

УДК 621.926

**КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
МЕЛОВЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИТОВ МОКРЫМ СПОСОБОМ**

*канд. техн. наук В.И. КОЗЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. О.А. ПЕТРОВ,
канд. техн. наук Д.Н. БОРОВСКИЙ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

Проведен анализ существующих способов получения тонкодисперсного мела. Показано, что наиболее экономичным является механическое измельчение карбоната кальция. В работе исследуется процесс диспергирования мела в вертикальных бисерных мельницах с дополнительными физическими эффектами – гидродинамической кавитацией и ультразвуком. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению при различных сочетаниях физических эффектов. Получены и представлены в виде уравнений эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования.

Ключевые слова: бисерная мельница, диспергирование, мел, мешалка, гидродинамическая кавитация, ультразвук, эффективность, суспензия, фракционный состав.

Введение. Очевидно, в качестве материалов будущего выделяются композиционные или композитные материалы (композиты), состоящие из основы (матрицы или матриц) и наполнителей. Варьируя состав, удастся получать материалы и изделия на их основе, на порядок превышающие традиционные по физико-механическим свойствам.

В составе композитов, в зависимости от их назначения, используются наполнители с различными характеристиками, химическим составом и происхождением: как искусственные, так и природные, органические и минеральные, вводимые для придания изделиям и конструкциям определенных эксплуатационных свойств в совокупности с экономической выгодой и экологической безопасностью.

Ключевым требованием к наполнителям является их тонкодисперсность, приводящая к появлению новых композиционных материалов с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов, с требуемым набором полезных свойств.

Одним из самых распространенных минералов на Земле является карбонат кальция (кальцит), который после соответствующей обработки широко используется в качестве наполнителя в виде тонкодисперсного мела с размером частиц от 1 до 10 мкм. Мел применяется для производства строительных материалов, стекла, лакокрасочных изделий, клеев, пластмасс, резин, бумаги, косметики, медпрепаратов, бытовой химии, используется в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Основными мировыми производителями тонкодисперсного мела являются США, Китай, Франция, Испания, Англия, Бельгия и Россия. Добыча мела и мергеля активно ведется и в Беларуси на площадях их неглубокого залегания, главным образом, в Кричевском, Климовичском, Костюковичском и Чериковском районах Могилевской области; в Гродненском и Волковысском районах разведан целый ряд месторождений. Суммарные запасы этого полезного ископаемого в нашей стране оцениваются примерно в 270 млн т [1].

Основная часть. В основном тонкодисперсный мел производится двумя способами: конденсационным (химическое осаждение карбоната кальция) и путем измельчения крупных кусков пород и осадочных отложений до частиц нужных размеров (природный или натуральный карбонат кальция) [2].

Конденсационный способ позволяет получать тонкодисперсный мел с наименьшим размером частиц, однако он имеет небольшую производительность, поэтому в промышленности нашел применение более простой и экономичный способ – механическое измельчение, которое подразделяется на сухое, полусухое и мокрое.

Мокрый способ измельчения хоть и является более энергозатратным, чем сухой и полусухой, однако он позволяет получать частицы мела меньшего размера, которые имеют гладкую и круглую форму, что способствует уменьшению износа оборудования.

Основными стадиями мокрого способа получения тонкодисперсного мела являются дробление сырья, магнитное сепарирование, мокрое размучивание, тонкое измельчение в диспергаторе, сбор суспензии с введением диспергатора, обогащение в гидроциклонах, вторичное тонкое измельчение, контрольный отсев, сушка в распылительной сушилке [2].

В качестве диспергирующего оборудования раньше в основном использовали струйные дезинтеграторы, однако сейчас предпочтение отдается вертикальным бисерным мельницам. Они хоть и обладают меньшей производительностью, но сразу позволяют получать продукт нужного размера и избегать вторичного тонкого измельчения [2].

Бисерная мельница представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, внутри которого располагается мешалка с дисками. В качестве измельчающих тел используют керамический бисер с размером частиц 0,5–3,0 мм, который заполняет рабочее пространство на 85–90%. При вращении происходит перемещение бисера и измельчение подаваемой суспензии.

В бисерных мельницах материал разрушается в основном за счет истирания с добавлением поверхностно-активных веществ для предотвращения агломерации.

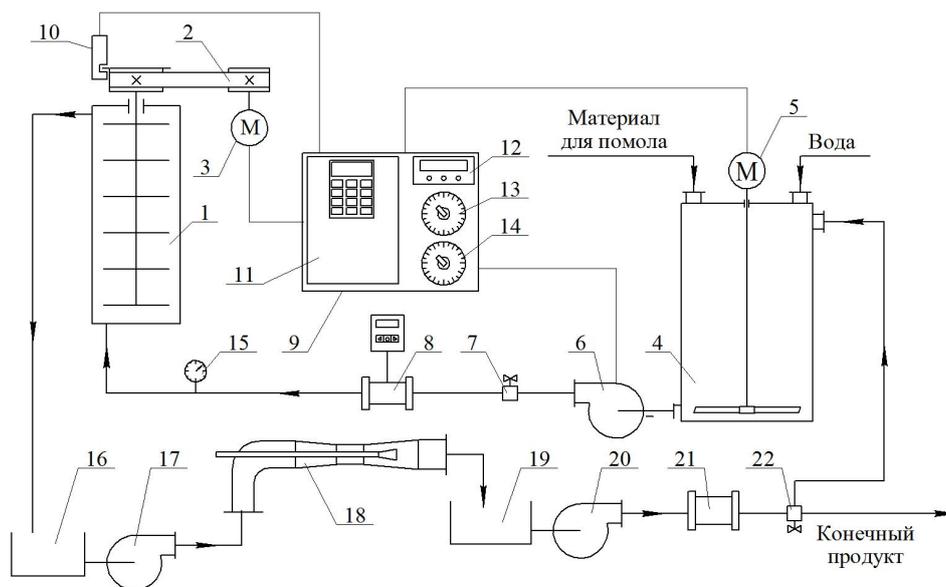
Основная цель при диспергировании мела – получить частицы материала как можно меньшего граничного размера. Проведенные нами исследования показали, что основными факторами, влияющими на это, являются скорость подачи суспензии, размер мелющих тел и частота вращения мешалки. Однако увеличение частоты вращения приводит к более интенсивному износу дисков и подшипников. Снижение подачи суспензии понижает производительность, а уменьшение размера мелющих тел ведет к увеличению затрат мощности на перемешивание [3]. Поэтому в современной практике для уменьшения граничного размера частиц измельченного материала вместе с механическим разрушением применяют физические явления, интенсифицирующие процесс. При гидродинамической обработке к таким явлениям в первую очередь можно отнести кавитацию и ультразвук [4].

Анализ диспергационных методов и предъявляемых к ним требований позволил сконструировать и изготовить лабораторные установки (рисунок 1), которые в совокупности позволяют изучить комплексное воздействие на измельчаемый материал. Основным агрегатом является вертикальная бисерная мельница (ВБМ) 1, а вспомогательными – статический кавитатор (СК) 18 и ультразвуковой диспергатор (УД) 21.

В качестве измельчаемого материала использовался мел с размером частиц 200–500 мкм, который смешивался с водой для получения суспензии в объемном соотношении 1 : 2.

Частота вращения мешалки ВБМ составляла 1050 об/мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам дисков 10 м/с. Подача исходного продукта, обеспечивающая изменение скорости суспензии на полное сечение мельницы, составляла 0,097 м/с. В качестве измельчающих тел применялись чугунные шарики диаметром 0,5 мм, которыми заполняли рабочую камеру на 90–95% [5].

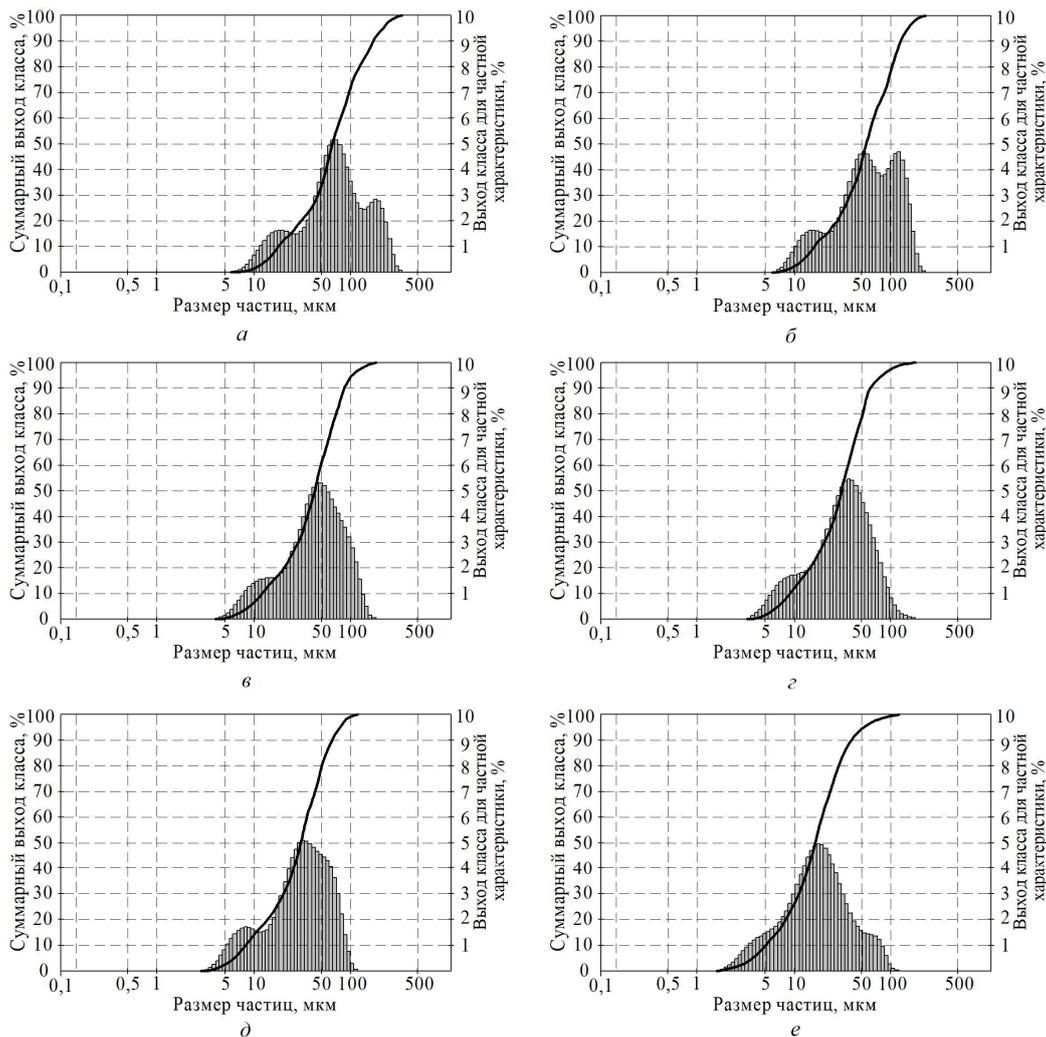
Для оптимальной работы СК скорость суспензии в горловине трубы Вентури составляла около 10 м/с [6], а УД работал с частотой 22 кГц.



1 – вертикальная бисерная мельница; 2 – ременная передача; 3, 5 – электродвигатель; 4 – емкость с мешалкой для приготовления суспензии; 6 – насос для подачи суспензии в мельницу; 7, 22 – кран; 8 – электромагнитный расходомер; 9 – пульт управления; 10 – считывающая головка тахометра; 11 – частотный преобразователь; 12 – тахометр; 13, 14 – автотрансформаторы; 15 – манометр; 16 – промежуточная емкость струйного кавитатора; 17 – насос струйного кавитатора; 18 – струйный кавитатор; 19 – промежуточная емкость ультразвукового диспергатора; 20 – насос ультразвукового диспергатора; 21 – ультразвуковой диспергатор

Рисунок 1. – Схема лабораторной установки

На начальных этапах исследований основной целью было получение данных об изменении размера частиц материала в зависимости от количества проходов суспензии через каждый агрегат в отдельности. В результате были получены характеристики крупности распределения размеров частиц. В качестве примера на рисунке 2 приведены такие характеристики для СК. Их анализ показал, что в пробах наблюдается полидисперсный продукт с несколькими преобладающими диапазонами частиц, которые с увеличением числа проходов смещаются влево, т.е. происходит доизмельчение крупной фракции. За шесть проходов через ВБМ максимальный размер частиц в пробе составлял 4 мкм, через СК – 100 мкм, а через УД – 40 мкм. Также стоит отметить, что в основном процесс измельчения происходил за первые 2–3 прохода, далее максимальный размер менялся незначительно, но происходило доизмельчение крупной фракции [7].

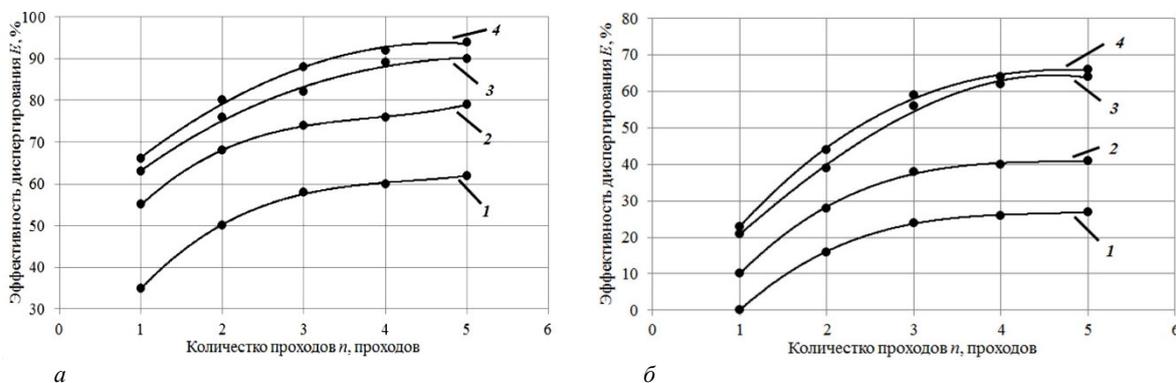


a – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *е* – 6

Рисунок 2. – Характеристики крупности распределения размеров частиц мела в зависимости от количества проходов через СК

Как и в предыдущей работе [8] за критерий эффективности E была принята доля конечного продукта меньше заданного граничного размера, в данном случае 0,1 и 1 мкм, что соответствует сверхтонкому помолу.

Далее были проведены экспериментальные исследования на комплексе лабораторных установок. Результаты представлены на рисунке 3 в виде функциональных зависимостей $E=f(x_i)$, где x_i – граничный размер.



a – граничный размер 1 мкм; *б* – граничный размер 0,1 мкм;
1 – ВБМ; 2 – ВБМ и СК; 3 – ВБМ и УД; 4 – ВБМ, СК и УД

Рисунок 3. – Зависимость эффективности диспергирования от количества проходов материала

По экспериментальным зависимостям видно, что в случае использования ВБМ за первые три прохода показатель эффективности диспергирования резко возрастает: на 55–75% для граничного размера 1 мкм и на 25–40% – для 0,1 мкм. Дальнейшее увеличение числа проходов с 3 до 5 приводит к незначительному повышению эффективности на 5%.

Дополнительное воздействие кавитации привело к увеличению эффективности на 15–20% для граничного размера 1 мкм и на 10–20% – для 0,1 мкм. Также следует отметить, что даже за первый проход в измельченном продукте наблюдается фракция менее 0,1 мкм в количестве 10%, а оптимальное количество проходов составляет три.

Что касается воздействия ультразвука, то он способствовал увеличению эффективности на 25–30% для граничного размера 1 мкм и на 20–35% – для 0,1 мкм. За первый проход получена фракция менее 0,1 мкм в размере 20%. Кроме того, по сравнению с гидродинамической кавитацией, ультразвук позволил повысить эффективность на 10–15%, а эффективность диспергирования в этом случае возрастает на протяжении первых 4-х проходов (циклов).

При совместном использовании ВБМ, СК и УД эффективность диспергирования возросла, однако ее значения оказались всего на 3–5% выше, чем при применении ВБМ и УД.

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

1) для граничного размера 1 мкм

$$\begin{cases} E = 0,5833n^3 - 7,5357n^2 + 33,881n + 8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ}, \\ E = 0,6667n^3 - 7,7143n^2 + 31,619n + 30,4, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и СК}, \\ E = 0,0833n^3 - 2,3929n^2 + 18,524n + 47, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и УД}, \\ E = -2n^2 + 18,8n + 49,6, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ, СК и УД}; \end{cases} \quad (1)$$

2) для граничного размера 0,1 мкм

$$\begin{cases} E = 0,5833n^3 - 7,8214n^2 + 35,595n - 28,4, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ}, \\ E = 0,2917n^4 - 2,9167n^3 + 6,2083n^2 + 15,417n - 9, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и СК}, \\ E = -3,0714n^2 + 29,329n - 5,8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и УД}, \\ E = 0,25n^3 - 5,6786n^2 + 37,071n - 8,8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ, СК и УД}, \end{cases} \quad (2)$$

где n – количество проходов.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных по уравнениям (1) и (2) значений эффективности измельчения не превышает 2,0%.

Заключение. В результате экспериментальных исследований было установлено, что использование импульсного механического воздействия на измельчаемый материал в вертикальной бисерной мельнице совместно с гидродинамической кавитацией и ультразвуком, которые были реализованы с помощью статического кавитатора и ультразвукового диспергатора, включенных в единый циркуляционный контур, позволило значительно повысить эффективность диспергирования меловой суспензии. Так, количество частиц с размером менее 0,1 мкм увеличилось на 20–35%. Причем, использование ультразвукового диспергатора привело к возрастанию эффективности на 10–20%, а применение простейшего статического кавитатора дало прирост около 5–10%.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в направлении оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик рассматриваемого оборудования, его численного моделирования, а также расширить область применения таких комплексных гидродинамических установок в различных технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор рынка карбоната кальция природного тонкодисперсного // ИнфоМайн. – 2016. – Изд. 3. – 176 с.
2. Козловский, В.И. Использование шаровых мельниц с мешалками для сверхтонкой микронизации в производстве тонкодисперсного мела / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 февр. 2013 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2013. – С. 47–50.
3. Козловский, В.И. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5–6. – С. 14–17.
4. Козловский, В.И. Дисперсионные методы получения тонкодисперсных материалов / В.И. Козловский, О.А. Петров – Химическая технология и техника : материалы 83-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 4–14 февраля 2019 г. / отв. за издание И.В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2019. – 56 с.

5. Козловский, В.И. Применение шаровой мельницы с мешалкой для тонкого диспергирования материалов / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Химическая технология и техника : тезисы 78-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 3–10 февр. 2014 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – С. 51.
6. Петров, О.А. Исследование и моделирование гидродинамических кавитаторов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 12 – С. 52–56.
7. Козловский, В.И. Изучение влияния ультразвука и кавитации в комплексе с бисерной мельницей на диспергируемый материал / В.И. Козловский, О.А. Петров, Я.А. Потоцкий – Химическая технология и техника : материалы 84-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. / отв. за издание И.В. Войтов ; УО БГТУ. – Минск : БГТУ, 2020. – С. 159–161.
8. Козловский, В.И. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович, Т.В. Камлюк // Труды БГТУ. – 2016. – № 3 : Химия и технология неорганических веществ. – С. 136–141.

Поступила 28.08.2020

COMPLEX TECHNOLOGY OF DISPERSING CHALK FILLERS OF COMPOSITES WET METHOD

V. KOZLOUSKIY, O. PETROV, D. BOROVSKIY

The analysis of methods of obtaining finely dispersed chalk in the world is carried out. It has been shown that the most economical is the mechanical grinding of calcium carbonate. The paper investigates the process of chalk dispersion in vertical bead mills with additional physical effects - hydrodynamic cavitation and ultrasound. The results of experimental research on grinding with various combinations of physical effects are presented. Empirical dependencies for calculating the efficiency of dispersion are obtained, which are presented in the form of equations.

Keywords: *Bead mill, dispersion, chalk, stirrer, hydrodynamic cavitation, ultrasound, efficiency, suspension, fractional composition.*