

Распределение частиц по размерам в суспензии для создания ремонтных и реставрационных составов

Д.К.-С. Батаев, Р.С. Джамбулатов, П.Д. Батаева, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Грозный

Аннотация: В статье представлены результаты исследования распределения частиц по размерам (РЧР) в водных суспензиях восьми природных и искусственных минеральных веществ, включая гипс, известняк, мергель, сланец, ангидрит, доломит, бентонит и цемянку. Анализ проводился методом седиментации в диапазоне размеров частиц от субмикронного до сотен микрометров, что позволило выявить существенные различия в распределении в зависимости от минералогического состава. Изучение распределения частиц по размерам показало, что образцы с более узким распределением, такие как ангидрит и бентонит, обладают высокой стабильностью и предсказуемыми кинетическими характеристиками, в то время как полимодальные распределения у мергеля и цемянки свидетельствуют о целесообразности их применения в качестве наполнителя. Полученные данные позволяют прогнозировать их влияние на свойства вяжущих материалов, включая скорость гидратации, плотность упаковки, пуццолановую активность и склонность к агрегации. Результаты могут быть полезны для оптимизации технологических процессов в сфере создания ремонтно-реставрационных составов и вяжущих материалов.

Ключевые слова: распределение частиц, размер, суспензия, вяжущие составы, седиментация, коллоидная устойчивость, ремонтно-реставрационные составы, медиана, ширина распределения.

Исследование распределения частиц по размерам (РЧР) в водных суспензиях является ключевым аспектом при создании ремонтно-реставрационных составов, поскольку существенно влияет на физико-химические свойства суспензий, включая реологические характеристики, реакционную способность, седиментационную и агрегативную устойчивость, эксплуатационные характеристики конечных материалов [1]. Размеры частиц влияют на расход материала и энергии: слишком крупные частицы плохо удерживаются взвеси и оседают, а слишком мелкие — склонны к неконтролируемому уносу или агрегации [2]. Такие данные необходимы как для фундаментального понимания поведения частиц в потоке, так и для практической настройки и оптимизации технологических процессов, являясь

ключевым параметром, влияющим, в конечном итоге, на качество и выход конечного продукта [3].

Несмотря на очевидную важность, систематизированные данные о РЧР для различных типов природных минералов из местного сырья и техногенных продуктов в составе водных суспензий часто фрагментарны или отсутствуют в открытой литературе.

Природный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), известняк (CaCO_3), мергель (смесь карбонатов и глины), сланец (богатый силикатами), ангидрит (CaSO_4), доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) и бентонит (монтмориллонитовая глина), которые традиционно использовались для создания старинных памятников культуры народами Юга России, обладают различным минералогическим составом и текстурной неоднородностью, которые определяют их поведение при дроблении и диспергировании. Например, пластинчатая морфология бентонита резко контрастирует с равноосными кристаллами гипса, что может приводить к различным кривым распределения частиц и иметь последствия при использовании суспензий в промышленных процессах с использованием жидкой фазы [4, 5]. Аномалии в распределении частиц по размерам, такие как избыток мелких фракций или крупнозернистые хвосты могут значительно ухудшить гидравлические свойства, увеличивать энергозатраты при измельчении или усиливать пылеобразование в последующих операциях [6,7].

Поэтому, настоящее исследование направлено на изучение РЧР в водных суспензиях восьми типов природных и искусственных (цемянка) материалов с использованием метода количественной оценки объемных фракций размеров в диапазоне от субмикронного до миллиметрового масштаба. На основе выявления сходства и различий в профилях распределения, сделана попытка предоставить эмпирические ориентиры для

выбора сырья и проектирования процессов в области создания вяжущих смесей и составов для ремонта и реставрации на основе местного сырья.

Для анализа РЧР исследованных объектов использованы природные вяжущие компоненты (доломит, известняк, мергель, сланец, природный гипс, бентонит, ангидрит) из месторождений Чеченской Республики. Данные объекты имеют различный минералогический состав, сочетание которых позволяет управлять практически важными параметрами материалов – гидравлическая активность, скорость твердения и совместимость с реставрируемыми объектами культурного наследия. Кроме того, выбор этих объектов обусловлен их логистической доступностью, экологичностью и потенциалом использования в качестве ремонтно-реставрационных составов, где требуется химическая инертность по отношению к оригинальным конструкциям и материалам.

В перечень исследуемых материалов входят:

1. Доломит (карбонатная порода, состоящая преимущественно из минерала доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) применяется как наполнитель и вяжущий в составах для фасадов и штукатурок благодаря своей химической стабильности и низкой растворимости в воде. Материал добыт из карьера Галанчожского района ЧР (содержание доломита > 70%).

2. Известняк (осадочная порода, в основном кальцит CaCO_3) служит основой для воздушных известий и используется в смесях для обеспечения паропроницаемости и совместимости с каменными субстратами. Образец взят из месторождений Чири-Юртовского цементного завода, где известняк обладает мелкозернистой структурой, подходящей для измельчения.

3. Мергель (смесь глины и карбонатов, промежуточный между известняком и глиной) является естественным гидравлическим вяжущим, обжигаемым для получения цемента. Материал получен из осадочных отложений месторождений Чири-Юртовского цементного завода.

4. Сланец (метаморфическая порода с преобладанием слюды и кварца) используется как минеральный наполнитель в составах для повышения прочности и устойчивости к эрозии. Образец из сланцевых формаций Галанчожского района ЧР, характеризующихся слоистой текстурой, что облегчает измельчение.

5. Природный гипс (сульфат кальция дигидрат $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) применяется в быстротвердеющих составах для внутренних работ благодаря своей низкой растворимости и высокой белизне. Материал добыт из месторождений Чеченской республики в окрестностях селения Чинаха ЧР.

6. Ангидрит (безводный сульфат кальция CaSO_4) служит вяжущим в составах для влажных сред, обладая более высокой прочностью по сравнению с гипсом. Образец из ангидритовых залежей гипсового месторождения с. Шарой ЧР.

7. Бентонит (глинистый минерал на основе монтмориллонита), используемый как пластификатор и стабилизатор суспензий в строительных смесях. Образец получен из месторождения «Катаяма» в окрестностях города Грозного.

8. Цемянка – порошок на основе толченого жженного кирпича. Исторически, в смеси с другими вяжущими (известь) использовался для повышения прочности и водостойкости строительных растворов: применялся как при строительстве Софийского собора в Киеве в XI веке, так и Петербурга [8].

Все материалы были предварительно измельчены в шаровой мельнице до порошкообразного состояния (фракции в пределах 9-27 мкм) для обеспечения однородности и возможности диспергирования.

Седиментационный анализ проводился по классической методике, основанной на законе Стокса, для определения распределения частиц по размерам в диапазоне 1–50 мкм. Подготовка суспензий осуществлялась в

лабораторных условиях при температуре 20 ± 2 °С с соблюдением всех процедур пробоподготовки в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003, ГОСТ 8736-77 и ОСТ 41-08-249-85.

В качестве экспериментальных данных использовались:

- масса осадка, измеренная через определённые промежутки времени (60, 120, 180, 240 и 300 секунд) на электронных аналитических весах;
- начальная масса суспензии при нулевом времени, принята за исходную точку отсчёта для вычисления массы осевших частиц;
- высота осаждения, составляла 3 см;
- значения истинной плотности объектов исследования;
- физические свойства дисперсионной среды – воды, включая её плотность (1 г/см^3) и динамическую вязкость ($0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при 20 °С).

На основе этих данных сначала рассчитаны диаметры частиц, осевших к каждому моменту времени, с помощью уравнения Стокса получено дифференциальное распределение, показывающее долю каждой фракции.

В настоящем разделе представлены детальные характеристики распределения частиц по размерам (РЧР) в водных суспензиях различных минералов, полученные с использованием закона Стокса.

Суспензии готовились с концентрацией твердого вещества 0,5 мас. % для обеспечения стабильной дисперсии (магнитная мешалка, pH 7–8).

Для каждого графика (Рис. 1–8) описаны ключевые параметры: медианный размер (D_{50}), размеры 10% и 90% кумулятивного распределения (D_{10} и D_{90}), ширина распределения (S) и модальные значения. Эти параметры играют ключевую роль в таких характеристиках материала, как текстура, реакционная способность и взаимодействие с другими веществами. Например, более узкое распределение размеров может указывать на более однородные свойства материала, что важно при его применении в различных технологических процессах. Для суспензий это может иметь значение в

зависимости от их применения. Например, ширина распределения может влиять на свойства текучести суспензии, ее реакционную способность и эффективность в различных процессах, таких как фильтрация, осаждение или химическая обработка. В совокупности эти параметры дают целостное представление о дисперсном состоянии материала.

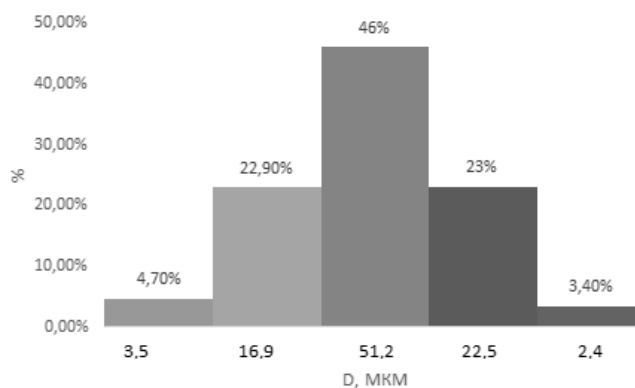


Рис. 1. – Распределение частиц по размерам в суспензии природного гипса

Распределение размеров частиц в суспензии природного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) характеризуется однородным распределением с максимальной концентрацией частиц в диапазоне около 51,2 мкм, что соответствует пиковой доле в 46%. Медианный размер (D_{50}) составляет 51,2 мкм. Размеры кумулятивного распределения, D_{10} и D_{90} , равны соответственно 3,5 мкм и 22,5 мкм. Эти значения показывают диапазон, в котором располагается основная масса частиц. Ширина распределения (S) составляет 19 мкм, что свидетельствует о довольно широком распределении размеров. Модальное значение, совпадает с медианой и также составляет 51,2 мкм. Такое распределение частиц подходит для использования в качестве вяжущего компонента в строительных смесях, поскольку оно поддерживает нормальный уровень гидратации и способствует развитию прочности. Тем не менее, для предотвращения избыточной седиментации и обеспечения агрегативной и кинетической стабильности суспензии может потребоваться использование стабилизаторов и диспергаторов [9].

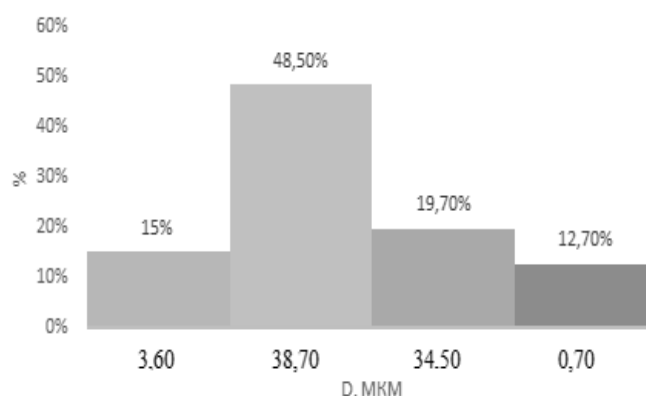


Рис. 2. – Распределение частиц по размерам в суспензии известняка

График распределения частиц суспензии известняка по размерам предоставляет важную информацию о распределении частиц в этом материале. D50 составляет 38,7 мкм, что указывает на то, что 50% частиц имеют размеры меньше этого значения, а оставшиеся 50% – больше. D10 и D90 равны 0,7 мкм и 34,5 мкм соответственно. Распределение частиц в суспензии асимметричное, с одним выраженным пиком в области 38,7 мкм. Это свидетельствует о том, что основная масса частиц сосредоточена в диапазоне средних размеров, с меньшими долями более мелких и крупных частиц. S составляет 33,8 мкм, что свидетельствует о достаточно широком распределении размеров частиц. Модальное значение, соответствует размеру 38,7 мкм.

Учитывая характеристики частиц в данной суспензии, можно ожидать значительное влияние на реологические свойства смеси, где частицы среднего размера (38,7 мкм) могут играть важную роль в механизме взаимодействия частиц и стабильности суспензии. Присутствие мелких частиц (3,6 мкм и 0,7 мкм) также может оказывать влияние на стабилизацию системы и её поведение при добавлении химических добавок.

Такое распределение частиц делает суспензию известняка подходящей для различных промышленных и строительных целей, где требуется стабильность и контролируемое поведение смеси при изменении условий.

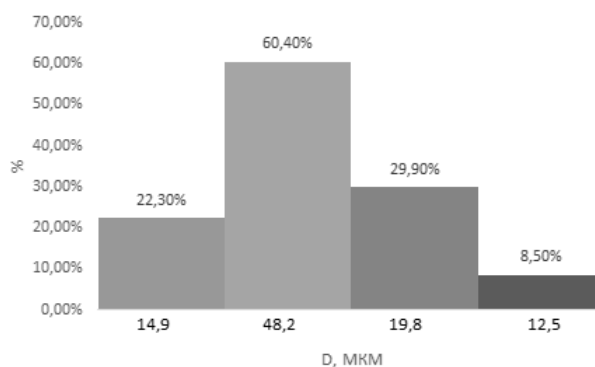


Рис. 3. – Распределение частиц по размерам в суспензии мергеля

График распределения частиц в суспензии мергеля показывает, что D50 составляет 48,2 мкм, в то время как размеры D10 и D90 равны 12,5 мкм и 14,9 мкм соответственно. Ширина распределения S составляет 2,4 мкм, что указывает на относительно узкое распределение. Модальное значение также совпадает с медианным размером, который составляет 48,2 мкм. Это свидетельствует о том, что в суспензии мергеля преобладают частицы среднего размера, с их концентрацией вблизи медианного значения, что придает материалу гомогенную структуру. Узкое распределение частиц и преобладание среднего размера указывают на высокую степень однородности, что делает суспензии мергеля потенциально подходящими для применения в различных технологических процессах, где важна стабильность и контроль размеров частиц.

Распределение частиц в суспензии мергеля можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием частиц среднего размера в области 48,2 мкм, при этом присутствуют вторичные пики в диапазоне 19,8 мкм и меньшие фракции на 14,9 мкм и 12,5 мкм.

Из-за преобладания частиц среднего размера (48,2 мкм) можно ожидать, что суспензия мергеля будет проявлять устойчивость в различных технологических процессах, таких как использование в строительных смесях и других применениях, где важна стабильность и равномерное распределение

частиц. Меньшие фракции (14,9 мкм и 12,5 мкм) могут оказывать влияние на реологию системы и её поведение при добавлении стабилизаторов.

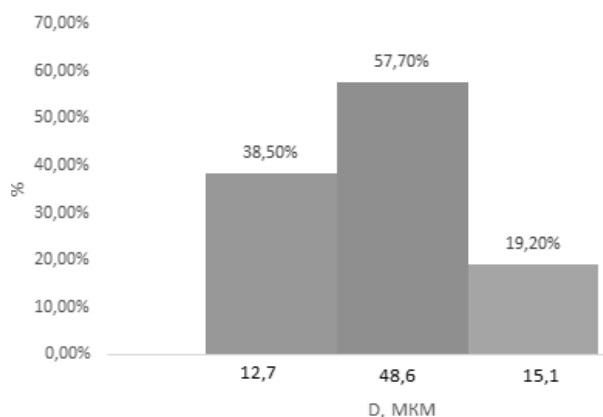


Рис. 4. – Распределение частиц по размерам в суспензии сланца

График распределения частиц в суспензии сланца показывает, что D50 составляет 48,6 мкм. Размеры D10 и D90 равны 12,7 мкм и 15,1 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 2,4 мкм, что указывает на узкое распределение частиц. Модальное значение совпадает с медианным размером 48,6 мкм.

Суспензия сланца обладает довольно однородной структурой, поскольку более 57% частиц сосредоточено вокруг медианного размера. Узкое распределение и преобладание частиц среднего размера подтверждают гомогенность материала, что делает его подходящим для процессов, требующих стабильности и контроля размеров частиц.

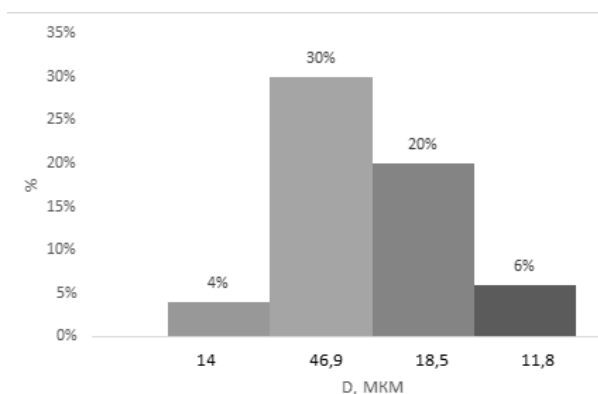


Рис. 5. – Распределение частиц по размерам в суспензии ангидрита

Распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием частицы в диапазоне 48,6 мкм, а также заметным пиком на 12,7 мкм и меньшей долей частиц на 15,1 мкм.

Преобладание частиц среднего размера (48,6 мкм) в суспензии сланца предполагает, что она будет обладать определённой степенью стабильности при применении в различных промышленных процессах. Мелкие частицы (12,7 мкм) могут влиять на реологические свойства системы и её стабильность в зависимости от условий использования.

График распределения частиц в суспензии ангидрита показывает, что медианный размер (D50) составляет 46,9 мкм. Размеры D10 и D90 равны 11,8 мкм и 14 мкм соответственно. S составляет 2, 2 мкм, что свидетельствует о довольно узком распределении частиц. Модальное значение сосредоточено около медианного размера 46,9 мкм.

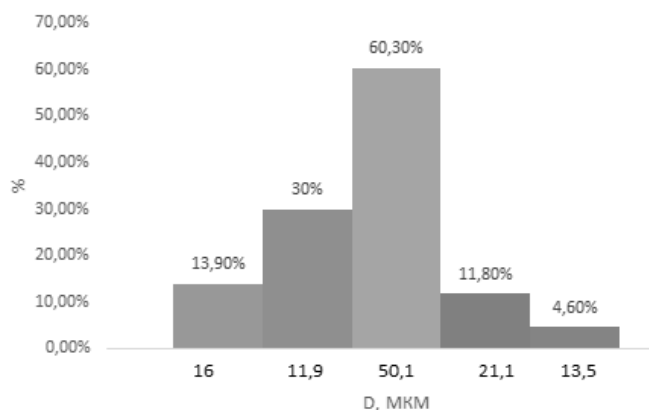


Рис. 6. – Распределение частиц по размерам в суспензии цемянки

Суспензия ангидрита имеет достаточно высокую степень однородности, с преобладанием частиц среднего размера, что составляет около 30% от общего количества частиц. Узкое распределение размеров указывает на стабильную структуру материала, что делает его подходящим для технологических процессов, где необходим контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

Распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием частиц среднего размера (46,9 мкм). Присутствуют также вторичные пики в диапазоне 18,5 мкм и меньшие фракции на 14 мкм и 11,8 мкм.

График распределения частиц в суспензии цемянки показывает, что величина D50 составляет 50,1 мкм. Размеры D10 и D90 равны 11,9 мкм и 16 мкм соответственно. S составляет 4,1 мкм, что указывает на умеренно узкое распределение частиц. Модальное значение сосредоточено вблизи медианного размера 50,1 мкм.

Суспензия цемянки имеет высокую степень однородности, с преобладанием частиц среднего размера, что составляет около 60,3% от общего количества частиц. Ширина распределения и преобладание частиц около медианы указывают на стабильную структуру материала, что делает его подходящим для применения в различных технологических процессах, где требуется контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

Распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием частиц среднего размера (50,1 мкм). Присутствуют также вторичные пики в диапазонах 11,9 мкм и 21,1 мкм, а также небольшие доли частиц на 16 мкм и 13,5 мкм.

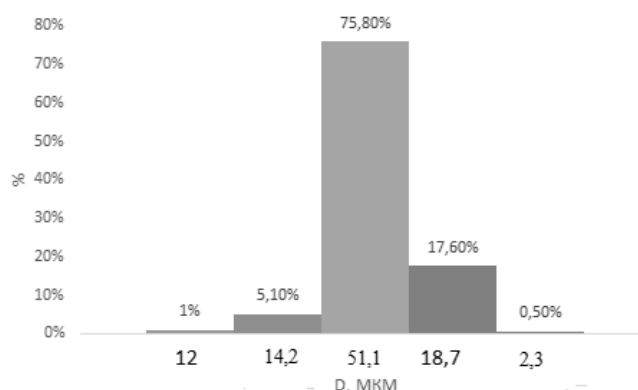


Рис. 7. – Распределение частиц по размерам в суспензии доломита

График распределения частиц в суспензии доломита показывает, что D50 составляет 51,1 мкм. Размеры D10 и D90 равны 2,3 мкм и 12 мкм

соответственно. S составляет 9,7 мкм, что указывает на довольно широкое распределение частиц. Модальное значение сосредоточено около медианного размера 51,1 мкм.

Суспензия доломита имеет преобладание частиц среднего размера, что составляет 75,8% от общего количества частиц. Несмотря на широкое распределение, высокая концентрация частиц около медианного размера говорит о стабильности и однородности материала, что делает его пригодным для использования в различных технологических процессах, где важно поддерживать стабильную структуру и контроль за размерами частиц.

Следовательно, распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием крупных частиц в диапазоне 51,1 мкм, при этом присутствуют меньшие фракции в диапазонах 18,7 мкм, 14,2 мкм и 12 мкм.

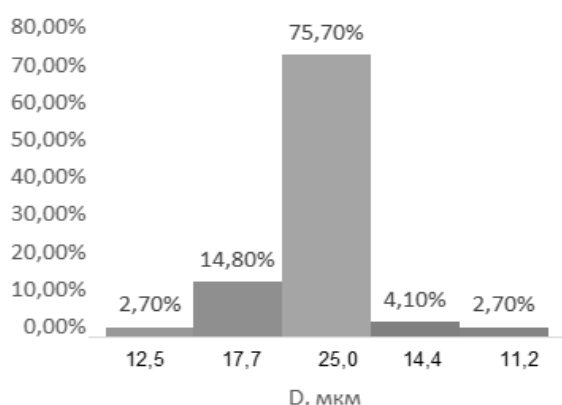


Рис. 8. – Распределение частиц по размерам в суспензии бентонита

График распределения частиц в суспензии бентонита показывает, что D50 составляет 25,0 мкм. Размеры D10 и D90 равны 11,2 мкм и 17,7 мкм соответственно. S составляет 6, 5 мкм, что свидетельствует о достаточно узком распределении частиц. Модальное значение сосредоточено около медианного размера 25,0 мкм.

Суспензия бентонита характеризуется преобладанием частиц среднего размера, что составляет 75,7% от общего количества частиц. Узкое

распределение и высокая концентрация частиц около медианы говорят о стабильной и однородной структуре материала, что делает его подходящим для применения в различных технологических процессах, где важен контроль за размерами частиц и их однородность.

Распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием крупных частиц в диапазоне 25 мкм. Присутствуют также меньшие фракции в диапазонах 17,7 мкм, 14,4 мкм, 12,5 мкм и 11,2 мкм.

Известно, что параметры распределения частиц по размерам в водных суспензиях различных минералов существенно влияют на свойства вяжущих материалов. Материалы с более узким распределением частиц, такие как гипс и ангидрит, обладают высокими кинетическими характеристиками при гидратации, что связано с преобладанием мелких фракций, ускоряющих реакцию. Однако наличие крупных частиц, которые обеспечивают структурную стабильность, помогает замедлить чрезмерное ускорение реакции, предотвращая разрушение структуры в начальной стадии твердения. Это способствует умеренной скорости гидратации, что особенно важно при использовании гипса в ремонтно-реставрационных смесях. Для предотвращения избыточной седиментации и агрегации таких суспензий для обеспечения кинетической и агрегативной стабильности смеси при определенных условиях применяются стабилизаторы или диспергаторы [10,11].

В то же время, в минералах с более полидисперсными распределениями частиц, таких как известняк и доломит, преобладание крупных фракций (в пределах 40-50 мкм) связано с выраженной склонностью к седиментации. В таких системах крупные частицы легко оседают, что может приводить к ухудшению стабильности суспензии. Для этих материалов важно тщательно контролировать процесс измельчения, чтобы улучшить упаковку частиц и уменьшить пористость конечного материала.

Применение стабилизаторов и оптимизация дисперсности этих систем становятся ключевыми факторами для обеспечения стабильности и предсказуемости их поведения в строительных смесях.

Особое внимание следует уделить системам с бимодальными распределениями частиц, таким как мергель и сланец. Эти материалы обладают оптимальным балансом между крупными частицами, которые обеспечивают прочность, и мелкими фракциями, заполняющими межзерновые пустоты и снижая пористость. Такая структура способствует улучшению механических свойств вяжущих материалов и повышению их плотности упаковки, что делает их более эффективными в различных строительных составах. Однако для этих материалов необходимо тщательно контролировать процесс переработки и добавки, чтобы избежать неблагоприятных эффектов, таких как расслоение или неконтролируемая флокуляция, которые могут снизить прочностные характеристики материала.

Бентонит, благодаря высокому содержанию мелких частиц с высокой удельной поверхностью, может значительно повысить водопотребность и склонность к образованию структурных гелей, что, в свою очередь, увеличивает тиксотропные свойства и вязкость смеси. Эти особенности могут быть полезными при создании стабилизированных суспензий, но также требуют дополнительного внимания для предотвращения чрезмерного увеличения водопотребности и других нежелательных эффектов [12].

Таким образом, управление распределением частиц по размерам является ключевым аспектом, который позволяет оптимизировать технологические характеристики вяжущих материалов, такие как скорость гидратации, плотность упаковки, пуццолановую активность и склонность к агрегации. Это позволяет создавать более стабильные и эффективные композитные составы, с улучшенными эксплуатационными свойствами и возможностью использования в широком диапазоне применений.

Литература

1. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003. 682 p. ISBN 978-0-444-51564-3.
2. Scrivener K. L., Obla K., Chen I., Mehta C., Hanein T., Li D., Bishnoi S., Santhanam M., Barcelo L., Galvez J. C., Juilland P., Ouyang Y., Wang Q., Rossenant S., Kakali G., Paolini A. E., Goni S. Calcium sulfoaluminate cements: Engineering and performance. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. P. 49–56.
3. Taylor H. F. W. Cement Chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p. ISBN 0727725920
4. Hewlett P. C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 1053 p. ISBN 075066256X.
5. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2nd ed. London: Longman, 1992. 696 p. ISBN 0582300940
6. Lagaly G., Bergaya F., Theng B.K.G. Clay mineral-organic interactions. Handbook of Clay Science. Amsterdam: Elsevier, 2006. Vol. 1. P. 435–478. ISBN 978-0-08-044183-2
7. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation. Brisbane: University of Queensland Press, 1996. 413 p. JKMRC monograph series in mining & mineral processing, No. 2. ISBN 064628861X.
8. Башкатов Н.Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 148 с.
9. Fuerstenau M. C., Han K. N. (eds.) Principles of Mineral Processing. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2003. 573 p. ISBN 0873351673.
10. Jameson G. J. Advances in fine and coarse particle flotation. Canadian Metallurgical Quarterly. 2010. Vol. 49, No. 4. P. 325-330.

11. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. 348 с.
12. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов: В 2 ч. Белгород: БГТУ, 2004. Ч. 1. 240 с.

References

1. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003. 682 p. ISBN 978-0-444-51564-3.
2. Scrivener K. L., Obla K., Chen I., Mehta C., Hanein T., Li D., Bishnoi S., Santhanam M., Barcelo L., Galvez J. C., Juilland P., Ouyang Y., Wang Q., Rossenant S., Kakali G., Paolini A. E., Goni S. Calcium sulfoaluminate cements: Engineering and performance. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. P. 49–56.
3. Taylor H. F. W. Cement Chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p. ISBN 0727725920
4. Hewlett P. C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 1053 p. ISBN 075066256X.
5. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2nd ed. London: Longman, 1992. 696 p. ISBN 0582300940
6. Lagaly G., Bergaya F., Theng B.K.G. Clay mineral-organic interactions. Handbook of Clay Science. Amsterdam: Elsevier, 2006. Vol. 1. P. 435–478. ISBN 978-0-08-044183-2
7. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation. Brisbane: University of Queensland Press, 1996. 413 p. JKMRС monograph series in mining & mineral processing, No. 2. ISBN 064628861X.

8. Bashkatov N.N. Mineral'nyye vozdushnyye vyazhushchiye veshchestva: ucheb. posobiye [Mineral Air Binders: A Textbook]. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2018. 148 p.
9. Fuerstenau M. C., Han K. N. (eds.) Principles of Mineral Processing. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2003. 573 p. ISBN 0873351673.
10. Jameson G. J. Advances in fine and coarse particle flotation. Canadian Metallurgical Quarterly. 2010. Vol. 49, No. 4. P. 325-330.
11. Shchukin, E.D., Pertsov, A.V., Amelina, E.A. Kolloidnaya khimiya. [Colloid Chemistry]. Moskva: Moskva University Press, 1982. 348 p.
12. Luginina I.G. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh vyazhushchikh materialov: V 2 ch. [Chemistry and chemical technology of inorganic binders: In 2 parts]. Belgorod: BSTU, 2004. Part 1. 240 p.

Дата поступления: 20.11.2025

Дата публикации: 27.12.2025