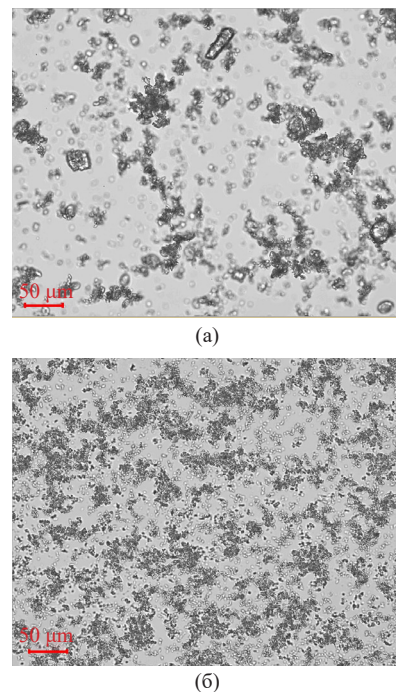


Рис. 7. Изображение исходной суспензии мела (а) и суспензии после трех проходов (б) (оптический микроскоп)

Fig. 7. Image of the initial suspension of chalk (a) and the suspension after three passes (b) (optical microscope)

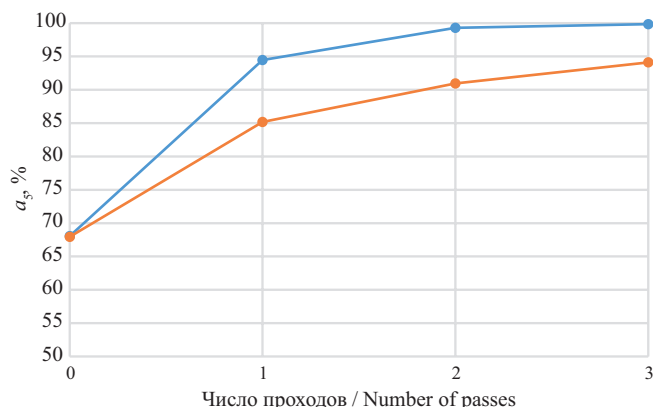


Рис. 8. Зависимость параметра a_5 для суспензии мела от числа проходов: (1) мельница MultiLab; (2) мельница LabStar

Fig. 8. Dependence of parameter a_5 for chalk suspension on the number of passes: (1) MultiLab mill; (2) LabStar mill

Как отмечается в работе [3], среднее время пребывания частиц суспензии $\bar{\tau}$ в бисерных мельницах можно рассчитать по формуле (1):

$$\bar{\tau} = \frac{V_{\text{св}} - V_6}{V}, \quad (1)$$

где $V_{\text{св}}$ — свободный объем размольной камеры без бисера, м³; V_6 — суммарный объем частиц бисера, м³; V — объемный расход суспензии, м³/с.

Расчет по формуле (1) показал, что среднее время пребывания $\bar{\tau}$ для мельницы LabStar составляет 98 с, а для MultiLab 87 с. Таким образом, частицы твердой фазы в размольной камере мельницы LabStar будут обрабатываться на несколько секунд дольше.

В работе [5] для оценки затрачиваемой удельной энергии E_m на процесс измельчения в бисерных мельницах было предложено ввести два параметра: SN (number of stress events) — число актов измельчения; SI (stress intensity) — интенсивность столкновения (формулы (2) и (3)):

$$SN \propto \frac{\phi_6(1-\varepsilon)}{(1-\phi_6(1-\varepsilon))x_V} \cdot \frac{\omega\tau}{d_6^2}, \quad (2)$$

где ω — частота вращения ротора мельницы, об/с; τ — время работы мельницы, с; ϕ_6 — объемная доля бисера в размольной камере, ε — порозность бисера; d_6 — диаметр бисера, м; x_V — объемная доля твердой фазы в суспензии.

$$SI \propto d_6^3 \rho_6 v_d^2, \quad (3)$$

где d_6 — диаметр бисера, м; ρ_6 — плотность бисера, кг/м³; v_d — максимальная линейная скорость ротора мельницы, м/с.

При расчете параметров SN с использованием зависимости (2) было обнаружено, что число

актов измельчения для мельницы LabStar примерно в 3.6 раза выше, чем для мельницы MultiLab (табл. 2). При расчете же параметров SI с применением зависимости (3) было установлено, что интенсивность столкновения бисера в мельнице MultiLab примерно в 5.6 раз выше, чем в мельнице LabStar (табл. 2), хотя окружные скорости вращения роторов мельниц v довольно близки: для MultiLab v составила 10.00 м/с, а для LabStar 9.73 м/с.

Для оценки затрачиваемой удельной энергии E_m можно также использовать следующее выражение [5] (формула (4)):

$$E_m \propto SI \cdot SN, \quad (4)$$

Расчеты с использованием зависимости (4) показали, что удельная энергия, затраченная на процесс измельчения в мельнице MultiLab, приблизительно в 1.5 раза выше, чем в мельнице LabStar (табл. 2).

Таблица 2. Результаты анализа экспериментальных данных

Table 2. Results of the analysis of experimental data

Бисерная мельница Agitator bead mill	$\bar{\tau}$, с $\bar{\tau}$, s	SN	SI	$SI \cdot SN$
LabStar (Netzsch)	98	$3.41 \cdot 10^{10}$	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$5.32 \cdot 10^6$
MultiLab (WAB)	87	$0.947 \cdot 10^{10}$	$8.74 \cdot 10^{-4}$	$8.28 \cdot 10^6$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена зависимость основных физико-химических свойств водных суспензий мела и каолина от параметров их размол в бисерных мельницах. Установлено, что вид дифференциальных и интегральных кривых после процесса измельчения изменяется одинаково для различных суспензий — средневзвешенный объемный диаметр и дисперсия размеров частиц уменьшаются. Было также установлено, что вязкость суспензий после измельчения увеличивается, независимо от природы дисперсионной фазы и ее способности образовывать ассоциаты. Плотность изучаемых суспензий в процессе приготовления имеет тенденцию к увеличению и приближается к расчетной по правилу аддитивности. Показано, что на изменение основных параметров суспензий после их измельчения могут влиять свойства и степень заполнения бисера, а также время пребывания суспензии в размольной камере. В ходе численной оценки затрачиваемой энергии было установлено, что в условиях эксперимента размол на мельнице LabStar оказался более энергоэффективным, чем на мельнице MultiLab.

Благодарности

Работа выполнена с использованием сырья и оборудования департамента разработки препаративных форм пестицидов компании АО «Фирма Август». Авторы выражают благодарность руководству компании за поддержку научной и исследовательской деятельности в области технологий жидкого измельчения.

Acknowledgments

The work was carried out using raw materials and equipment of the R&D department of *Firma August*. The authors thank the company's management for supporting scientific and research activities in the field of wet grinding technologies.

Вклад авторов

Л.С. Елиневская — постановка задачи, планирование экспериментов, анализ и обсуждение результатов, редактирование текста статьи.

Д.В. Дзарданов — разработка методики проведения экспериментов, участие в проведении опытных работ, обсуждение полученных результатов.

О.В. Улыбина — участие в проведении экспериментов, обработка полученных данных, участие в редактировании текста статьи.

Р.Н. Иванов — поиск научных публикаций по теме статьи, формирование списка литературы, постановка и проведение экспериментов, обработка полученных данных, написание и оформление текста статьи.

Authors' contributions

L.S. Elinevskaya — research idea, planning experiments, analyzing and discussing the results, and editing the text of the article.

D.V. Dzardanov — development of a methodology for conducting an experiment, participation in experimental work, and discussion of the results.

O.V. Ulybina — participation in experiments, processing of the obtained data, and participation in editing the text of the article.

R.N. Ivanov — search for scientific publications on the topic of the article, formation of a list of references, setting up and conducting experiments, processing the data obtained, and writing and formatting the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Stehr N. *Zerkleinerung und Materialtransport in einer Rührwerkskugelmühle*. Dissertation. Braunschweig: Techn. Univ.; 1982. 199 p.
2. Островский Г.М. *Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий*. СПб.: АНО НПО «Профессионал»; 2004. Ч.1. 848 с. [Ostrovskii G.M. *Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii* (New Handbook of Chemist and Technologist. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies). St. Petersburg: Professional; 2004. Part 1. 848 p. (in Russ.).]
3. Schwedes J., Bunge F. Comminution and transport behaviour in agitated ball mills. *Adv. Powder Technol.* 1992;3(1):55–70. [https://doi.org/10.1016/s0921-8831\(08\)60689-5](https://doi.org/10.1016/s0921-8831(08)60689-5)
4. Аксенов А.В., Васильев А.А., Швеиц А.А., Охотин В.Н. Применение ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2014;2:20–25. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25> [Aksonov A.V., Vasiliev A.A., Okhotin V.N., Shvets A.A. Application of ultrafine grinding for mineral raw materials processing. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;2:20–25 (in Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25>]
5. Kwade A., Schwedes J. Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills. *Powder Technol.* 2002;122(2–3):109–121. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(01\)00406-5](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(01)00406-5)
6. Blecher L., Kwade A., Schwedes J. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1: Energy density distribution and motion of single grinding beads. *Powder Technol.* 1996;86(1):59–68. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03038-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03038-7)
7. Kwade A. Determination of the most important grinding mechanism in stirred media mills by calculating stress intensity and stress number. *Powder Technol.* 1999;105(1–3):382–388. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(99\)00162-x](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(99)00162-x)
8. Weit H., Schwedes J. Scale-up of power consumption in agitated ball mills. *Chem. Eng. Technol.* 1987;10(1):398–404. <https://doi.org/10.1002/ceat.270100149>
9. Austin L.G. Understanding Ball Mill Sizing. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1973;12(2):121–129. <https://doi.org/10.1021/i260046a001>
10. Kwade A., Schwedes J. Chapter 6. Wet Grinding in Stirred Media Mills. *Handbook of Powder Technology*. 2007;12:251–382. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12009-1](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12009-1)
11. Sterling D., Breitung-Faes S., Kwade A. Experimental evaluation of the energy transfer within wet operated stirred media mills. *Powder Technol.* 2023;425:118579. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118579>
12. Böttcher A.-C., Schilde C., Kwade A. Experimental assessment of grinding bead velocity distributions and stressing conditions in stirred media mills. *Adv. Powder Technol.* 2021;32(2):413–423. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.12.022>
13. Nöske M., Müller J., Nowak C., Li K., Xu X., Breitung-Faes S., Kwade A. Multicomponent Comminution within a Stirred Media Mill and Its Application for Processing a Lithium-Ion Battery Slurry. *Processes*. 2022;10(11):2309. <https://doi.org/10.3390/pr10112309>
14. Fragnière G., Naumann A., Schrader M., Kwade A., Schilde C. Grinding Media Motion and Collisions in Different Zones of Stirred Media Mills. *Minerals*. 2021;11(2):185. <https://doi.org/10.3390/min11020185>
15. Rawle A. Basic of principles of particle-size analysis. *Surf. Coatings Int. Part A: Coatings J.* 2003;86(2):58–65.

Об авторах

Елиневская Лариса Степановна, к.х.н., начальник департамента разработки препаративных форм, АО Фирма «Август» (129515, Россия, Москва, ул. Цандера, д. 6). E-mail: l.elinevskaya@avgust.com. Scopus Author ID 56423694700, <https://orcid.org/0009-0001-0859-9017>

Дзарданов Данил Валентинович, начальник отдела разработки твердых и комбинированных препаративных форм, АО Фирма «Август» (129515, Россия, Москва, ул. Цандера, д. 6). E-mail: d.dzardanov@avgust.com. Scopus Author ID 36962497300, SPIN-код РИНЦ 3795-1236, <https://orcid.org/0000-0002-7122-6731>

Улыбина Ольга Вячеславовна, начальник отдела разработки жидких препаративных форм, АО Фирма «Август» (129515, Россия, Москва, ул. Цандера, д. 6). E-mail: o.ulybina@avgust.com. Scopus Author ID 36847255500, <https://orcid.org/0000-0002-1529-5855>

Иванов Роман Николаевич, старший научный сотрудник, отдел разработки твердых и комбинированных препаративных форм, АО Фирма «Август» (129515, Россия, Москва, ул. Цандера, д. 6). E-mail: r.ivanov@avgust.com. ResearcherID HKF-3424-2023, SPIN-код РИНЦ 1923-5088, <https://orcid.org/0000-0002-1664-0980>

About the authors

Larisa S. Elinevskaya, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Department for the Development of Preparative Forms, Firma August (6, Tsandera ul., Moscow, 129515, Russia). E-mail: l.elinevskaya@avgust.com. Scopus Author ID 56423694700, <https://orcid.org/0009-0001-0859-9017>

Danil V. Dzardanov, Head of the Department for the Development of Solid and Combined Preparative Forms, Firma August (6, Tsandera ul., Moscow, 129515, Russia). E-mail: d.dzardanov@avgust.com. Scopus Author ID 36962497300, RSCI SPIN-code 3795-1236, <https://orcid.org/0000-0002-7122-6731>

Olga V. Ulybina, Head of the Department for the Development of Liquid Preparative Forms, Firma August (6, Tsandera ul., Moscow, 129515, Russia). E-mail: o.ulybina@avgust.com. Scopus Author ID 36847255500, <https://orcid.org/0000-0002-1529-5855>

Roman N. Ivanov, Senior Researcher, Department for the Development of Solid and Combined Preparative Forms, Firma August (6, Tsandera ul., Moscow, 129515, Russia). E-mail: r.ivanov@avgust.com. ResearcherID HKF-3424-2023, RSCI SPIN-code 1923-5088, <https://orcid.org/0000-0002-1664-0980>