

## Определение гранулометрического состава и удельной поверхности вяжущих компонентов для ремонтных и реставрационных составов

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

*Батаева*

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

**Аннотация.** В работе методом седиментационного анализа проведено исследование гранулометрического состава природных вяжущих компонентов (доломита, известняка, мергеля, сланца, гипса, ангидрита, бентонита и цемянки), применяемых в качестве ремонтно-реставрационных составов. Определена их дисперсность, рассчитана удельная поверхность и сделаны предположения о влиянии степени измельчения на реакционную способность природных материалов. Отмечено, что оптимальная дисперсность способствует ускорению твердения, повышению прочности и улучшению совместимости с историческими материалами, в то время как чрезмерное измельчение может увеличить водопотребность и вызвать усадочные деформации.

**Ключевые слова:** ремонтно-реставрационные составы; удельная поверхность; гранулометрический состав; дисперсность; доломит; известняк; гипс; бентонит; ангидрит; седиментационный анализ.

Известно, что на Юге России расположено большое количество памятников истории и культуры и реставрация, а также поддержание их функциональности на необходимом уровне является важной государственной задачей. В этой связи на передний край выходит поиск новых и совершенствование имеющихся технологий создания качественных и недорогих ремонтно-реставрационных составов на основе местного сырья [1,2].

Такие вяжущие, как доломит, известняк, мергель, сланец, природный гипс, бентонит и ангидрит традиционно используются в качестве наполнителей и добавок в различных строительных смесях и составах и исследованиям в этой области посвящено большое количество работ [3-5]. При этом исследования, посвященные использованию местных природных материалов для создания рецептур ремонтно-реставрационных составов (РРС) объектов Юга России единичны, несмотря на свою актуальность.

---

Поскольку определяющая роль удельной поверхности частиц в совокупности свойств дисперсий очевидна, нами предпринята попытка комплексного изучения межфазных свойств компонентов в составе РРС и первым этапом этих исследований является изучение гранулометрического состава уникальных по минералогическому составу природных материалов, рассматриваемых в качестве исходных для РРС. Таким образом, более общей целью работы является создание экспериментально-теоретической основы для изготовления и апробации новых, аутентичных РРС для реконструкции памятников истории и культуры Юга России [6-7].

Известно, что природные материалы в зависимости от местоположения могут отличаться по минералогическому составу в зависимости от условий их формирования (характер тектоники, химический состав материнской породы, гидрология, климат, условия влажности и т.д.), поэтому изучение влияния этих особенностей на обширный спектр практически важных свойств остается актуальной научной и практической задачей. Очевидно, что без комплексных исследований минералогического, гранулометрического состава и процессов на границе раздела фаз невозможно избежать потенциальных рисков использования РРС для реконструируемых объектов: в виде образования трещин, отшелушивания или изменению цвета поверхностей из-за различий в коэффициентах теплового расширения и влагопоглощения и т.д. [8].

Немаловажным фактором является и экологический аспект использования указанных материалов, поскольку многие из них являются углерод нейтральными, поскольку их производство (известняк и гипс), не сопряжено с существенным увеличением выбросов  $\text{CO}_2$  в отличие от синтетических аналогов.

Между тем их эффективность в качестве РРС напрямую зависит от степени дисперсности и как меры ее выражения – от размера частиц и

---

удельной поверхности: высокая дисперсность способствует лучшей гидратации и формированию более плотной микроструктуры, что влияет на прочность, водопоглощаемость и т.д. Все вышесказанное подчеркивает необходимость научно-обоснованного подхода к каждому материалу с учетом особенностей состава и размеров компонентов для достижения оптимальных характеристик РРС.

Известно, что дисперсность порошков напрямую влияет на их реакционную способность, поскольку уменьшение размера частиц приводит к увеличению числа активных центров на границе раздела фаз, что ускоряет многие физико-химические процессы в системе. Например, частицы известняка размером менее 5 мкм демонстрируют более высокую скорость растворения в кислых средах или при взаимодействии с гидроксидом кальция по сравнению с частицами размером 50 мкм, что объясняется увеличением числа доступных поверхностных молекул, участвующих в реакциях.

Кинетика реакций описывается уравнением:

$$R = kSC,$$

где  $R$  – скорость реакции,  $k$  – константа скорости,  $S$  – удельная поверхность,  $C$  – концентрация частиц твердой фазы, соответственно уменьшение размера частиц увеличивает  $S$  и  $R$ .

Поэтому удельная поверхность частиц, как мера дисперсности, является определяющим фактором их реакционной способности. Повышение удельной поверхности усиливает адсорбционные свойства материала, способствуя более интенсивному взаимодействию с вяжущими компонентами, что приводит к ускорению процессов гидратации и карбонизации, особенно важные для реставрационных составов, где требуется высокая совместимость с историческими материалами. Для доломита и мергеля наблюдается аналогичная зависимость, однако их

---

реакционная способность может быть ниже из-за присутствия магния или глинистых примесей, которые замедляют кинетику реакций [9].

Повышение дисперсности и удельной поверхности порошков способствует:

-ускорению твердения: более мелкие частицы быстрее вступают в реакцию с вяжущими, что сокращает время схватывания состава;

-улучшению механических свойств: способствует формированию более плотной микроструктуры материала, что повышает прочность и долговечность;

-повышению адгезии: увеличенная удельная поверхность улучшает сцепление с подложкой, что критично для реставрационных работ. Однако чрезмерное увеличение дисперсности может привести к повышенному водопоглощению и снижению удобоукладываемости смеси, что требует оптимизации состава.

Следовательно, дисперсность минеральных порошков существенно влияет на их реакционную способность в качестве компонентов РРС. Однако для достижения оптимальных характеристик составов необходимо учитывать баланс между дисперсностью и технологическими свойствами смеси, поэтому исследования, направленные на определение оптимальных параметров дисперсности для различных типов реставрационных составов остаются актуальными.

Для анализа гранулометрического состава и удельной поверхности были использованы природные вяжущие компоненты (доломит, известняк, мергель, сланец, природный гипс, бентонит, ангидрит). Указанные компоненты имеют различный минералогический состав, сочетание которых позволяет управлять практически важными параметрами материалов – гидравлическая активность, скорость твердения и совместимость. Кроме того, выбор этих компонентов обусловлен их доступностью, экологичностью

---

и потенциалом использования в качестве РРС, где требуется химическая инертность по отношению к оригинальным конструкциям и материалам.

В перечень исследуемых материалов входят:

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. Плотность –  $2,83 \text{ г/см}^3$ , что выше среднего для карбонатов из-за повышенного содержания магния. Материал добыт из карьера Галанчожского района ЧР (содержание доломита  $> 70\%$ ).

Известняк (осадочная порода, в основном кальцит  $\text{CaCO}_3$ ) служит основой для воздушных известий и используется в смесях для обеспечения паропроницаемости и совместимости с каменными субстратами. Плотность –  $2,66 \text{ г/см}^3$ , типичная для плотных известняковых пород. Образец взят из месторождений Чири-Юртовского цементного завода, где известняк обладает мелкозернистой структурой, подходящей для измельчения.

Мергель (смесь глины и карбонатов, промежуточный между известняком и глиной) является естественным гидравлическим вяжущим, обжигаемым для получения цемента. Его плотность –  $2,67 \text{ г/см}^3$ . Материал получен из осадочных отложений месторождений Чири-Юртовского цементного завода.

Сланец (метаморфическая порода с преобладанием слюды и кварца) используется как минеральный наполнитель в составах для повышения прочности и устойчивости к эрозии. Плотность –  $2,65 \text{ г/см}^3$ , обусловленная силикатным составом. Образец из сланцевых формаций Галанчожского района ЧР, характеризующихся слоистой текстурой, что облегчает измельчение.

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. Плотность –  $2,33 \text{ г/см}^3$ , самая низкая среди исследуемых, из-за гидратной формы. Материал добыт из месторождений Чеченской республики в окрестностях селения Чинаха ЧР.

Ангидрит (безводный сульфат кальция  $\text{CaSO}_4$ ) служит вяжущим в составах для влажных сред, обладая более высокой прочностью по сравнению с гипсом. Плотность –  $2,93 \text{ г/см}^3$ , отражающая компактную кристаллическую структуру. Образец из ангидритовых залежей гипсового месторождения с. Шарой ЧР.

Бентонит (глинистый минерал на основе монтмориллонита), используемый как пластификатор и стабилизатор суспензий в строительных смесях. Бентонит обладает высокой набухаемостью и адсорбционной способностью, плотность  $2,46 \text{ г/см}^3$ . Образец получен из месторождения «Катаяма» в окрестностях города Грозного.

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 во времена Петра I [10].

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  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  с соблюдением всех

процедур пробоподготовки в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003, ГОСТ 16557-78, ГОСТ 8736-77 и ОСТ 41-08-249-85.

Процедура подготовки суспензий состояла из следующих этапов:

1. Взвешивание и диспергирование: для каждого материала брали навеску массой 10 г (с точностью до 0,01 г). Навеску помещали в стеклянный стакан объемом 500 мл и добавляли 400 мл дистиллированной воды (плотность  $\rho = 1,00 \text{ г/см}^3$ , вязкость  $\eta = 1,00 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  при 20 °С).

2. Гомогенизация: суспензию интенсивно перемешивали механической мешалкой (скорость 500 об/мин) в течение 10 мин для обеспечения равномерного распределения частиц и разрушения агломератов. После перемешивания суспензию оставляли на 5 мин для стабилизации, затем повторно перемешивали 2 мин.

3. Приготовленную суспензию количественно переносили в мерный цилиндр объемом 1000 мл (высота столба жидкости 20 см), доводя объем до 1000 мл дистиллированной водой. Цилиндр встряхивали для полной гомогенизации, после чего начинали отсчет времени седиментации ( $t = 0$ ).

4. Расчеты по закону Стокса основаны на определении скорости осаждения сферических частиц в вязкой жидкости под действием силы тяжести, что позволяет оценить размеры частиц по скорости седиментации [11]. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость размеров частиц от времени осаждения

Время седимента ции фракций	Цемя нка диаме тр	Долом ит диаме тр	Извест няк диамет р (мкм)	Мерге ль диаме тр	Слане ц диаме тр	Гипс диаме тр (мкм)	Ангид рит диамет р	Бенто нит
--------------------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------------------	----------------------------	---------------------------	------------------------------	-----------------------------	--------------

	(мкм)	(мкм)		(мкм)	(мкм)		(мкм)	
60 с.	25,15	22,4	23,5	23,4	23,6	26,3	22,0	25
120 с.	17,79	15,8	16,6	16,6	16,7	18,6	15,6	17,7
180 с.	14,52	12,9	13,6	13,5	13,6	15,2	12,7	14,4
240 с.	12,58	11,2	11,8	11,7	11,8	13,1	11,0	12,5
300 с.	11,25	10,0	10,5	10,5	10,6	11,8	9,8	11,2
Средний размер частиц	16,27	14,46	15,14	15,13	15,26	17,02	14,22	25,01

На основе данных таблицы построены кривые седиментации водных суспензий на основе исследованных порошков (Рис. 1).

Из анализа полученных данных следует, что наиболее крупные частицы на всех этапах осаждения имеют гипс и цемянка (при 60 с – 26,3 и 25,15 мкм соответственно).

Наименьшим средним размером отличаются частицы ангидрита (14,22 мкм) и доломита (14,46 мкм).

Бентонит выделяется среди всех материалов, демонстрируя самый крупный средний размер частиц – 25,01 мкм, что указывает на низкую степень диспергирования в данной системе.

Анализ динамики изменения размеров частиц показал, что у гипса и цемянки снижение диаметра идёт наиболее интенсивно: от ~26 мкм (60 с) до ~11 мкм (300 с). Это отражает наличие широкого спектра фракций и высокую неоднородность материала.

У доломита и ангидрита уменьшение размеров выражено менее резко: начальные значения (~22 мкм и 22 мкм) уменьшаются до ~10 мкм и ~9,8 мкм соответственно, что указывает на их более равномерный дисперсный состав.

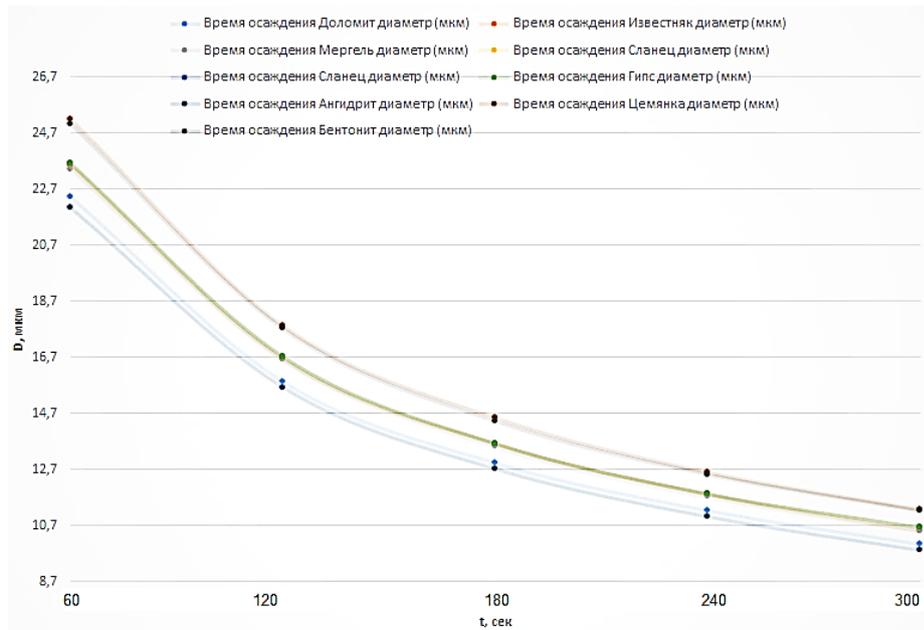


Рис. 1. – Седиментационные кривые порошков

По степени дисперсности частиц твердой фазы водные суспензии можно условно разделить на группы:

Высокодисперсные: ангидрит (14,22мкм), доломит (14,46мкм), известняк (15,14мкм), мергель (15,13мкм), сланец (15,26мкм).

Среднедисперсные: цемянка (16,27мкм).

Низкодисперсные: гипс (17,02) и особенно бентонит (25,01мкм).

Бентонит показал высокий средний размер частиц, что может быть связано с агрегированием частиц в водной среде.

На основе данных таблицы 1 рассчитана удельная поверхность исследованных суспензий (рис. 2). Как видно из данных, значения удельной поверхности частиц доломита, известняка, мергеля и сланца находятся в диапазоне 146–149 м<sup>2</sup>/кг, что указывает на схожую дисперсность частиц. В водных суспензиях этот диапазон указывает на умеренную реакционную

способность, что позволяет обеспечить сбалансированную гидратацию без чрезмерной потребности в воде. Например, известняк и мергель с удельной поверхностью частиц 149,1 и 148,3 м<sup>2</sup>/кг соответственно, немного мельче, чем доломит (146,7 м<sup>2</sup>/кг), что потенциально увеличивает их вклад в образование гидрата силиката кальция (C-S-H) в системах портландцемента.

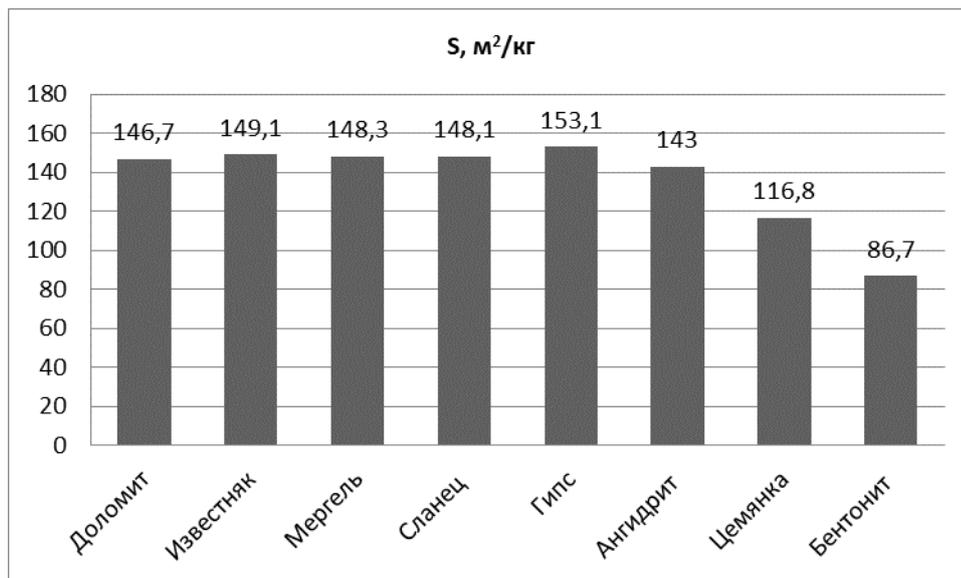


Рис. 2. – Гистограмма удельной поверхности исследуемых образцов

Гипс демонстрирует самую высокую удельную поверхность – 153,1 м<sup>2</sup>/кг. В связующих составах мелкие частицы гипса способствуют быстрому растворению сульфатных ионов, которые регулируют гидратацию алюминатной фазы и предотвращают быстрое схватывание. Такое повышение удельной поверхности способствует достижению контролируемого времени схватывания (обычно 2–4 часа в стандартных цементах), но может увеличить потребность в воде, что потребует добавления примесей для обеспечения необходимых показателей.

Ангидрит с более низкой удельной поверхностью 143,0 м<sup>2</sup>/кг представляет собой менее подходящую альтернативу: его значение дисперсности выгодно в условиях высоких температур или для продления

удобоукладываемости штукатурок, хотя существует риск неполной гидратации, если не измельчить достаточно тонко.

Удельная поверхность цемьянки, равная  $116,8 \text{ м}^2/\text{кг}$ , является промежуточной, что делает его пригодным для составов, где допустимо замедленное нарастание прочности, например, для смягчения термического растрескивания материала.

Бентонит, с самой низкой степенью дисперсности  $86,7 \text{ м}^2/\text{кг}$ , выделяется благодаря своей глинистой минеральной природе [12]. Хотя бентонит известен высокой внутренней степенью дисперсности ( $>500 \text{ м}^2/\text{г}$  по методу ВЕТ из-за межслойных поверхностей), измеренное значение удельной поверхности, вероятно, отражает эффективную внешнюю поверхность в водной суспензии, поскольку набухание и расслоение могут не полностью проявиться в методе измерения. На практике бентонит используется в связующих составах благодаря своим тиксотропным свойствам, повышающим стабильность суспензии. Его низкая кажущаяся степень дисперсности предполагает образование более грубых агрегатов, что выгодно для контроля вязкости без чрезмерного увеличения потребности в воде.

Анализ гранулометрического состава позволяет сделать некоторые предположения, основанные на их использовании в качестве активных добавок в РРС. Близкая по величине удельная поверхность известковых (известняк, доломит) и глинистых (мергель, сланец) компонентов (в среднем  $\approx 148 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) способствуя равномерному образованию структуры вяжущего. Смешивание с гипсом с более высокой удельной поверхностью способно обеспечить улучшение схватывания, а добавление бентонита с более высокой удельной поверхностью может улучшить реологические свойства растворов их них.

Добавки с удельной поверхностью  $>148 \text{ м}^2/\text{кг}$  (например, гипс, известняк) могут повысить соотношение вода/вяжущее на 5–10 % по

---

сравнению с более грубыми аналогами, исходя из эмпирических корреляций в составах растворов: для этого можно использовать пластификаторы для поддержания осадки без ущерба для прочности.

Более высокая степень дисперсности коррелирует с ускоренным ранним упрочнением: например, удельная поверхность гипса  $153,1 \text{ м}^2/\text{кг}$  может повысить прочность на сжатие цементных паст через 1 день до 20%, поскольку более мелкие частицы ускоряют образование этtringита [13]. Сбалансированное распределение удельной поверхности минимизирует такие риски, как чрезмерная усадка (от компонентов высокой тонкости) или плохая укладка (от грубых компонентов).

Гранулометрический анализ исследуемых компонентов для создания РРС позволил сделать целый ряд выводов и предположений:

Установлено, что наиболее высокую удельную поверхность ( $153,1 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) демонстрирует гипс, что обуславливает его ускоряющее действие на процессы схватывания и гидратации.

Доломит, известняк, мергель и сланец имеют близкие значения удельной поверхности ( $146\text{--}149 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), что способно обеспечить их сбалансированное участие в формировании структуры РРС.

Бентонит характеризуется наименьшей кажущейся дисперсностью ( $86,7 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) вследствие агрегирования частиц, что ограничивает его реакционную способность, но способствует улучшению реологии смесей.

Показано, что необходим баланс дисперсности, поскольку чрезмерная дисперсность может приводить к повышенной водопотребности и снижению удобоукладываемости, требуя для оптимизации состава применение пластификаторов.

Результаты подтверждают необходимость индивидуального подбора степени измельчения для каждого компонента с учетом требуемых свойств реставрационного материала.

---

Приведенные интерпретации основаны на стандартных условиях: изменения формы частиц, минералогии или рН среды суспензии могут влиять на результаты. В дальнейшем, для количественной оценки влияния дисперсности на механические свойства РРС, на наш взгляд, следует сопоставить значения удельной поверхности с экспериментальными исследованиями прочностных характеристик, водопроницаемости и удобоукладываемости полученных составов.

### Литература

1. Батаева П.Д. Теория, технологии и организационные основы ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. 2025. 456 с.
2. Шеина С.Г., Батаев Д.К.-С., Батаева П.Д., Батаева Я.Д. Технологии и материалы для повышения устойчивости жизненного цикла памятников истории и культуры. Научная монография. Грозный, Махачкала: АЛЕФ, 2025. 182 с.
3. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, 2012. № 3. С. 10-14.
4. Саламанова М.Ш. Исследование влияния добавки активного кремнезема на свойства вяжущих щелочной активации. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Строительство и архитектура. 2022. Т. 7. № 1. С. 23-30.
5. Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В. Строительные материалы. М.: Высшая школа, 2009. С. 45–50.
6. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. М.: Стройиздат, 1977. 220 с.

7. Комар А.Г. Строительные материалы и изделия. М.: Высшая школа, 1988. 527 с.
8. Тейлор Х.Ф.В. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с. ISBN 5-03-002731-9
9. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 2010. V 24(11), P 2060-2071
10. Lawrence M. Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars. University of Bath. 2006. 345 p.
11. Xu X, Zhao Y, Gu X, Zhu Z, Wang F, Zhang Z. Effect of Particle Size and Morphology of Siliceous Supplementary Cementitious Material on the Hydration and Autogenous Shrinkage of Blended Cement. *Materials*. 2023. 16(4): 1638. URL: [doi.org/10.3390/ma16041638](https://doi.org/10.3390/ma16041638)
12. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов: В 2 ч. Белгород: БГТУ, 2004. Ч. 1. 240 с.
13. Башкатов Н.Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 148 с.
14. Дербишер Е.В., Малышева Ж.Н. Практикум по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. 112 с. ISBN 978-5-9948-3080.
15. Эйриш М.В, Власов В.В., Гревцев В.А., Шляпкина Е.Н., Аухадеев Ф.Л. Кристаллохимические разновидности монтмориллонита и их диагностика в бентонитах. Спектроскопия, рентгенография и кристаллохимия минералов. Казань: КГУ, 1997. С. 154–160.
16. Ферронская А.В., Коряков В.Ф., Баранов И.М. и др. Гипс в малоэтажном строительстве. Москва: АСВ, 2008. 240 с.

## References

1. Bataeva P.D. Teoriya, tekhnologii i organizatsionnyye osnovy remonta, restavratsii i rekonstruktsii obyektov kul'turnogo naslediya [Theory, technologies, and organizational foundations of repair, restoration, and reconstruction of cultural heritage sites]: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. 2025. 456 p.
2. Sheina S.G., Bataev D.K.-S., Bataeva P.D., Bataeva Ya.D. Nauchnaya monografiya. Grozny, Makhachkala: ALEF, 2025. 182 p.
3. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin Yu.S. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova, 2012. No. 3. pp. 10-14.
4. Salamanova, M. Sh. Bulletin of the V. G. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2022. Vol. 7. No. 1. pp. 23-30.
5. Falikman, V. R., Sorokin, Yu. V. Stroitel'nyye materialy. [Construction Materials]. Moskva: Vysshaya shkola, 2009. pp. 45-50.
6. Ratinov V.B., Ivanov F.M. Khimiya v stroitel'stve. [Chemistry in Construction]. Moskva: Stroyizdat, 1977. 220 p.
7. Komar A.G. Stroitel'nyye materialy i izdeliya [Construction Materials and Products]. Moskva: Vysshaya Shkola, 1988. 527 p.
8. Taylor H.F.W. Khimiya tsementa [Chemistry of cement]. Per. s English M.: Mir, 1996. 560 p. ISBN 5-03-002731-9
9. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. Construction and Building Materials, 2010. V 24(11), P 2060-2071
10. Lawrence M. Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars. University of Bath. 2006. 345 rub.
11. Xu X, Zhao Y, Gu X, Zhu Z, Wang F, Zhang Z. Effect of Particle Size and Morphology of Siliceous Supplementary Cementitious Material on the

Hydration and Autogenous Shrinkage of Blended Cement. *Materials*. 2023. 16(4): 1638. doi.org/10.3390/ma16041638

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.

13. Bashkatov N.N. Mineral'nyye vozdushnyye vyazhushchiye veshchestva: ucheb. posobiye [Mineral Air Binders: A Textbook]. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2018. 148 p.

14. Derbisher E.V., Malysheva Zh.N. Praktikum po kolloidnoy khimii [Colloid Chemistry Workshop]. Poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy: uchebnoye posobiye. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2018. 112 p. ISBN 978-5-9948-3080.

15. Eirish M.V., Vlasov V.V., Grevtsev V.A., Shlyapkina E.N., Aukhadeyev F.L. Kristallokhimicheskiye raznovidnosti montmorillonita i ikh diagnostika v bentonitakh [Crystal chemical varieties of montmorillonite and their diagnostics in bentonites]. Spektroskopiya, rentgenografiya i kristallokhimiya mineralov. Kazan': KGU, 1997. pp. 154–160.

16. Ferronskaya A.V., Koryakov V.F., Baranov I.M. and others. Gips v maloetazhnom stroitel'stve [Gypsum in low-rise construction]. Moskva: ASV, 2008. 240 p.

**Дата поступления: 20.11.2025**

**Дата публикации: 3.03.2026**