

УДК 691.53

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61)**Д.К.–С. БАТАЕВ, Р.С. ДЖАМБУЛАТОВ[✉]**

ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, ул. Вахи Алиева, д. 21а, г. Грозный, 364020, Российская Федерация

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ДОБАВОК ДЛЯ РЕМОНТНЫХ И РЕСТАВРАЦИОННЫХ СОСТАВОВ

Аннотация

Введение. В работе представлены результаты исследования гранулометрического состава и удельной поверхности природных и техногенных материалов, применяемых в качестве компонентов ремонтно-реставрационных составов для восстановления памятников архитектуры и истории Юга России.

Цель. Изучение дисперсности и распределения частиц восьми типов минеральных материалов из местного сырья (доломита, известняка, мергеля, сланца, гипса, ангидрита, бентонита и цемянки) с целью дальнейшего изучения влияния гранулометрических показателей на реакционную способность, гидратацию и формирование микроструктуры вяжущих систем.

Материалы и методы. На основе седиментационного анализа водных суспензий перечисленных минералов по закону Стокса определены диапазоны размеров частиц и рассчитаны значения удельной поверхности.

Результаты. Установлено, что ангидрит и доломит характеризуются наибольшей дисперсностью (средний размер 14–15 мкм), обеспечивающей высокую реакционную активность и плотную микроструктуру, в то время как гипс и бентонит обладают более крупными частицами (17–25 мкм), влияющими на водопотребность смесей. Наибольшая удельная поверхность отмечена у гипса (153,1 м²/кг), а минимальная – у бентонита (86,7 м²/кг).

Выводы. Полученные данные, опираясь на теоретическую основу материаловедения (предоставляет понимание связи между структурой, составом, технологией получения и эксплуатационными свойствами материалов) и коллоидной химии (поведение дисперсных систем, включая процессы на границе раздела фаз – адгезия, капиллярные явления), позволяют обосновать рекомендации по целенаправленному подбору компонентов ремонтно-реставрационных составов для обеспечения требуемого баланса между прочностью, адгезией, водопоглощением и совместимостью с оригинальными материалами памятников

и формируют научно-практическую основу для создания аутентичных, экономичных и экологических составов на основе местного минерального сырья.

Ключевые слова: гранулометрический состав, удельная поверхность, ремонтно-реставрационные составы, природные минеральные материалы, дисперсность, микроструктура вяжущих, адгезия, памятники истории и культуры

Для цитирования: Батаев Д.К.–С., Джамбулатов Р.С. Гранулометрический состав и удельная поверхность наполнителей и добавок для ремонтных и реставрационных составов // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 50–61. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61). EDN: OYQTHI.

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

В рамках выполнения государственного задания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.10.2025

Поступила после рецензирования 18.12.2025

Принята к публикации 25.12.2025

D.K.–S. BATAYEV, R.S. DZHAMBULATOV✉

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Vahi Aliyev Street, 21a, Grozny, 364020, Russian Federation

GRANULOMETRIC DISPOSITION AND SPECIFIC SURFACE AREA OF FILLERS AND ADDITIVES FOR REPAIR AND RESTORATION COMPOUNDS

Abstract

Introduction. This paper presents the results of a study of the particle size distribution and specific surface area of natural and manmade materials used as components of repair and restoration mortars for architectural and historical monuments in southern Russia.

The aim of the study was to investigate the particle size distribution of eight types of locally sourced mineral materials (dolomite, limestone, marl, shale, gypsum, anhydrite, bentonite, crushed burnt brick) to further elucidate the influence of particle size distribution on the reactivity, hydration, and microstructure of binder systems.

Materials and methods. Based on sedimentation analysis of aqueous suspensions of these minerals using Stokes' law, particle size ranges were determined and specific surface areas were calculated.

Results. It was found that anhydrite and dolomite are characterized by the highest dispersion (average size 14–15 μm), ensuring high reactivity and a dense microstructure, while gypsum and bentonite have larger particles (17–25 μm), affecting the water demand of the mixtures. Gypsum has the highest specific surface area (153.1 m^2/kg), while bentonite has the lowest (86.7 m^2/kg).

Conclusions. The obtained data, based on the theoretical basis of materials science (provides an understanding of the relationship between the structure, composition, production technology and operational properties of materials) and colloidal chemistry (the behavior of dispersed systems, including processes at the phase boundary – adhesion, capillary phenomena), make it possible to substantiate recommendations for the targeted selection of components of repair and restoration compositions to ensure the required balance between strength, adhesion, water absorption and compatibility with the original materials of monuments and form a scientific and practical basis for the creation of authentic, economical and environmentally friendly compositions based on local mineral raw materials.

Keywords: granulometric composition, specific surface area, repair and restoration compositions, natural mineral materials, dispersion, microstructure of binders, adhesion, historical and cultural monuments

For citation: Batayev D.K.–S., Dzhambulatov R.S. Granulometric disposition and specific surface area of fillers and additives for repair and restoration compounds. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 50–61. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61). EDN: OYQTHI.

Authors contribution statement

All the authors have made an equal contributions to the preparation of the publication.

Funding

Within the framework of fulfilling the state assignment.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.10.2025

Revised 18.12.2025

Accepted 25.12.2025

Введение

Юг России славится множеством памятников истории и культуры [1]. Задача их реставрации, а также поддержания в функциональном состоянии является приоритетной для государства. В этой связи особое внимание уделяется поиску новых и совершенствованию существующих технологий для разработки качественных и экономичных ремонтно-реставрационных составов (PPC) на основе местного сырья [2, 3].

Природные материалы, такие как гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), известняк (CaSO_4), мергель (смесь карбонатов и глин), сланец (богатый силикатами), ангидрит (CaSO_4), доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) и бентонит (монтмориллонитовая глина), использовавшиеся в строительстве древних памятников, имеют различные минералогические характеристики и текстурную неоднородность. Это сильно влияет на их поведение при дроблении и диспергировании. Например, пластинчатая морфология бентонита контрастирует с равноосными кристаллами гипса, что приводит к различным профилям распределения частиц и может оказать влияние на использование этих материалов в процессах формирования структуры, набора прочности и т. д. [4]. Аномалии в распределении частиц, такие как избыток мелких фракций или крупнозернистые хвосты, могут ухудшить гидравлические свойства, увеличить энергозатраты на измельчение и способствовать пылеобразованию [5].

Тем не менее работы, посвященные использованию природных материалов Юга России для создания аутентичных составов для ремонта и реставрации памятников истории и культуры, не отвечают потребностям в подобных исследованиях несмотря на актуальность.

Учитывая важность учета удельной поверхности частиц в процессах массопереноса и формирования физико-механических свойств, предпринята попытка комплексного изучения межфазных свойств компонентов PPC. Первым этапом исследования стало изучение гранулометрического состава уникальных природных материалов для создания реставрационных составов. Основной целью исследования является создание экспериментально-теоретической базы для разработки и тестирования новых аутентичных PPC, предназначенных для реконструкции памятников на Юге России.

Известно, что минералогический состав природных материалов зависит от условий их формирования, таких как тектоническая активность, химический состав материнской породы, гидрологические и климатические условия. Это подчеркивает актуальность изучения влияния этих факторов на физико-химические свойства материалов для их использования в качестве составных частей PPC. Без комплексного исследования минералогического состава, гранулометрии и межфазных процессов невозможно избежать рисков, связанных с образованием трещин,

отслоением или изменением цвета поверхностей вследствие различий в коэффициентах теплового расширения и влагопоглощения [6].

Эффективность этих материалов как составных частей PPC зависит и от их степени дисперсности, выраженной в размере частиц и удельной поверхности. Все указанные факторы подчеркивают необходимость научно обоснованного подхода к каждому компоненту в составе моделируемого PPC, учитывающего его состав и размерные характеристики для достижения оптимальных характеристик [7].

Таким образом, цель исследования – изучение удельной поверхности и распределения частиц в водных суспензиях восьми типов природных и искусственных материалов с использованием метода количественной оценки объемных фракций в диапазоне от субмикронного до миллиметрового масштаба. Установленные закономерности между гранулометрическим составом, удельной поверхностью и реакционной способностью минеральных компонентов позволят целенаправленно подбирать и сочетать материалы для достижения оптимальных технологических и эксплуатационных свойств PPC: скорость твердения, адгезия, водопотребность, устойчивость к усадке и т. д. [6–8].

Основной раздел

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 [8, 9]. 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 [9–12].

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 важных 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 [13, 14].

В перечень исследуемых объектов 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 Чеченской Республики (содержание доломита > 70 %).

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

3. Мергель (смесь глины и карбонатов, промежуточный материал между известняком и глиной) является естественным гидравлическим вяжущим, обжигаемым для получения цемента. Материал получен из осадочных отложений месторождений Чирри-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 Чеченской Республики (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 быстротвердею-

щих составах для внутренних работ благодаря своей низкой растворимости и высокой белизне. Материал добыт из месторождений ЧР 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 отобран из ангидритовых залежей гипсового месторождения, расположенного в окрестностях села Шарой (ЧР).

7. Бентонит (глинистый минерал на основе монтмориллонита) используется как пластификатор и стабилизатор суспензий в строительных смесях. Образец получен из месторождения «Катаяма» в окрестностях города Грозного [15].

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 Санкт-Петербурга [16].

Все материалы были предварительно измельчены в шаровой мельнице до порошкообразного состояния (фракции в пределах 9–27 мкм).

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 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ с соблюдением всех процедур пробоподготовки в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003 [17] и ОСТ 41-08-249-85 [18].

На основе экспериментальных данных сначала рассчитаны диаметры частиц, осевших к каждому моменту времени, с помощью уравнения Стокса получено дифференциальное распределение, показывающее долю каждой фракции. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость размеров частиц от времени осаждения

Table 1

Dependence of particle size on deposition time

Время седиментации фракций, с	Цемянка, диаметр, мкм	Доломит, диаметр, мкм	Известняк, диаметр, мкм	Мергель, диаметр, мкм	Сланец, диаметр, мкм	Гипс, диаметр, мкм	Ангидрит, диаметр, мкм	Бентонит
60	25,15	22,4	23,5	23,4	23,6	26,3	22,0	25,0
120	17,79	15,8	16,6	16,6	16,7	18,6	15,6	17,7
180	14,52	12,9	13,6	13,5	13,6	15,2	12,7	14,4
240	12,58	11,2	11,8	11,7	11,8	13,1	11,0	12,5
300	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

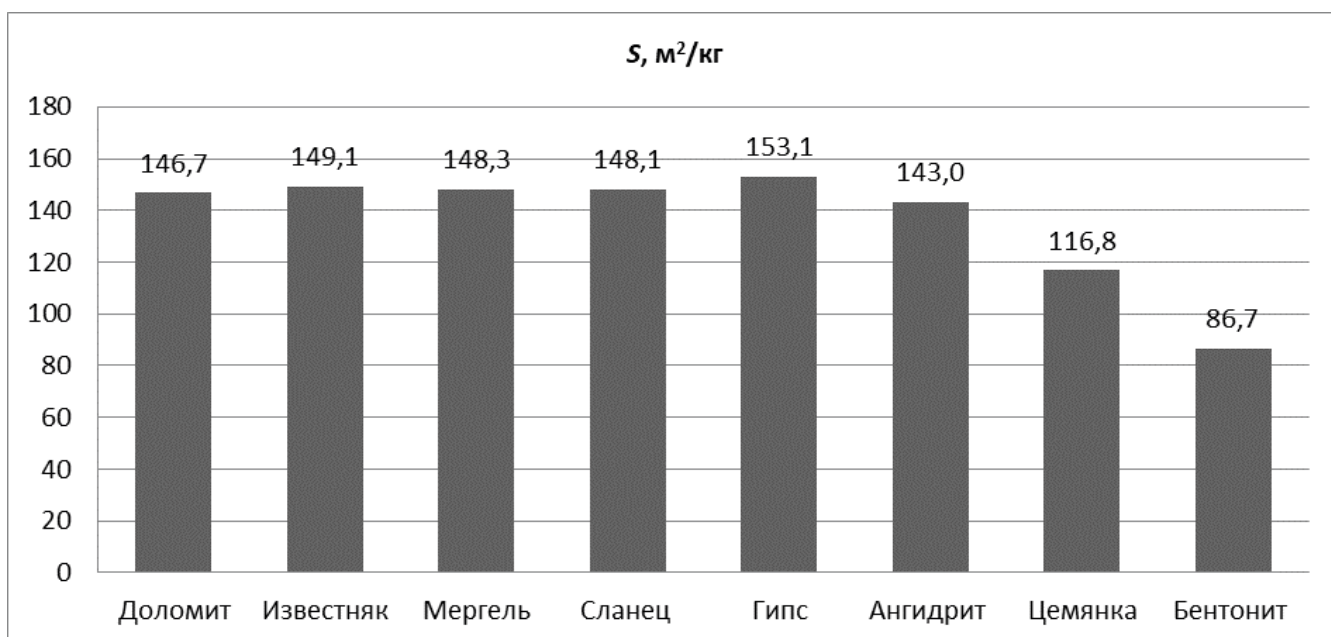


Рис. 1. Гистограмма удельной поверхности исследуемых образцов
Fig. 1. Histogram of the specific surface area of the studied samples

На основе данных (табл. 1) рассчитана удельная поверхность исследованных суспензий (рис. 1). Как видно из данных, значения удельной поверхности частиц доломита, известняка, мергеля и сланца находятся в диапазоне 146–149 $\text{м}^2/\text{кг}$, 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 $\text{м}^2/\text{кг}$ соответственно немного мельче, чем доломит (146,7 $\text{м}^2/\text{кг}$), что потенциально увеличивает их вклад в образование гидрата силиката кальция (C–S–H) в системах портландцемента.

Гипс демонстрирует самую высокую удельную поверхность – 153,1 $\text{м}^2/\text{кг}$. 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 [19].

Ангидрит с более низкой удельной поверхностью (143,0 $\text{м}^2/\text{кг}$) представляет собой менее подходящую альтернативу: его значение дисперсности выгодно в условиях высокой температуры или для продления удобоукладываемости штукатурок, хотя существует риск неполной гидратации, если не измельчить достаточно тонко [20].

Удельная поверхность цемянки, равная 116,8 $\text{м}^2/\text{кг}$, является промежуточной, что делает ее пригодной

для составов, где допустимо замедленное нарастание прочности, например для смягчения термического растрескивания материала [21].

Бентонит, с самой низкой степенью дисперсности – 86,7 $\text{м}^2/\text{кг}$, выделяется благодаря своей глинистой минеральной природе [22]. 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.

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 $\approx 148 \text{ м}^2/\text{кг}$) способствует 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 из них [23].

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 крупными 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 один день до 20 %, поскольку более мелкие частицы ускоряют образование этtringита. Сбалансированное распределение удельной поверхности минимизирует такие риски, как чрезмерная усадка (от компонентов высокой тонкости) или плохая укладка (от грубых компонентов) [24].

На основе представленных результатов получены детальные характеристики распределения частиц по размерам в водных суспензиях изученных минералов.

Для каждого графика (рис. 2–9) 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 компонентами в РРС. Например, более узкое распределение размеров важно при его применении в различных технологических процессах. Ширина распределения (S) влияет на свойства текучести суспензии, ее реакционную способность и эффективность в различных процессах, таких как фильтрация, осаждение. В совокупности эти параметры дают целостное представление о дисперсном состоянии материала.

Распределение размеров частиц в суспензии природного гипса (рис. 2) 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 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. Такое распределение частиц подходит для использования в качестве активатора 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.

График распределения частиц суспензии известняка (рис. 3) по размерам показывает, что D_{50} составляет 38,7 мкм. D_{10} и D_{90} равны 0,7 и 34,5 мкм соответственно.

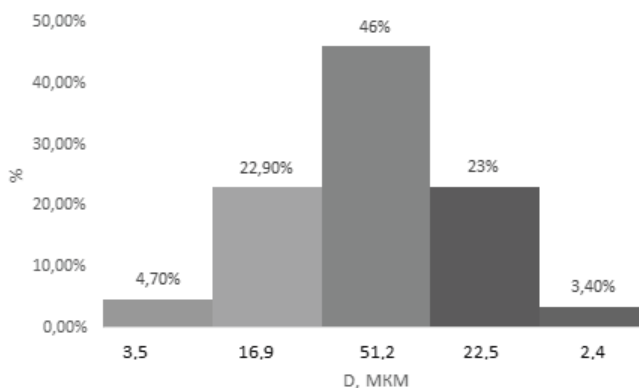


Рис. 2. Распределение частиц по размерам в суспензии природного гипса
 Fig. 2. Particle size distribution in a suspension of natural gypsum

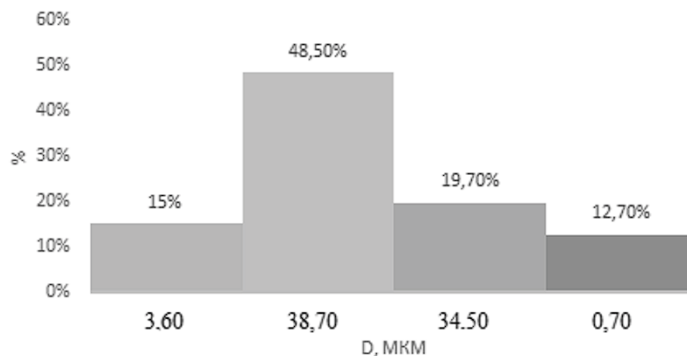


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в суспензии известняка
 Fig. 3. Particle size distribution in limestone suspension

Ширина распределения (S) в суспензии асимметричная и составляет 33,8 мкм, с одним выраженным пиком в области 38,7 мкм, что свидетельствует о том, что основная масса частиц сосредоточена в диапазоне средних размеров, с меньшими долями более мелких и крупных частиц.

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 и 0,7 мкм) может оказывать влияние на стабилизацию системы и ее поведение при добавлении химических добавок.

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

На основе графика распределения частиц в суспензии мергеля (рис. 4) установлено, что D_{50} составляет 48,2 мкм, в то время как размеры D_{10} и D_{90} равны 12,5 и 14,9 мкм соответственно.

Ширина распределения (S) составляет 2,4 мкм, что указывает на относительно узкое распределение. 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.

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 строительно-реставрационных смесях и других применениях, где важна стабильность и равномерное распределение частиц. Меньшие фракции (14,9 и 12,5 мкм) могут оказывать влияние на реологию системы и ее поведение при добавлении стабилизаторов.

График распределения частиц в суспензии сланца (рис. 5) показывает, что D_{50} составляет 48,6 мкм.

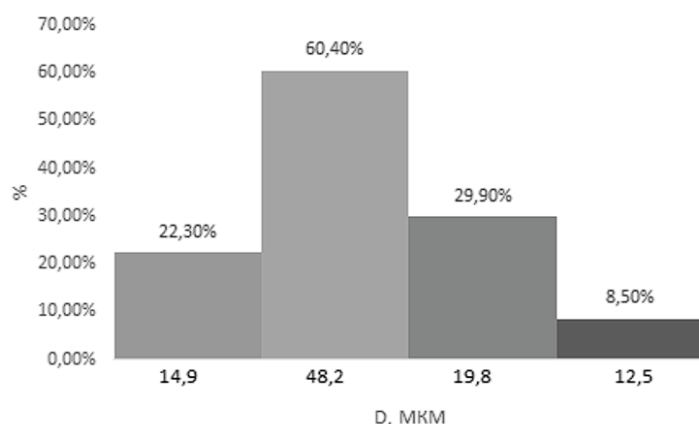


Рис. 4. Распределение частиц по размерам в суспензии мергеля
Fig. 4. Particle size distribution in marl suspension

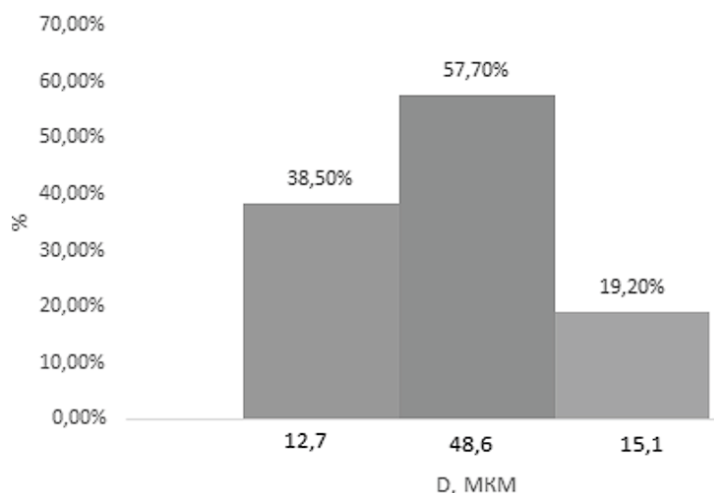


Рис. 5. Распределение частиц по размерам в суспензии сланца
Fig. 5. Particle size distribution in the shale suspension

Размеры D_{10} и D_{90} равны 12,7 и 15,1 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 2,4 мкм, что указывает на узкое распределение частиц.

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.

Характер распределения частиц в суспензии ангидрита (рис. 6) показывает, что медианный размер D_{50} составляет 46,9 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,8 и 14,0 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 2,2 мкм, что свидетельствует о довольно узком распределении частиц. 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 приемлемым для процессов, где необходим контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

График распределения частиц в суспензии цемянки (рис. 7) показывает, что величина D_{50} составляет 50,1 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,9 и 16,0 мкм соответственно. Ширина распределения (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 процессах, где требуется контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

Распределение частиц в суспензии доломита (рис. 8) показывает, что D_{50} составляет 51,1 мкм. Размеры D_{10} и D_{90} равны 2,3 и 12,0 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 9,7 мкм, что указывает на довольно широкое распределение частиц.

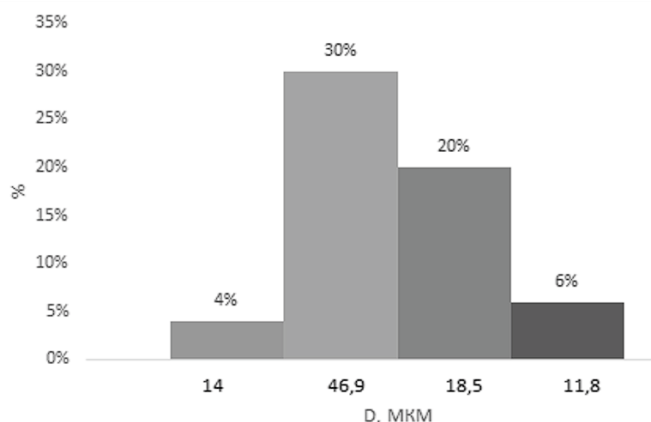


Рис. 6. Распределение частиц по размерам в суспензии ангидрита
Fig. 6. Particle size distribution in anhydrite suspension

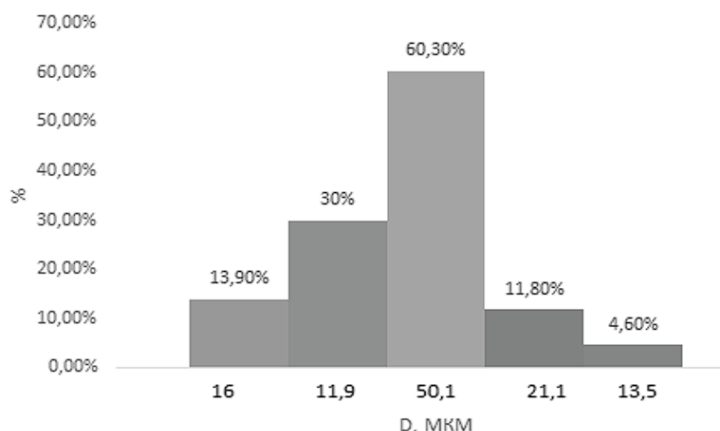


Рис. 7. Распределение частиц по размерам в суспензии цемянки
Fig. 7. Particle size distribution in crushed burnt brick suspension

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 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.

График распределения частиц в суспензии бентонита (рис. 9) показывает, что D_{50} составляет 25,0 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,2 и 17,7 мкм соответственно. Ширина распределения 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 свидетельствуют о структуре материала, делающего его подходящим для условий, где важен контроль за размерами частиц и их однородность.

Заключение

На основе представленных данных можно сформулировать следующие выводы:

1. Изученные образцы существенно различаются по среднему размеру частиц и ширине распределения фракций:

– наиболее дисперсными (мелкими) оказались ангидрит (14,22 мкм) и доломит (14,46 мкм), что способствует их высокой реакционной активности и плотной микроструктуре вяжущего;

– наиболее крупнодисперсными – гипс (17,02 мкм) и особенно бентонит (25,01 мкм), что связано с агрегацией частиц и спецификой их морфологии.

Эти различия позволяют целенаправленно подбирать компоненты в зависимости от требуемых свойств PPC:

– для ускорения схватывания использовать более мелкие фракции (например, гипс с высокой удельной поверхностью 153,1 м²/кг);

– для улучшения удобоукладываемости и снижения усадки вводить более грубые или глинистые компоненты (например, бентонит).

2. Значения удельной поверхности выявили следующие особенности исследованных объектов. Установлено, что гипс обладает наибольшей удельной поверхностью (153,1 м²/кг), что делает его эффективным регулятором схватывания и ускорителем ранней прочности. Бентонит имеет наименьшую эффективную удельную поверхность в водной среде (86,7 м²/кг), что объясняется агрегацией частиц, однако его ценность заключается в тиксотропных и стабилизирующих свойствах, улучшающих реологию суспензий. Известняк, мергель, сланец и доломит демонстрируют близкие значения удельной поверхности (~146–149 м²/кг), что обеспечивает однородность микроструктуры и сбалансированную гидратацию в составах.

3. Комбинирование компонентов с разной дисперсностью и минералогией позволяет достичь оптимального баланса между прочностью, адгезией, водопотребностью и усадкой, а также обеспечить совместимость с оригинальными строительными материалами памятников (известняк, доломит, мергель), улучшить реологические свойства за счет добавок типа бентонита или цемянки, обеспечить постепенное нарастание прочности и снижение риска термического растрескивания.

4. Все исследованные материалы (доломит, известняк, мергель, сланец, гипс, ангидрит, бентонит, цемянка) являются локальными для Юга России, что снижает логистические издержки, повышает экологичность и аутентичность PPC.

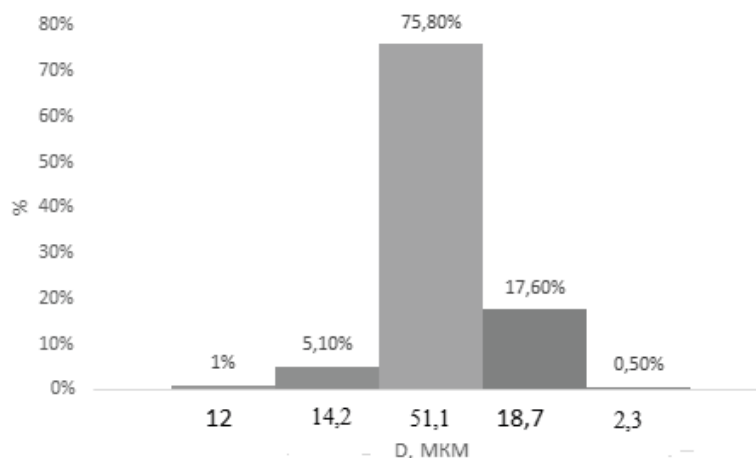


Рис. 8. Распределение частиц по размерам в суспензии доломита
Fig. 8. Particle size distribution in dolomite suspension

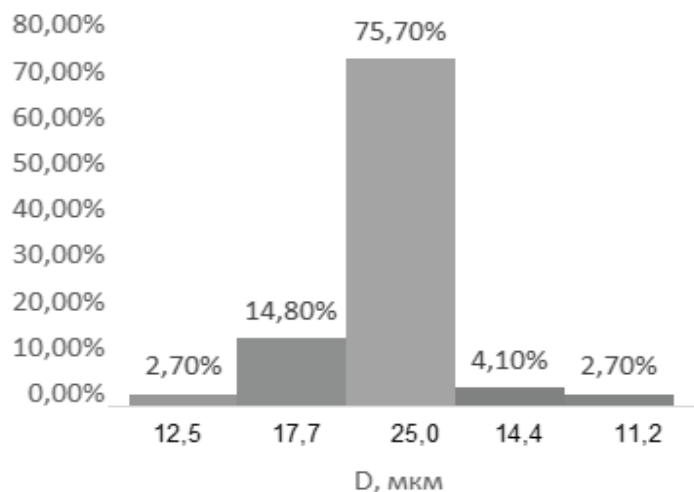


Рис. 9. Распределение частиц по размерам в суспензии бентонита
Fig. 9. Particle size distribution in bentonite suspension

5. На основании полученных результатов планируется создание образцов, включающих сочетания минеральных компонентов (известняк, доломит, мергель, гипс, ангидрит, бентонит и цемянка) с последующей оценкой физико-механических свойств – прочности, водопоглощения, адгезии и трещиностойкости, а также выявление оптимальных пропорций компонентов для конкретных практических задач и условий.

Список литературы

1. Савченко И.А., Батаев Д.К.-С., Даукаев А.А., Батаева П.Д. Восстановление городских памятников: ресурсный потенциал Северного Кавказа // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023. Т. 15. № 2 (56). С. 431–441. DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-431-441>. EDN: BGCYJY.
2. Батаева П.Д. Теория, технологии и организационные основы ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия [диссертация]. Москва, 2025. 456 с.
3. 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: монография. Грозный; Махачкала: АЛЕФ, 2025. 182 с.
4. Саламанова М.Ш. Исследование влияния добавки активного кремнезема на свойства вяжущих щелочной активации // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30>. EDN: VOETRC.
5. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
6. Lawrence M. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. Bath: University of Bath, 2006, 345 p.
7. 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, vol. 16, no. 4, 1638. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041638>.
8. Тейлор Х.Ф.У. Химия цемента. Пер. с англ. Москва: Мир, 1996. 560 с. ISBN: 5-03-002731-9.
9. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклнкерных композитов на вяжущем щелочной активации // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. EDN: ARDTXT.
10. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003, 682 p. ISBN: 978-0-444-51564-3.
11. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi Sh., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 114, pp. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
12. Jameson G.J. Advances in fine and coarse particle flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.2010.49.4.325>.
13. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 3. С. 10–14. EDN: PATBOZ.
14. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 8. С. 1241–1250. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250>. EDN: VJFNFX.
15. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Влияние активированного бентонита на свойства щелочных вяжущих материалов // *Строительные*

- материалы. 2023. № 8. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>. EDN: VDLOFI.
16. Батаева П.Д., Аларханова З.З., Батаева Х.М., Батаев А.Д. К вопросу о формировании свойств реставрационных составов на основе воздушных и гидравлических вяжущих веществ // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024. Т. 51. № 4. С. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190>. EDN: LQDWSL.
 17. ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. Москва: Госстрой России, 2004.
 18. ОСТ 41-08-249-85. Управление качеством аналитической работы. Подготовка проб и организация выполнения количественного анализа в лабораториях Мингео СССР. Общие требования. Москва, 1985.
 19. Ферронская А.В., Коряков В.Ф., Баранов И.М. Гипс в малоэтажном строительстве: монография. Москва: АСВ, 2008. 240 с.
 20. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве строительных материалов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2017. № 1 (12). С. 68–79. EDN: YINMZR.
 21. Кулуа К.А., Гуржи Н.Л. Перспективы применения композиционных материалов в строительной отрасли // *Передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность*: сб. науч. тр. Армавир, 26–27 апр. 2024 г., Тамбов, 2024. С. 129–132. EDN: TUIMNK.
 22. Эйриш М.В., Власов В.В., Гревцев В.А., Шляпкина Е.Н., Аухадеев Ф.Л. Кристаллохимические разновидности монтмориллонита и их диагностика в бентонитах. В: *Спектроскопия, рентгенография и кристаллохимия минералов*. Казань: КГУ, 1997. С. 154–160.
 23. Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Минеральные композиты на основе техногенного и природного сырья // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 6 (798). С. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-73-85>. EDN: ZCETEO.
 24. Саламанова М.Ш. Получение щелочного связующего из кремнеземистых добавок по упрощенной технологии // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 3. С. 341–351. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.3.341-351>. EDN: PYEYEC.
- References**
1. Savchenko I.A., Bataev D.K.-S., Daukaev A.A., Bataeva P.D. Restoration of urban monuments: the resource potential of the Northern Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15, no. 2 (56), pp. 431–441. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-431-441>. EDN: BGCYJY.
 2. Bataeva P.D. Theory, technologies and organizational bases of repair, restoration and reconstruction of cultural heritage sites [dissertation]. Moscow, 2025, 456 p. (In Russian).
 3. Sheina S.G., Bataev D.K.-S., Bataeva P.D., Bataeva Ya.D. Technologies and Materials for Enhancing the Life Cycle Resilience of Historical and Cultural Monuments: Monograph. Grozny; Makhachkala: ALEF, 2025, 182 p. (In Russian).
 4. Salamanova M.Sh. The influence of active microsilica additive on binding properties of alkaline activation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2022, no. 1, pp. 23–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30>. EDN: VOETRC.
 5. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
 6. Lawrence M. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. Bath: University of Bath, 2006, 345 p.
 7. 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, vol. 16, no. 4, 1638. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041638>.
 8. Taylor H.F.W. Chemistry of Cement. Translated from English. Moscow: Mir Publ., 1996, 560 p. (In Russian). ISBN: 5-03-002731-9.
 9. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Determination of the specific free surface energy of clinker-free composites on an alkaline activation binder. *Construction Materials*, 2022, no. 1–2, pp. 30–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. EDN: ARDTXT.
 10. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003, 682 p. ISBN: 978-0-444-51564-3.
 11. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi Sh., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 114, pp. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
 12. Jameson G.J. Advances in fine and coarse particle flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.2010.49.4.325>.
 13. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin Yu.S. Classification of active mineral additives for composite binders based on genesis. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2012, no. 3, pp. 10–14. (In Russian). EDN: PATBOZ.
 14. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Influence of mineral powders on the properties of binding systems. *Vestnik MGSU*, 2023, vol. 18, no. 8, pp. 1241–1250.

- (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250>. EDN: VJFNFX.
15. Murtazaev S.A.Y., Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Influence of activated bentonite on the properties of alkaline binders. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, 2023, no. 8, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>. EDN: VDLOFI.
 16. Bataeva P.D., Alarkhanova Z.Z., Bataeva Kh.M., Bataev A.D. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2024, vol. 51, no. 4, pp. 179–190. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190>. EDN: LQDWSL.
 17. State Standard R 52129-2003. Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004. (In Russian).
 18. OST 41-08-249-85. Quality Management of Analytical Work. Preparation of Samples and Organization of Quantitative Analysis in Laboratories of the USSR Ministry of Geology. General Requirements. Moscow, 1985. (In Russian).
 19. Ferronskaya A.V., Koryakov V.F., Baranov I.M. Gypsum in Low-Rise Construction: Monograph. Moscow: ASV Publ., 2008, 240 p. (In Russian).
 20. Falikman V.R. Nanomaterials and nanotechnology in the production of building materials. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2017, no. 1 (12), pp. 68–79. (In Russian). EDN: YINMZR.
 21. Kulua K.A., Gurzhi N.L. Prospects for the use of composite materials in the construction industry. In: *Advanced Technological Developments: Prospects for Implementation in Production and Efficiency: Collection of Scientific Papers*. Armavir, April 26–27, 2024. Tambov, 2024, pp. 129–132. (In Russian). EDN: TUIMHK.
 22. Airish M.V., Vlasov V.V., Grevtsev V.A., Shlyapkina E.N., Aukhadeev F.L. Crystallochemical varieties of montmorillonite and their identification in bentonites. In: *Spectroscopy, X-ray Diffraction and Crystallochemistry of Minerals*. Kazan: KSU, 1997, pp. 154–160. (In Russian).
 23. Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Mineral composites based on technogenic and natural raw materials. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2025, no. 6 (798), pp. 73–85. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-73-85>. EDN: ZCETEO.
 24. Salamanova M.Sh. Using a simplified technology to make an alkaline binder from silica additives. *Vestnik MGSU*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 341–351. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.3.341-351>. EDN: PYEYEC.

Информация об авторах / Information about the authors

Дена Карим-Султанович Батаев, д-р техн. наук, профессор, директор, ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный

e-mail: denabataev61@mail.ru

Dena K.-S. Batayev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director, Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

e-mail: denabataev61@mail.ru

Роман Суламбекович Джамбулатов✉, канд. ф.-м. наук, заведующим отделом физико-математических исследований, ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный

e-mail: asldzam@mail.ru

Roman S. Dzhambulatov✉, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Mathematical Research, Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

e-mail: asldzam@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author