

Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных КОМПОЗИТОВ

Андрей Александрович Леденев¹, Виктор Тихонович Перцев²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»); г. Воронеж, Россия;

² Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов, является актуальной задачей современной технологии бетонов, включающих многокомпонентные смеси и добавки. Решение данной задачи предусматривает применение методов количественной оценки структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования. Цель работы — развитие методологии исследований на основе анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования, направленной на повышение эффективности технологии цементных композитов и бетонов.

Материалы и методы. Анализ структурообразования дисперсных систем и цементных композитов проводили на основе модели фрактальных кластеров и теории протекания (перколяции). Применяли физико-химические методы — оптическую и электронную микроскопию, вискозиметрию, определение активности; компьютерное и математическое моделирование; физико-механические испытания.

Результаты. Обоснованы направления развития методологии исследований на основе системного подхода, отличающегося применением модели фрактальных кластеров, для установления количественных показателей на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования. Структурно-феноменологический анализ дисперсных систем и композитов позволил уточнить и дополнить представления о механизме их структурообразования. Установлены количественные зависимости между фрактально-кластерными процессами на микроуровне и свойствами с учетом дисперсности, природы и характеристик поверхности минеральных компонентов в составе цементных композитов. На базе метода исследования структурообразования на мезо- и макроуровнях, базирующегося на геометрическом моделировании плотных упаковок, скорректирован гранулометрический состав заполнителей для получения более плотной структуры бетона.

Выводы. Методология исследований расширяет возможности управления структурообразованием и прогнозирования формирующихся структур цементных композитов. На основе системных исследований от микро- до макроуровня с оценкой эффективности минеральных компонентов в составе органоминеральных добавок, а также оптимизации гранулометрического состава заполнителей получены цементные бетоны с улучшенными физико-механическими свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные композиты, дисперсные системы, методология исследований, структурообразование, фрактально-кластерные структуры, масштабные уровни структуры, цементные бетоны

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Леденев А.А., Перцев В.Т. Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 541–559. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.541-559

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Леденев, ledenoff@mail.ru.

Development of a research methodology aimed at controlling the formation of the microstructure of cement composites

Andrey A. Ledenev¹, Victor T. Pertsev²

¹ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh); Voronezh, Russian Federation;

² Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of a research methodology aimed at controlling the structural formation of cementitious composites is a pressing challenge in modern concrete technology, which involves multi-component mixtures and addi-

tives. Addressing this challenge requires the application of methods for the quantitative assessment of structure and properties at various scales and stages of structural formation. The aim of this work is to develop a research methodology based on the analysis and identification of patterns in the formation of structure and properties at various scales and stages of structure formation, aimed at improving the efficiency of cement composite and concrete technology.

Materials and methods. The analysis of the structural formation of dispersed systems and cement composites was carried out using a fractal cluster model and percolation theory. The following physicochemical methods were employed: optical and electron microscopy, viscometry, and activity determination; as well as computer and mathematical modelling; and physical and mechanical testing.

Results. The paper outlines directions for the development of research methodology based on a systems approach, characterized by the application of a fractal cluster model, to establish quantitative indicators at various scales and stages of structure formation. A structural-phenomenological analysis of dispersed systems and composites has made it possible to refine and supplement our understanding of the mechanism of their structure formation. Quantitative relationships have been established between fractal-cluster processes at the micro-level and properties, taking into account the dispersion, nature and surface characteristics of the mineral components in cement composites. Based on a method for investigating structure formation at the meso- and macro-levels, which relies on geometric modelling of close-packed structures, the particle size distribution of aggregates has been adjusted to achieve a denser concrete structure.

Conclusions. This research methodology expands the scope for controlling the formation of structures and predicting the resulting structures of cement composites. Based on systematic studies ranging from the micro- to the macro-level, involving an assessment of the effectiveness of mineral components in organo-mineral additives, as well as the optimization of the particle size distribution of fillers, cement concretes with improved physical and mechanical properties have been produced.

KEYWORDS: cement composites, dispersed systems, research methodology, structure formation, fractal cluster structures, structural scales, cement based concretes

FOR CITATION: Ledenev A.A., Pertsev V.T. Development of a research methodology aimed at controlling the formation of the microstructure of cement composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):541-559. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.541-559 (rus.).

Corresponding author: Andrey A. Ledenev, ledenoff@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Управление структурообразованием цементных композитов относится к числу актуальных направлений повышения эффективности технологии бетона. Феноменологические подходы, основанные на регулировании рецептурно-технологических факторов с оценкой показателей структуры и свойств, дают возможность решить широкий круг технологических задач. Однако зачастую результаты исследований на отдельных масштабных уровнях, например на нано- или микроуровнях, сразу переносятся на уровень готового изделия без совместного рассмотрения и учета характерных процессов, протекающих на более крупных мезо- и макроуровнях. Это не позволяет системно оценить взаимосвязь процессов структурообразования и свойств. Развитие методологии исследований может быть реализовано на основе системного структурно-феноменологического анализа процессов, протекающих на всех этапах структурообразования и различных масштабных уровнях.

В системе цементных композитов от микроуровня (10^{-7} – 10^{-5} м; 0,1–10 мкм) до мезоуровня (10^{-5} – 10^{-3} м; 10–1000 мкм) характерны процессы самоорганизации при взаимодействии частиц компонентов с дисперсионной средой за счет влияния поверхностных сил физико-химической природы. Структурообразование существенно отличается от классических представлений механики грубо-дисперсных систем с образованием не отдельных элементов, а неоднородных фрактально-кластерных систем, отличающихся наличием агрегатов частиц твердой фазы (рис. 1) [1]. При этом сформирован-

ные связнодисперсные (сухие) системы (рис. 1, *a*), а также коагуляционные (обводненные) системы (рис. 1, *b*) сохраняются в кристаллизационных (затвердевших) системах (рис. 1, *c*), что сказывается на проявлении свойств цементного композита.

С практической точки зрения важность развития методов проектирования состава и подбора компонентов, обеспечивающих формирование эффективных структур, проявляется в современной технологии цементных бетонов. Согласно положениям фундаментальных и прикладных наук, дальнейшее развитие технологии невозможно без применения многокомпонентных смесей, включающих комплекс химических добавок, минеральных компонентов, органоминеральных добавок, микро- и наноструктурирующих материалов [2–8].

Значимая роль в управлении структурообразованием цементных композитов отводится минеральным компонентам. При их применении существенно изменяется структурная топология — системообразующим элементом является цементно-минеральная система, включающая высокодисперсные частицы [2, 3, 8–11]. Имеющаяся база научно-практических данных по использованию минеральных компонентов для получения органоминеральных добавок активно развивается, несмотря на большое количество исследовательских работ в этом направлении. Основные компоненты в производстве органоминеральных добавок — микрокремнезем и его разновидности [2]. Получены сведения по применению комплексных добавок на основе материалов природного и техногенного происхождения, таких как вулканогенно-осадочные породы, диатомит, известняк,

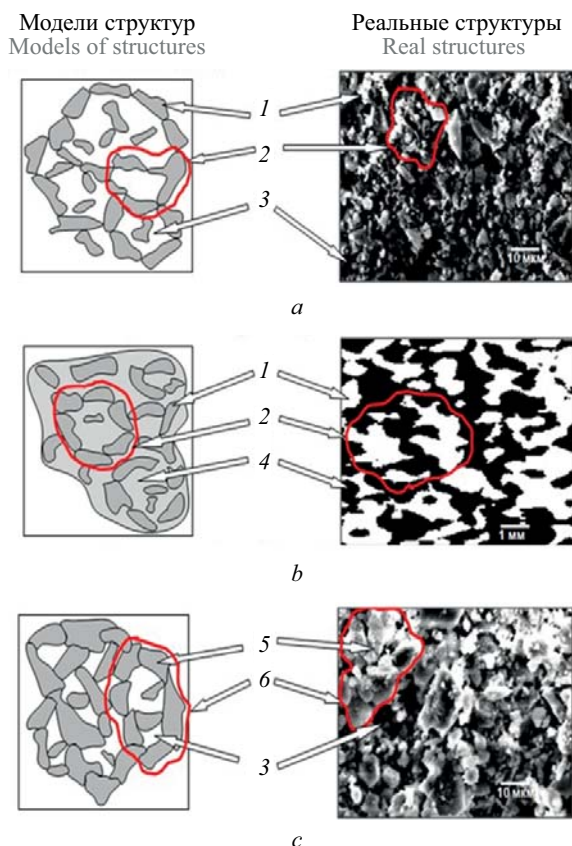


Рис. 1. Модельные и реальные структуры дисперсных систем: *a* — связнодисперсные (сухие) системы; *b* — коагуляционные (обводненные) системы; *c* — кристаллизационные (затвердевшие) системы; 1 — частица твердой фазы; 2 — агрегат частиц; 3 — поры; 4 — дисперсионная среда; 5 — дисперсная фаза; 6 — агрегат твердой фазы

Fig. 1. Model and real structures of dispersed systems: *a* — cohesive-dispersed (dry) systems; *b* — coagulation (hydrated) systems; *c* — crystallization (solidified) systems; 1 — solid-phase particle; 2 — aggregate of particles; 3 — pores; 4 — dispersion medium; 5 — dispersed phase; 6 — solid-phase aggregate

зола-унос, метакаолин и др. [12–16]. Проведены исследования по влиянию глинистых и карбонатных пород в составе минеральных добавок (МД) на процессы гидратационного структурообразования и свойства цементных систем [17].

Проведенный анализ показал, что, как правило, при изучении процессов формирования структуры выделяется роль «химического» фактора взаимодействия активных минеральных добавок с продуктами гидратации, а также «физического» фактора уплотнения микроструктуры цементного композита тонкодисперсными компонентами. Однако механизм структурообразования гетерогенной цементной системы, включающей минеральные компоненты, отличается многофункциональностью и разнонаправленностью, что сказывается на физико-химической активности и эффективности применения. Как было отмечено, вследствие высокой поверхностной активности

реализуются межчастичные и межфазные взаимодействия, способствующие формированию агрегированных фрактальных кластеров, которые рассматриваются как структурные элементы новой фазы, определяющие свойства всей системы (см. рис. 1). При этом существующие подходы к оценке микроструктуры, основанные на анализе формирования элементов относительно правильной геометрической формы в уже сформированной системе, не в полной мере соответствуют реальным композитам.

Развитие методологии исследования цементных композитов как дисперсно-неупорядоченных систем может быть реализовано на базе концепции фрактально-кластерной геометрии, теории протекания, которые ранее использовались для строительных композитов различного назначения, а также обводненных дисперсных систем [1, 18, 19]. Однако применительно к цементным композитам существует ряд проблемных вопросов: фрактальность рассматриваемых объектов оценивается различными методами в зависимости от иерархического уровня структуры, что требует единого методического подхода; необходимо количественное описание условий и механизмов формирования фрактальных кластеров от ранней стадии структурообразования к готовой структуре.

Решение данных вопросов позволит расширить имеющиеся возможности научно-обоснованного управления и прогнозирования формирующихся структур на микроуровне с учетом влияния дисперсности, природы, свойств поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов, в том числе с применением эффективных материалов на основе местной, доступной сырьевой базы различных регионов.

При структурообразовании цементных композитов и бетонов в масштабе от мезо- до макроуровня (10^{-3} м; более 1000 мкм) определяющими становятся процессы, характерные для грубодисперсных зернистых систем — межчастичные и межагрегатные взаимодействия, относительное движение частиц, формирование плотных упаковок. В таких системах роль поверхностных сил и взаимодействий снижается, механизмы формирования структуры обусловлены инерционными (массогабаритными) характеристиками — формой, размерами, гранулометрическим составом частиц мелкого и крупного заполнителей. Зачастую для природных заполнителей свойственно избыточное содержание мелкой фракции, что приводит к разуплотнению системы, или ее недостаточное количество для заполнения межзерновых пустот. В этом случае задача управления структурообразованием в части получения эффективной (более плотной) структуры может быть решена за счет применения методов анализа структуры, основанных на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок. Увеличение плотности при снижении пустотности

упаковки наполнителей оптимизированного состава на этапе раннего структурообразования обеспечит улучшение физико-технических свойств бетонных смесей и бетонов.

Таким образом, системный анализ на различных масштабных уровнях — от микро- до макроуровня, а также этапах — от раннего структурообразования до затвердевшей системы является одним из аспектов развития методологии исследований. Получение новых количественных данных, объединяющих вид структуры, геометрическое построение, структурные показатели и свойства, даст возможность расширить представления о механизме взаимодействия компонентов, что станет научно-практическим заделом дальнейшего совершенствования составов и технологии цементных композитов и бетонов.

Цель работы — развитие методологии исследований на основе анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования, направленной на повышение эффективности технологии цементных композитов и бетонов.

Задачи:

1) обоснование направлений развития методологии и методов исследований на основе применения модели фрактальных кластеров для анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств дисперсных систем и цементных композитов на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования;

2) структурно-феноменологический анализ взаимосвязи структурообразования и свойств дисперсных систем и цементных композитов с использованием комплекса физико-химических методов исследований и моделирования;

3) анализ и установление количественных взаимосвязей между показателями структуры и свойствами, позволяющих расширить представления о механизме структурообразования и прогнозировать вид формирующихся структур с учетом характеристик компонентов цементных композитов и бетонов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках развития методологии исследований решение задач управления структурообразованием цементных композитов во многом связано с применением методов количественной оценки структуры дисперсных систем, характеризующихся наличием частиц и агрегатов с неоднородной поверхностью в виде микродефектов, конденсированных сред и межфазных границ (рис. 2) [1, 18, 19].

В работе исследуемые структуры рассмотрены в рамках модели фрактальных кластеров, обладающих свойством масштабной инвариантности, физический смысл которых описывается скейлинговой зависимостью [1]:

$$N \sim R^D, \quad (1)$$

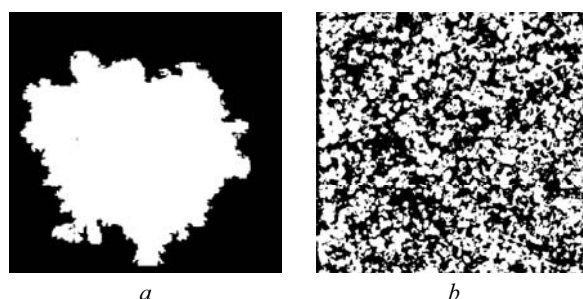


Рис. 2. Фрактальные структуры песка: *a* — отдельная частица ($\times 1250$); *b* — агрегированные частицы при $120 \text{ m}^2/\text{kg}$ ($\times 4$) [19]

Fig. 2. Fractal structures of sand: *a* — a single particle ($\times 1,250$); *b* — aggregated particles at $120 \text{ m}^2/\text{kg}$ ($\times 4$) [19]

где N — число частиц, образующих фрактальный кластер; R — размер фрактального кластера (величина масштаба); D — фрактальная размерность структуры (показатель фрактальности).

В отличие от топологического показателя «абсолютно плотного» (компактного) пространства d — «евклидовой» размерности, показатель фрактальности D имеет дробную размерность (рис. 3). Если количество частиц N в окружности радиуса R формирует компактную структуру с размерностью $d = 2$, тогда $N \sim R^d$ (рис. 3, *a*). Для фрактальной структуры — $N \sim R^D$ (рис. 3, *b*), при этом показатель фрактальности изменяется в диапазоне $D = 1-2$. Неоднородный характер фрактальной структуры проявляется в изменении свойств исследуемых систем и композитов, таких как плотность, прочность и др. [1, 19].

Технически показатель фрактальности может быть определен различными методами, сущность которых состоит в разбиении области, соответствующей R , на отдельные элементы изображения (квадраты или клетки), и рассчитывается число элементов N , связанных с фракталом [1]. После чего строится прямая $N(R)$ в двойных логарифмических координатах,

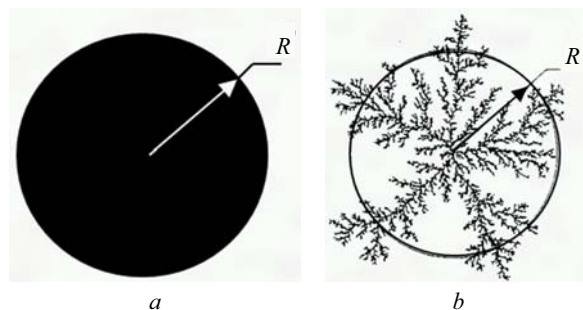


Рис. 3. Компактная структура с размерностью пространства $d = 2$ (*a*) и фрактально-кластерная структура с показателем фрактальности $D = 1,71$ (*b*) [19]

Fig. 3. Compact structure with dimensions of a quantity of space $d = 2$ (*a*) and fractal-cluster structure with an index fractal $D = 1.71$ (*b*) [19]

тангенс угла наклона которой будет соответствовать фрактальности D согласно зависимости:

$$D = \frac{\Delta \ln N}{\Delta \ln R}. \quad (2)$$

В дисперсных системах и композитах фрактальные объекты формируются как в виде отдельных кластеров, так и в виде перколяционного («бесконечного») кластера, определяющего свойства всей системы. Опираясь на существующие положения фрактальной геометрии, статистической физики, теории протекания, в качестве показателей структуры применяли [1]:

- показатель фрактальности ($D = 1-2$ для двухмерных и $D = 2-3$ трехмерных объектов) — основная количественная характеристика, показывающая степень заполнения пространства неоднородных систем, обладающих самоподобием (инвариантностью) на различных масштабных уровнях;
- концентрация кластеров (φ, φ^*) — соответствует условиям формирования сети фрактальных кластеров в дисперсной системе;
- межкластерная пустотность P_c — характеризует степень пустотности фрактального кластера;
- порог протекания v_c — критическая доля сфер (частиц) от общего объема фрактальной системы, соответствующая переходу от конечных кластеров к «бесконечному»;
- координационное число z — соответствует числу контактов элемента структуры в системе;
- плотность упаковки частиц μ — характеризует размещение элементов в системе;
- тип пространственной решетки кластера или топология — характеризует геометрическую структуру кластера, решетчатую упаковку.

Исследования проводили с применением современных физико-химических методов и моделирования, что позволило системно рассмотреть взаимосвязь качественных и количественных характеристик структуры на различных масштабных уровнях (от микро- до макроуровня) и этапах структурообразования.

В работе применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Осколцемент» (ГОСТ 31108–2020); дисперсность $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; минералогический состав (масс. %) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ — 68,98; $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ — 10,87; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ — 8,77; $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ — 11,38.

Исследуемыми материалами, модифицирующими микроструктуру цементных композитов, являлся комплекс минеральных компонентов:

- песок кварцевый молотый (песок) месторождения Воронежской области, дисперсностью $S_{уд} = 50-700 \text{ м}^2/\text{кг}$ с содержанием $\text{SiO}_2 = 98 \%$;
- зола-унос ТЭЦ (зола), г. Воронеж, $S_{уд} = 50-700 \text{ м}^2/\text{кг}$, химический состав представлен $\text{SiO}_2 = 63 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18 \%$, $\text{CaO} = 10 \%$, прочее 9% ;

- активированный диатомит (биокремнезем) производства ООО «Торговый Дом «ВЕФТ»», г. Королев, $S_{уд} = 2000 \text{ м}^2/\text{кг}$; содержание $\text{SiO}_2 = 88 \%$.

Минеральные компоненты применяли как отдельно, так и комплексно в составе органоминеральных добавок совместно с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ) пластифицирующего действия на основе поликарбоксилатов — Melflux 2651F и SikaViscoCrete-240 HE Plus. Дозировка минеральных компонентов составляла 5–20 %, добавок ПАВ 0,6–0,8 % от массы цемента.

При исследовании сухих дисперсных систем — минеральных компонентов композита в качестве структурных характеристик определяли показатели межкластерной пустотности P_c , плотности упаковки μ . Также устанавливали координационное число пространственной решетки сформированной системы z , связанное с пористостью и плотностью, на основе зависимости [1]:

$$z = \frac{\mu}{0,085}, \quad (3)$$

где μ — плотность упаковки сформированной дисперсной системы (определяли по отношению насыпной плотности ρ_n к плотности частиц твердой фазы ρ).

Исследование физико-химической активности минеральных компонентов выполняли по методике поглощения извести, аналогичной ранее действующему ГОСТ 6269. В ходе испытаний готовили серию титровальных растворов извести и соляной кислоты. Используя кислотно-щелочной индикатор, оценивали физико-химическую активность компонентов при различной степени дисперсности. Активность устанавливали в расчете на единицу массы частиц — г/кг, также рассчитывали удельную активность единицы площади поверхности — г/м². По полученным результатам строили графические зависимости активности (по поглощению извести) от дисперсности.

Моделирование динамики структурообразования обводненных дисперсий проводили с применением компьютерной программы Maple. В ходе моделирования определяли количественные характеристики микроструктуры, такие как показатель фрактальности D и концентрация кластеров φ^* на основе решения следующей системы уравнений [1]:

$$\frac{\eta_{эфф}(\varphi, \tau)}{\eta_0} = \frac{1 - \varphi_A}{(1 - \varphi_A / \varphi^*)}; \quad (4)$$

$$\varphi_A \approx \varphi \left[1 + \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{1/2} \right]^{3-D},$$

где $\eta_{эфф}(\varphi, \tau)$ — «эффективная» вязкость кластерной суспензии; η_0 — вязкость жидкой фазы; φ — концентрация твердой фазы; φ_A — «эффективная» концентрация кластеров; φ^* — критическая концентрация кластеров; τ_0 — предельное напряжение сдвига; τ — напря-

жение сдвига; D — показатель фрактальности системы.

Структурные показатели D и ϕ^* находили обратным пересчетом, используя уравнения (4) и экспериментальную зависимость, полученную методом ротационной вискозиметрии (на приборах РВ-4 и VB-2000):

$$\eta_{эфф} = f(\tau). \quad (5)$$

Исследование структуры поверхности сухих частиц и обводненных дисперсных систем на основе минеральных компонентов осуществили оптическим методом на установке, состоящей из микроскопа Biolam D-12 и цифрового фотоаппарата Olympus SP-500 UZ. Установка позволяла получить изображения структуры при увеличении до 500 раз с разрешением до 300 пикс/дюйм.

Оценивали взаимосвязи структурно-топологических и прочностных показателей цементных композитов с помощью методов и моделей теории протекания [1]. При моделировании выявляли условия, обеспечивающие усиливающий эффект повышения прочности за счет создания в структуре композита перколяционного кластера — каркаса, определяющего его свойства. Количественным показателем, характеризующим критическую долю (объемное содержание) минерального компонента в структуре композита, соответствующую переходу от конечных кластеров к бесконечному, служил порог протекания v_c в соответствии с зависимостью [1]:

$$v_c = \frac{N\pi d^3}{6}, \quad (6)$$

где N — число сфер (моделей) частиц твердой фазы минерального компонента; d — эквивалентный диаметр частиц минерального компонента.

Визуализацию и определение показателей структуры цементного композита, наполненного минеральными компонентами, проводили путем компьютерного моделирования в программе Unity3d. Создавались модели частиц твердой фазы, вводились расчетные значения характеристик компонентов — плотность; диаметр; объемное и массовое содержание и др. На основании этих данных рассчитывали соотношение частиц цемента и минерального компонента c , близкое к значению порога протекания v_c , соответствующего наибольшей прочности цементного композита. Значение показателя c при различном соотношении компонентов устанавливали в соответствии с зависимостью:

$$c = n_{mk}/n_c, \quad (7)$$

где n_{mk} , n_c — концентрации (счетные) частиц минерального компонента и цемента определяли согласно зависимостям:

$$n_{mk} = \frac{6m_{mk}}{\pi d_{mk}^3 \rho_{mk}}; \quad (8)$$

$$n_c = \frac{6m_c}{\pi d_c^3 \rho_c}, \quad (9)$$

где m_{mk} , m_c — доля частиц минерального компонента и цемента; d_{mk} , d_c — эквивалентный диаметр частиц минерального компонента и цемента; ρ_{mk} , ρ_c — плотность частиц минерального компонента и цемента.

Прочность цементного композита (цементного камня) на сжатие $R_{сж}$ оценивали на образцах $2 \times 2 \times 2$ см. Для композита, включающего только минеральные компоненты, испытания проводили при постоянном В/Ц = 0,36. При использовании органо-минеральных добавок — при постоянной реологической характеристике, равной 13–14 см по Суттарду.

После испытаний на прочность путем шлифования разрушенных образцов готовили пробы размером $0,5 \times 0,5 \times 0,2$ см для анализа микроструктуры композита с применением сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Методом сканирующей микроскопии на установке Jeol jsm-6380LV получали микрофотографии структуры при увеличении в 2000 раз. Электронные изображения использовали для фрактального анализа микроструктуры. Количественное определение показателя фрактальности D осуществляли методом «островов среза» («периметр – площадь») в программе Fractall.Stat 3.1 [20]. Для реализации данного метода электронное изображение микроструктуры преобразовывали в черно-белое, затем последовательно разбивали на фрагменты (островки или клетки) и рассчитывали площадь плотных зон и периметр для каждого выделенного фрагмента. Показатель D рассчитывали как тангенс угла наклона зависимости периметра плотных зон от их площади, построенной в двойных логарифмических координатах, в соответствии с выражением (2). Методом атомно-силовой микроскопии на установке NanoEducator получали трехмерные изображения поверхности структуры цементного композита, по которым количественно оценивали показатель микрошероховатости (s , мкм), косвенно связанный с фрактальностью. Площадь участка сканирования структуры поверхности составляла 80 мкм^2 .

Анализ структурообразования грубодисперсных систем при переходе от мезо- к макроуровню осуществляли методом «Вороного – Делоне» (Voronoi – Delaunay) для получения эффективной (более плотной) структуры дисперсно-зернистой системы [19]. Метод основан на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок оптимального гранулометрического состава заполнителей, в соответствии с которым новые сферы наилучшим образом заполняют промежутки между уже существующими сферами (рис. 4).

Для моделирования структурообразования применяли универсальное массовое распределение частиц по размерам с учетом фрактальности системы [19]:

$$m(r) \sim r^{-D+2}, \quad (10)$$

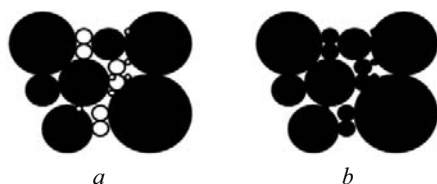


Рис. 4. Модель заполнения межзерновых пустот при получении плотной упаковки дисперсно-зернистой системы: *a, b* — этапы «конструирования» [19]

Fig. 4. A model for the filling of intergranular voids during the formation of a dense packing in a granular system: *a, b* — “construction” stages [19]

где $m(r)$ — массовое распределение частиц по размерам; r — средний размер частиц, мм; D — показатель фрактальной размерности (для исследований применяли $D = 2,3–2,7$).

В ходе моделирования рассчитывали соотношения фракций песка, при которых поровое пространство более крупных зерен заполнялось частицами с меньшим размером. Значения $m(r)$ рассчитывали для средних радиусов $r_{\max} = 3,75$ мм, $r_{\min} = 0,238$ мм. Подставляя полученные значения r_i в уравнение (10), находили долю каждой фракции частиц песка $m(r_i)$ с учетом коэффициента $k_i = m(r_i)/m(r_1)$. Произведение коэффициентов на содержание фракции в песке исходной (природной) гранулометрии давало скорректированное количество каждой фракции песка.

На основании полученных данных в ходе испытаний корректировали гранулометрический состав мелкого заполнителя (природного кварцевого песка Стрелецкого месторождения Воронежской области) и определяли оптимальное соотношение фракций песка по максимальной плотности системы в насыпном ρ_n и уплотненном $\rho_{\text{упл}}$ состоянии при различной фрактальности системы D . Зерновой состав и модуль крупности $M_{\text{кр}}$ заполнителя устанавливали на стандартном наборе сит (ГОСТ 8735–88).

Прочность бетона с использованием фракционированного песка и гранитного щебня (фракции 5–10 мм) определяли по стандартной методике (ГОСТ 10180–2012) на гидравлической испытательной установке INSTRON (модель 1500HDX).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований сухих систем установлено, что для тонкодисперсных частиц существенно меняются условия и механизмы структурообразования. В отличие от грубодисперсных частиц, преобладающими являются молекулярно-электростатические силы и поверхностные взаимодействия физико-химической природы, способствующие формированию агрегированных фрактально-кластерных структур. С увеличением дисперсности осуществляется структурный переход от отдельных частиц и агрегатов (рис. 5, модель структуры — *I*) к сети взаимосвязанных (перколяционных) фрак-

тальных кластеров (рис. 5 — модель *II*). При этом с увеличением их размеров они становятся более разветвленными и менее плотными, что соотносится с изменением показателей структуры и свойств системы. Установлено, что при дисперсности до $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$ формируются системы, характеризующиеся существенными перестроениями: с повышенной кластерной пустотностью $P_c = 86 \%$, меньшим количеством межчастичных контактов $z = 2–3$; плотностью упаковки $\mu = 0,14$, что соотносится со значительным снижением насыпной плотности ρ_n до $350 \text{ кг}/\text{м}^3$ (табл. 1).

Как и ожидалось, рост дисперсности значительно влияет на проявление физико-химической активности минеральных компонентов и определяется природой, свойствами поверхности частиц твердой фазы. При этом наблюдается противоречие: активность в расчете на единицу массы — $\text{г}/\text{кг}$ возрастает, в то же время активность единицы площади поверхности частиц — $\text{г}/\text{м}^2$ снижается (рис. 6). Такое проявление свойств во многом обеспечивается за счет энергетического потенциала частиц в области дисперсности, соответствующей формированию агрегированных фрактально-кластерных систем, что соотносится с изменением структурных показателей (см. рис. 5, табл. 1). Исходя из позиции термодинамики, за счет процессов агрегирования избыточная поверхностная энергия частиц твердой фазы снижается, в результате чего дисперсная система меняет энергетические характеристики и физико-химическую активность в целом.

Полученные данные показали, что при обеспечении требуемых свойств цементных композитов важно на начальной стадии для связнодисперсных (сухих) систем использовать максимальный потенциал минеральных компонентов. С увеличением дисперсности меняются условия структурообразования, что может приводить как к улучшению свойств, так и к нежелательным эффектам: увели-

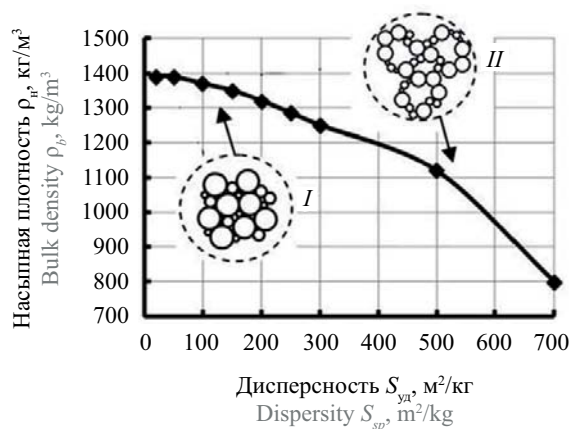


Рис. 5. Зависимость насыпной плотности от дисперсности песка: *I, II* — модели структур

Fig. 5. The relationship between bulk density and sand particle size distribution: *I, II* — structural models

Табл. 1. Показатели структуры и свойств сухих дисперсных систем

Table 1. Indicators of the structure and properties of dry dispersed systems

Минеральный компонент Mineral component	Показатели структуры и свойств Structure factor and properties				
	Дисперсность $S_{уд}$, м ² /кг Dispersity S_{sp} , м ² /kg	Межкластерная пустотность P_c , % Intercluster void fraction P_c , %	Плотность упаковки μ Package density μ	Координационное число z Coordination number z	Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³ Bulk density ρ_b , kg/m ³
Песок Sand	300	52	0,48	5–6	1250
	500	58	0,42	4–5	1100
	700	70	0,30	3–4	800
Биокремнезем Biosilica	2000	86	0,14	2–3	350

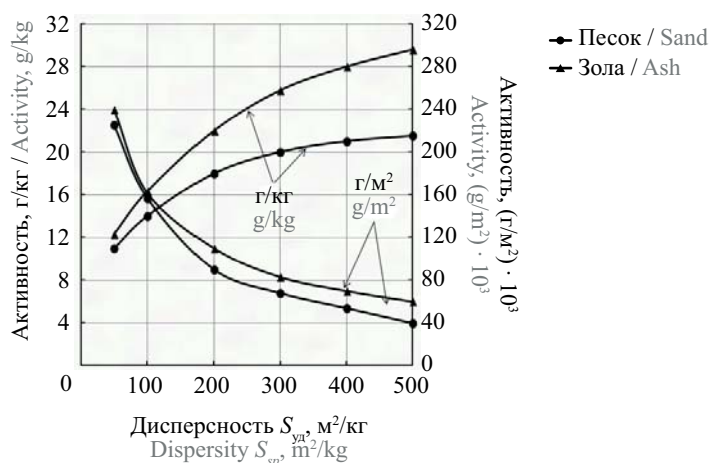


Рис. 6. Зависимость физико-химической активности (по поглощению извести) от дисперсности минеральных компонентов

Fig. 6. The relationship between physicochemical activity (as measured by lime absorption) and the fineness of mineral components

чению водопотребности, повышению расхода ПАВ на диспергирование, замедлению сроков схватывания и ухудшению свойств цементных композитов. Применение компонентов с дисперсностью выше определенных значений нецелесообразно и с позиции технико-экономической эффективности. С учетом особенностей структурообразования, проявления свойств и физико-химической активности актуально применение минеральных компонентов с рациональными значениями дисперсности, обеспечивающими улучшение физико-технических свойств цементных композитов и бетонов.

В обводненных системах фрактально-кластерные структуры сохраняются за счет капиллярно-плочных взаимодействий на границе раздела фаз, однако меняется вид их геометрического построения при внешних воздействиях. Исходя из модельных представлений, с ростом напряжений сдвига в микрогетерогенной составляющей смесей проявляется «кластерный» характер структурообразова-

ния и изменения свойств, отличающийся от классических положений реологии дисперсных систем (рис. 7). При значениях напряжений больше предельного напряжения сдвига τ_0 отмечается первоначальное снижение «эффективной» вязкости $\eta_{эфф}$ за счет разрушения перколяционного фрактального кластера на отдельные агрегаты (рис. 7, а, участок кривой 1–2). Минимальные значения вязкости $\eta_{эффmin}$ проявляются при разрушении межагрегатных связей (рис. 7, а, участок 2–3). При дальнейшем росте напряжений происходит полный разрыв связей с формированием мелких кластеров и отдельных частиц, что приводит к повышению внутреннего трения и увеличению вязкости (рис. 7, а, участок 3–4). Дальнейший рост напряжений вновь приводит к снижению вязкости за счет разрыва сплошности дисперсии (рис. 7, а, участок 4–5).

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 8, соотносятся с модельными представлениями о механизме структурно-

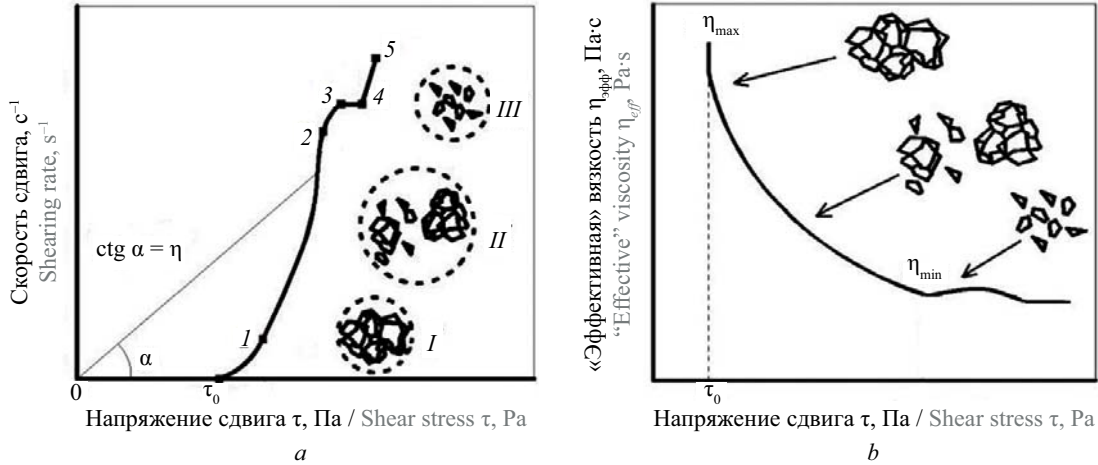


Рис. 7. Модельные зависимости скорости сдвига (а) и «эффективной» вязкости (b) от напряжения сдвига: I, II, III — модели структур

Fig. 7. Model dependencies of shear rate (a) and 'effective' viscosity (b) on shear stress: I, II, III — structural models

реологического поведения обводненных дисперсий с учетом фрактально-кластерных процессов формирования и разрушения агрегированной структуры в условиях изменяемого напряжения сдвига. Установлено наличие участков нелинейного изменения вязкости при высоких значениях напряжений сдвига. Особенности механизма структурообразования также подтверждаются результатами оптических исследований на примере системы «песок – вода» (рис. 9).

На основе анализа экспериментальных данных (см. рис. 8) и моделирования на основе зависимости (4) оценено влияние свойств частиц твердой фазы на изменение показателей структуры дисперсных систем. Обобщенные данные представлены в табл. 2, 3.

Установлена взаимосвязь реологических показателей τ_0 и $\eta_{эфф\min}$ с показателями структуры на микро-

уровне — концентрацией кластеров φ^* и фрактальностью D (табл. 2). Показано, что закономерный рост τ_0 и $\eta_{эфф\min}$ при увеличении дисперсности с 300 до 700 м²/кг является следствием изменения характера формирующихся фрактально-кластерных структур в масштабах отдельных частиц и агрегатов при повышении значений φ^* с 0,65 до 0,87. При этом меняется вид геометрического построения обводненной системы при уменьшении показателя D с 2,7 до 2,45, соответствующего формированию более разветвленной микроструктуры с понижением плотности системы ρ_v с 2004 до 1910 кг/м³.

Также установлено, что процессы структурообразования в значительной степени определяются видом, строением и фрактальными свойствами поверхности частиц твердой фазы. Это проявляется в изменении реологических свойств: τ_0 увеличивается с 58 Па для системы «песок –

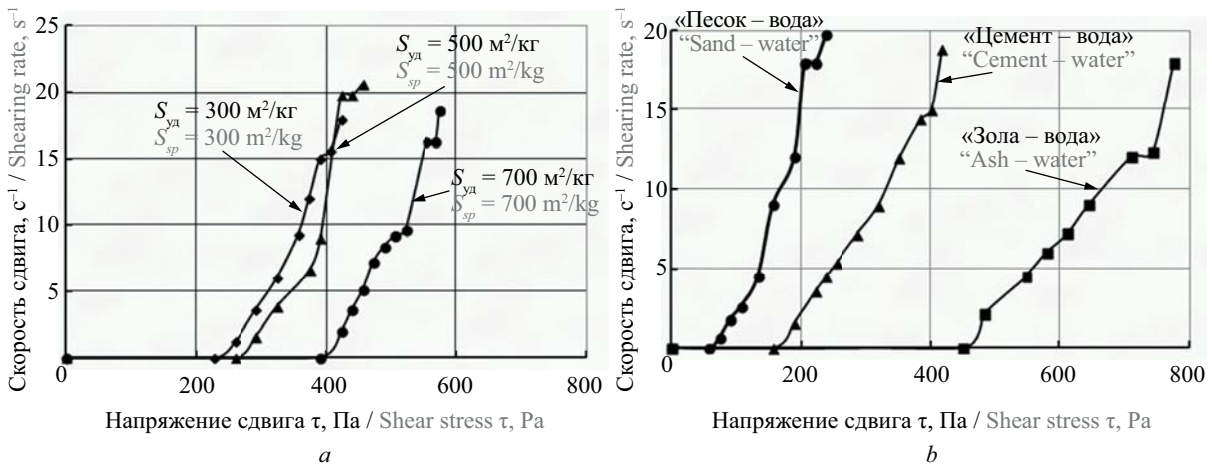


Рис. 8. Экспериментальные зависимости скорости сдвига от напряжения сдвига: а — для песка различной дисперсности при В/Т = 0,28; б — для различных систем при В/Т = 0,32; $S_{ya} = 500$ м²/кг

Fig. 8. Experimental relationships between shear rate and shear stress: а — for sand of various dispersity at W/S = 0.28; б — for various systems at W/S = 0.32; $S_{sp} = 500$ м²/kg

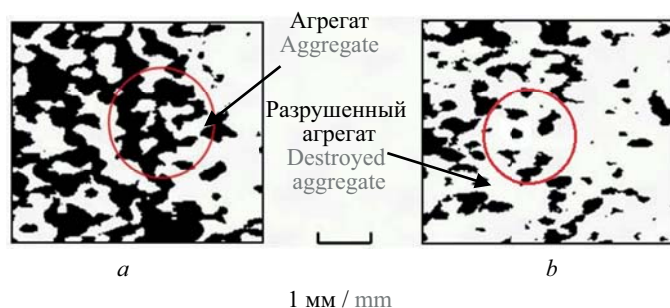


Рис. 9. Изменение структуры системы «песок – вода» ($\times 10$): *a* — в покое; *b* — при сдвиге

Fig. 9. Structural change of system “sand – water” ($\times 10$): *a* — at rest; *b* — under shear

Табл. 2. Показатели структуры и свойств системы «песок – вода» при различной дисперсности ($B/T = 0,28$)

Table 2. Structure factor and properties of system “sand – water” at various dispersity ($W/S = 0.28$)

Показатели структуры и свойств Structure factor and properties	Дисперсность S_{yd} , м ² /кг / Dispersity S_{sp} , м ² /kg		
	300	500	700
Критическая концентрация кластеров φ^* Critical concentration of clusters φ^*	0,65	0,73	0,87
Показатель фрактальности системы D Index fractal of system D	2,7	2,65	2,45
Предельное напряжение сдвига τ_0 , Па Limiting shear stress τ_0 , Pa	226	258	389
«Эффективная» вязкость $\eta_{эфф\min}$, Па·с “Effective” viscosity $\eta_{eff\min}$, Pa·s	21	23	31
Плотность обводненной системы ρ_w , кг/м ³ Water system denseness ρ_w , kg/m ³	2004	1997	1910

Табл. 3. Показатели структуры и свойств различных дисперсных систем ($B/T = 0,32$; $S_{yd} = 500$ м²/кг)

Table 3. Structure factor and properties of various disperse systems ($W/S = 0.32$; $S_{sp} = 500$ м²/kg)

Показатели структуры и свойств Structure factor and properties	Вид системы / System sort		
	«Песок – вода» “Sand – water”	«Цемент – вода» “Cement – water”	«Зола – вода» “Ash – water”
Критическая концентрация кластеров φ^* Critical concentration of clusters φ^*	0,72	0,71	0,84
Показатель фрактальности системы D Index fractal of system D	2,61	2,57	2,31
Показатель фрактальности частиц D^* Index fractal of corpuscle D^*	1,58	1,35	1,22
Предельное напряжение сдвига τ_0 , Па Limiting shear stress τ_0 , Pa	58	156	466
«Эффективная» вязкость $\eta_{эфф\min}$, Па·с “Effective” viscosity $\eta_{eff\min}$, Pa·s	11	22	38
Плотность обводненной системы ρ_w , кг/м ³ Water system denseness ρ_w , kg/m ³	1967	1970	1478

вода» до 466 Па для системы «зола – вода»; $\eta_{эфф\min}$ увеличивается с 11 до 38 Па·с для этих же систем (см. рис. 8, *b* и табл. 3). Результаты оптических исследований (рис. 10) и моделирования позволили установить взаимосвязь показателя фрактальности поверхности частиц D^* с показателем фрактальности обводненных систем на микроуровне D . Определено, что тонкодисперсные частицы золы, характеризующиеся более развитой и неоднородной

поверхностью с наименьшими значениями показателя $D^* = 1,22$, способствуют формированию обводненной системы с более разветвленной и менее плотной фрактально-кластерной структурой $D = 2,31$, $\rho_w = 1478$ кг/м³ по сравнению с системой, включающей частицы песка $D = 2,61$, $\rho_w = 1967$ кг/м³ (табл. 3).

На следующем этапе исследований наполненных цементных композитов проведен структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателя

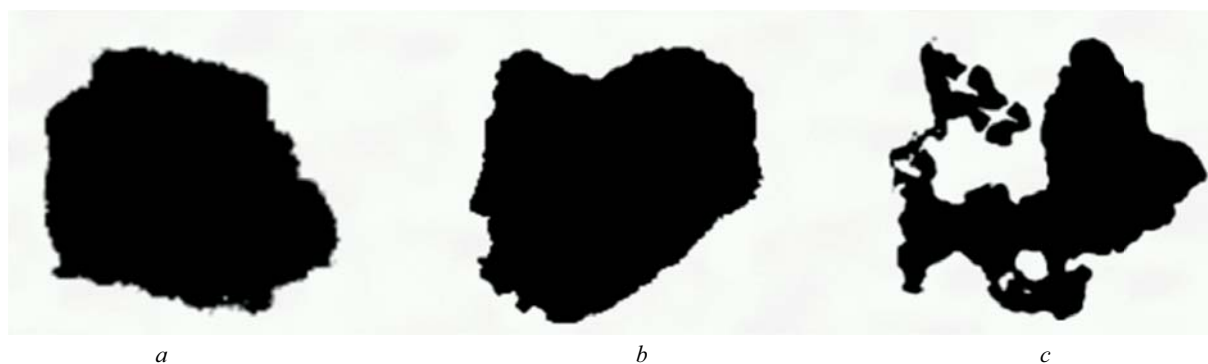


Рис. 10. Изображение проекций частиц ($\times 400$): *a* — цемента; *b* — песка; *c* — золы; $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 10. Visualization of particle trajectories ($\times 400$): *a* — cement; *b* — sand; *c* — ash; $S_{sp} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$

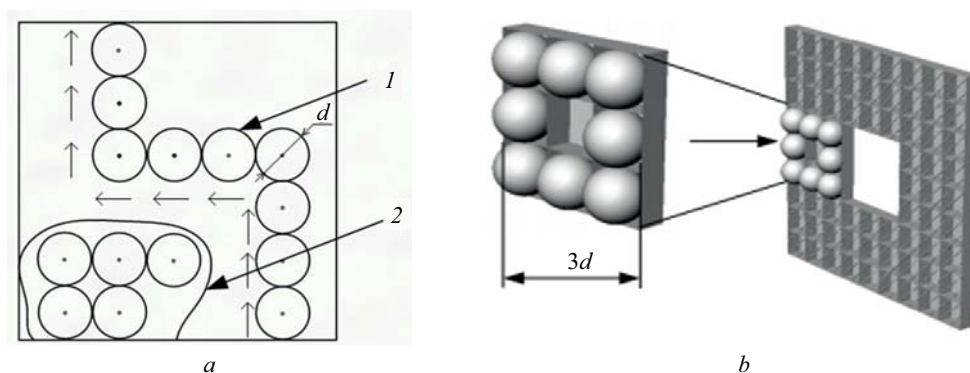


Рис. 11. Плоская решетчатая модель (*a*) и 3D-модель (*b*) протекания по касающимся сферам: *1* — «бесконечный» кластер; *2* — отдельный кластер [1]

Fig. 11. A flat lattice model (*a*) and a 3D model (*b*) of flow along tangent spheres: *1* — “infinite” cluster; *2* — discrete cluster [1]

телей структуры и свойств фрактально-кластерных систем в рамках теории протекания. Исходя из модельных положений (рис. 11) [1], при увеличении концентрации минеральных компонентов из первоначально формирующихся отдельных кластеров образуется сеть взаимосвязанных кластеров, заполняющих объем системы. Вблизи пороговой вероятности протекания $v_c = 0,076–0,16$, ранее вычисленной для модельных систем, при определенном топологи-

ческом распределении частиц реализуются условия для формирования непрерывного «бесконечного» (перколяционного) фрактального кластера — каркаса микроструктуры, определяющего свойства композита.

В ходе экспериментальных исследований выполнили компьютерное моделирование с определением показателей структуры (рис. 12). Обобщенные результаты оценки показателей структуры и свойств приведены на рис. 13 и в табл. 4. Установлено, что наибольшими показателями прочности обладают композиты с объемным содержанием минерального компонента $v_c = 0,06–0,15$, близким к значениям порога протекания. Сходимость экспериментальных и вычисленных показателей на модельных системах подтверждает представленный механизм формирования структуры.

В реальных композитах структурообразование дополняется влиянием состава, дисперсности, свойств поверхности частиц, физико-химической активности. По прочностным показателям установлено, что эффективность компонентов с более высокой физико-химической активностью — золы и ультрадисперсного биокремнезема сопоставима или даже меньше по сравнению с песком (рис. 13, табл. 4). Можно предположить, что более высокие

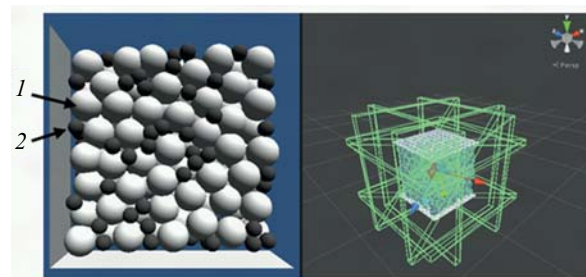


Рис. 12. Фрагмент компьютерного 3D-моделирования топологического распределения частиц: *1* — цемент; *2* — минеральный компонент

Fig. 12. A section of a computer-generated 3D model showing the topological distribution of particles: *1* — cement; *2* — mineral component

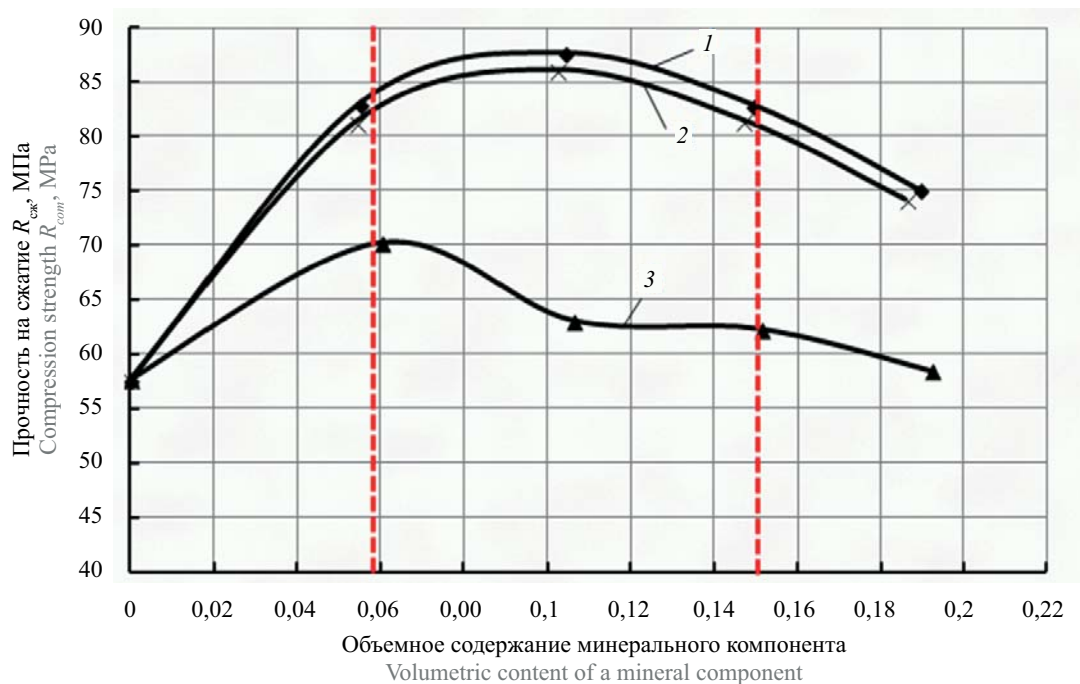


Рис. 13. Влияние вида и объемного содержания минерального компонента на прочность цементного композита: 1 — песок; 2 — биокремнезем; 3 — зола

Fig. 13. The effect of the type and volume content of the mineral component on the strength of the cement composite: 1 — sand; 2 — biosilica; 3 — ash

Табл. 4. Показатели структуры и свойств дисперсных компонентов и цементных композитов на их основе

Table 4. Characteristics of the structure and properties of dispersed components and cement composites based on them

Минеральный компонент Mineral component	Показатели структуры дисперсных компонентов Structure factor of dispersible components		Показатели структуры цементного композита Structure factor of a cement composite		Прочность $R_{сж}$, МПа Strength R_{com} , МПа
	Плотность упаковки μ Package density μ	Координационное число z Coordination number z	Порог протекания v_c Passing threshold v_c	Соотношение частиц в композите c Relationship of corpuscles in composite c	
Песок 700 м ² /кг Sand 700 м ² /kg	0,30	3–4	0,06–0,15	1–2	88
Зола 700 м ² /кг Ash 700 м ² /kg	0,30	3–4	0,06–0,10	1–2	70
Биокремнезем 2000 м ² /кг Biosilica 2,000 м ² /kg	0,14	2–3	0,06–0,15	10–12	86

значения прочности композита с песком, по сравнению с золой, при относительно равных показателях структуры дисперсных компонентов ($\mu = 0,30$; $z = 3-4$; $c = 1-2$) обусловлены влиянием свойств поверхности частиц твердой фазы. Это соотносится с данными исследования сухих и обводненных систем.

Для композита с биокремнеземом формируемый системообразующий каркас из частиц микронаполнителя в виде первоначального перколяционного фрактального кластера характеризуется существенными изменениями показателей структуры ($\mu = 0,14$; $z = 2-3$; $c = 10-12$), соответствующих более высокой

пустотности и низкой плотности на микроуровне, что также сказывается на прочности затвердевшего композита (табл. 4).

Проведенные электронно-микроскопические исследования позволили получить количественные данные показателей структуры и свойств цементных композитов, включающих комплексные добавки на основе минеральных компонентов и ПАВ. Обобщенная информация результатов испытаний представлена на рис. 14, 15 и в табл. 5.

Установлено, что для цементного композита, включающего комплексную добавку на основе песка,

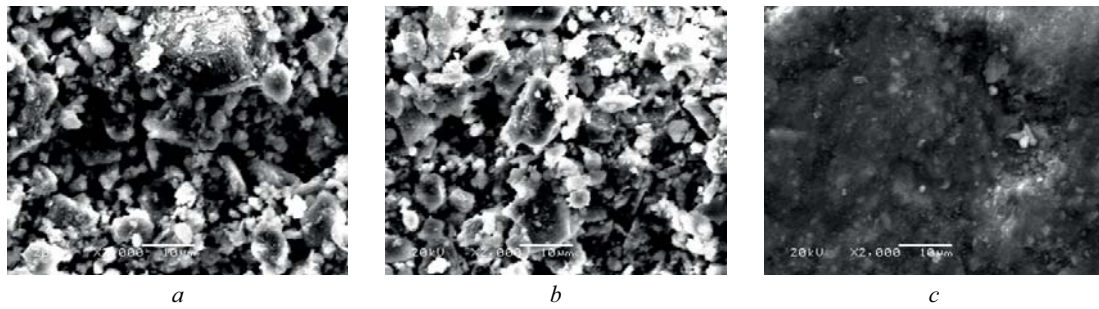
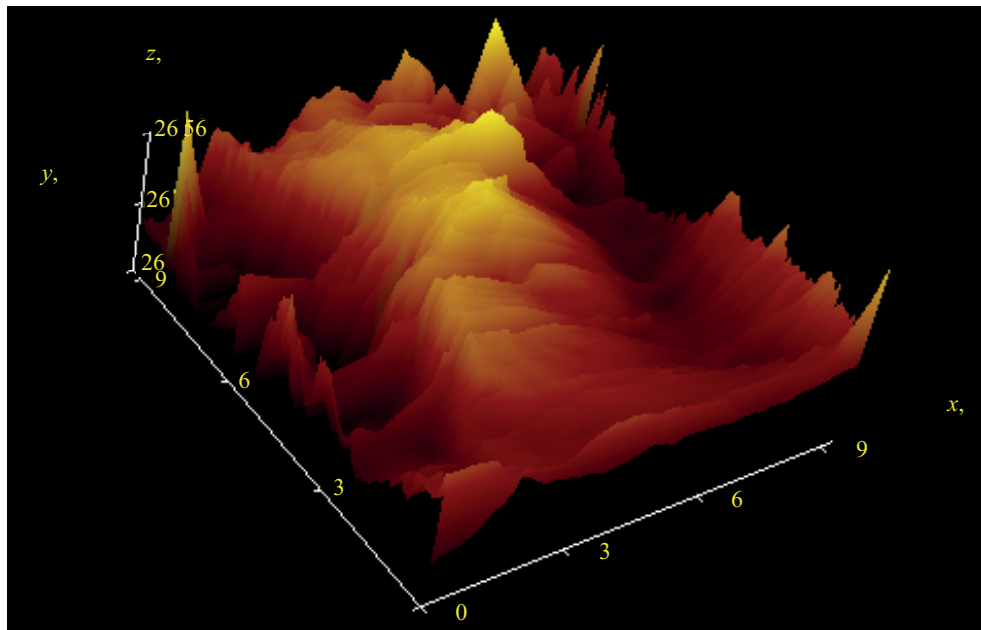
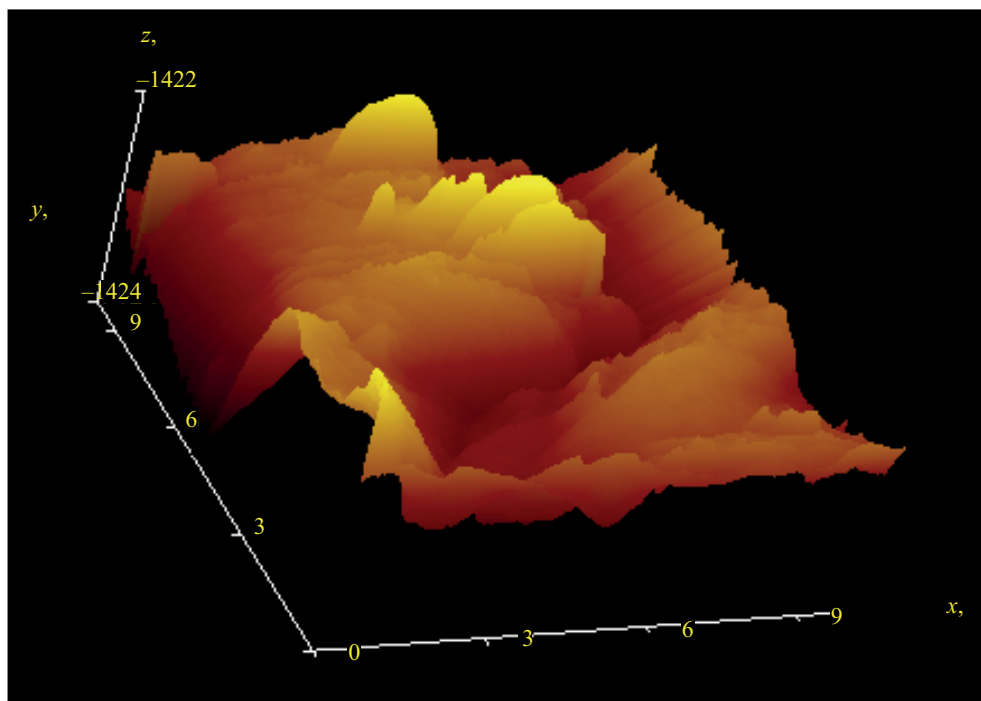


Рис. 14. Микроструктура цементных композитов ($\times 2000$): *a* — без добавок; *b* — с комплексной добавкой (зола + ПАВ); *c* — с комплексной добавкой (песок + ПАВ)

Fig. 14. Microscopic structure of cement composite ($\times 2,000$): *a* — without additives; *b* — with a complex of additive (ash + surfactant); *c* — with a complex of additive (sand + surfactant)



a



b

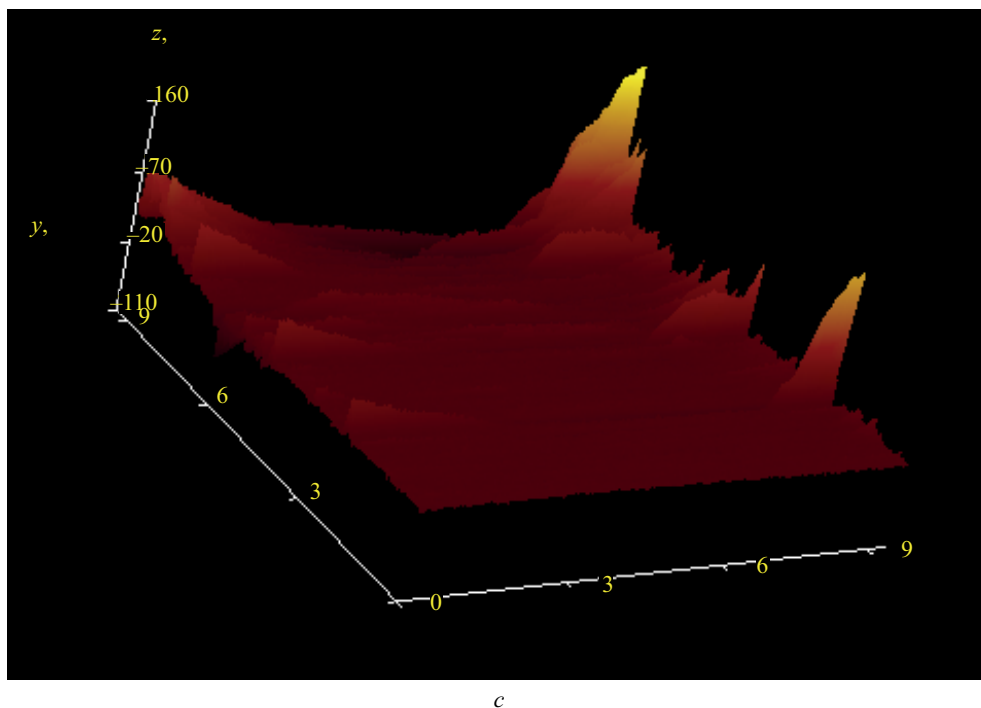


Рис. 15. Микроструктура «среза» поверхности цементных композитов (размерности по осям x - y — мкм, z — нм): a — без добавок; b — с комплексной добавкой (зола + ПАВ); c — с комплексной добавкой (песок + ПАВ)

Fig. 15. Microstructure of a cross-section of the surface of cement composites (dimensions along the x - y axes: μm ; z : nm): a — without additives; b — with a composite additive (ash + surfactant); c — with a composite additive (sand + surfactant)

визуально характерна более упорядоченная, однородная структура на микроуровне с наибольшим показателем фрактальности $D = 1,85$, по сравнению с композитами на основе золы $D = 1,62$ и без добавок $D = 1,43$ (см. рис. 14, табл. 5). Показатель фрактальности D количественно характеризует топологическое строение микроструктуры композита и соотносится с его физико-механическими характеристиками. Чем выше значения данного показателя и ближе к $D = 2$, тем более равномерно распределены элементы твердой фазы затвердевшей фрактально-кластерной системы, соответственно формируемая микроструктура композита более плотная и прочная. Также по сведениям атомно-силовой микроскопии установлена взаимосвязь характеристик микро-

структуры, оцениваемых по показателю микрошероховатости поверхности s , косвенно связанному с фрактальностью. Выявлено, что более однородная с меньшей шероховатостью $s = 0,16$ мкм микроструктура поверхности соответствует более плотной и прочной системе композита с наибольшим показателем фрактальности D (см. рис. 15, табл. 5).

Таким образом, проведенный структурно-феноменологический анализ сухих, обводненных и затвердевших дисперсных систем позволил расширить представления о механизме формирования их микроструктуры, а также установить количественные зависимости между труднонаблюдаемыми фрактально-кластерными процессами структурообразования и свойствами с учетом дис-

Табл. 5. Показатели структуры и свойств затвердевших цементных композитов, включающих комплексные добавки
Table 5. Properties and microstructure of hardened cement composites incorporating complex additives

Минеральный компонент комплексной добавки Mineral component of the complex additive	Показатели структуры и свойств / Structure factor and properties			
	Фрактальность D Index fractal D	Микрошероховатость s , мкм Microcoarseness s , μm	Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ Density ρ , kg/m^3	Прочность $R_{\text{сж}}$, МПа Strength R_{com} , МПа
Без добавок Without additives	1,43	2,60	2070	57
Зола 700 $\text{м}^2/\text{кг}$ Ash 700 m^2/kg	1,62	1,40	2200	94
Песок 700 $\text{м}^2/\text{кг}$ Sand 700 m^2/kg	1,85	0,16	2280	135

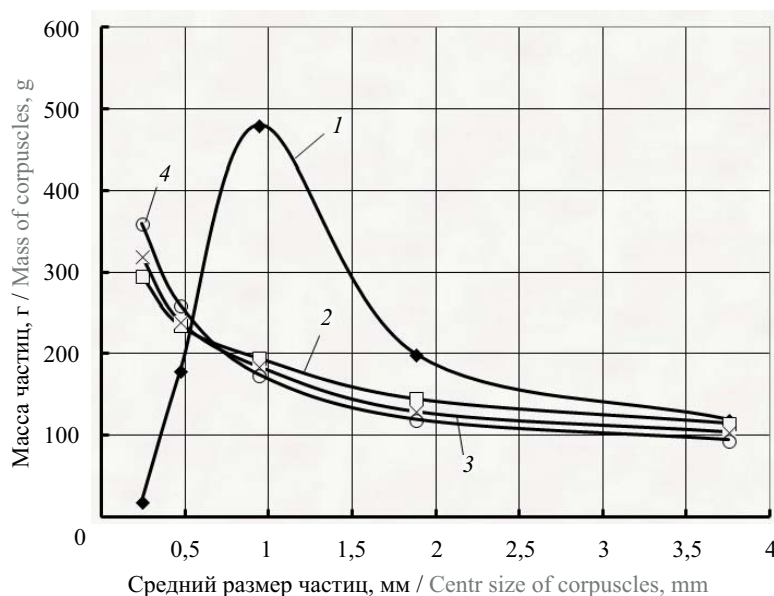


Рис. 16. Распределение частиц песка по размерам: 1 — природная гранулометрия; 2, 3, 4 — скорректированная гранулометрия при $D = 2,3; 2,5; 2,7$

Fig. 16. Particle size distribution of sand: 1 — natural particle size distribution; 2, 3, 4 — corrected particle size distribution at $D = 2.3; 2.5; 2.7$

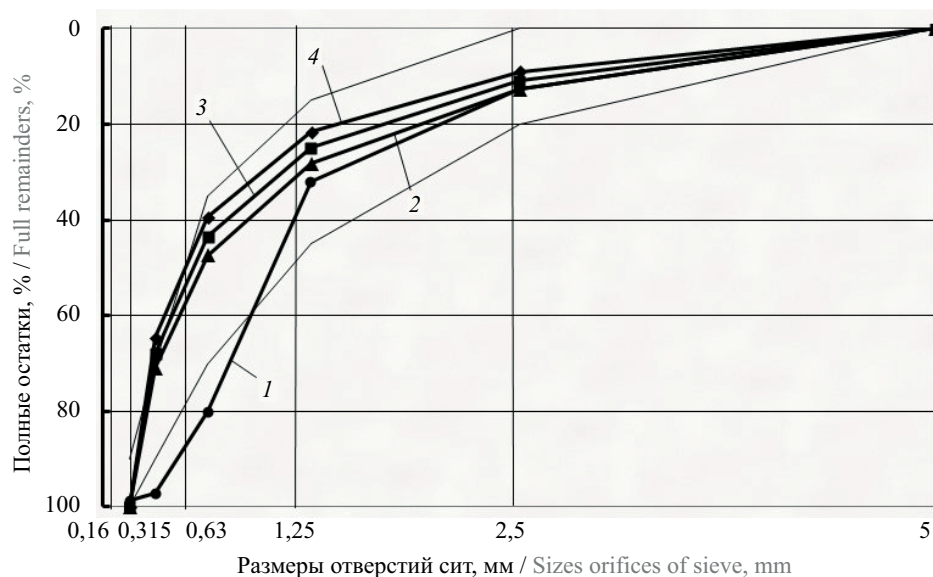


Рис. 17. Зерновой состав песка: 1 — природная гранулометрия; 2, 3, 4 — скорректированная гранулометрия при $D = 2,3; 2,5; 2,7$

Fig. 17. Grain size distribution of sand: 1 — natural grain size distribution; 2, 3, 4 — corrected grain size distribution at $D = 2.3; 2.5; 2.7$

перности и характеристик поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов. Результаты исследований и оценки эффективности минеральных компонентов стали основой для разработки составов и технологии комплексных органоминеральных добавок для бетонов.

При структурообразовании цементных бетонов к рассмотренным системообразующим процессам микроуровня добавляются эффекты и явления мезо-

и макроуровней, связанные с инерционными (массогабаритными) характеристиками грубодисперсных систем — формой, размерами, гранулометрией частиц заполнителей. В рамках исследований решалась задача формирования эффективных (более плотных) структур частиц заполнителей. Опираясь на модельные зависимости массового распределения частиц по размерам (10), реализован метод последовательного заполнения межзерновых пустот для получения

Табл. 6. Зависимости плотности песка от показателя фрактальности D

Table 6. The relationship between sand density and the fractal exponent D

Вид granulometрии Granulometry sort	$M_{кр} / M_c$	Виды плотности, кг/м ³ / Denseness sorts, kg/m ³	
		Насыпная плотность ρ_n Bulk density ρ_b	В уплотненном состоянии $\rho_{упл}$ In a dense condition ρ_{com}
Природная / Natural	3,20	1546	1695
$D = 2,3$	2,60	1565	1740
$D = 2,4$	2,45	1570	1750
$D = 2,5$	2,34	1580	1762
$D = 2,6$	2,23	1565	1754
$D = 2,7$	2,20	1555	1745

плотной упаковки дисперсно-зернистой системы с различными показателями фрактальности в диапазоне $D = 2,3-2,7$.

Результаты определения массового распределения частиц по размерам и зернового состава песка природной и скорректированной granulometрии при различных значениях показателя фрактальности D приведены на рис. 16, 17. В табл. 6 представлены результаты установления плотности песка при различных значениях D .

Установлено, что природный песок имеет granulometрию, близкую к нормальной, соответствующей нормативно-техническим требованиям (см. рис. 17, кривая 1). При этом скорректированный granulometрический состав песков попадает в область допустимых значений при всех показателях фрактальности системы D (кривые 2–4). Наибольшая плотность песка (насыпная и в уплотненном состоянии) получена при показателе $D = 2,5$ (см. табл. 6). Увеличение плотности упаковки скорректированного granulometрического состава достигается за счет формирования структуры, в которой в пустотах между крупными частицами размещаются более мелкие частицы без их раздвижки. В пределах размеров частиц песка данный эффект наблюдается на всех масштабных уровнях. Полученные результаты дают возможность применения песков с «искусственной» granulometрией для получения высокоподвижных бетонных смесей, более устойчивых к внешним воздействиям и расслоению.

Экспериментально установлено, что применение мелкого заполнителя со скорректированной granulometрией совместно с гранитным щебнем фракции 5–10 мм позволило получить бетоны, модифицированные комплексной органоминеральной добавкой, с улучшенными физико-механическими свойствами — прочностью до 90 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованы направления развития методологии исследований на основе системного подхода, отличающегося применением модели фрактальных кластеров для анализа и установления количественных закономерностей между показателями структуры и свойствами цементных композитов

на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования.

Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи формирования микроструктуры сухих, обводненных дисперсных систем и затвердевших цементных композитов дал возможность уточнить и дополнить представления о механизме формирования их структуры. При сопоставлении данных моделирования, топологии распределения частиц в наполненных системах, а также электронных изображений структуры определены количественные зависимости между фрактально-кластерными процессами структурообразования и свойствами с учетом дисперсности, природы и характеристик поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов.

Применение метода исследования взаимосвязи показателей структуры на мезо- и макроуровнях и свойств дисперсно-зернистых систем, основанного на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок, позволило скорректировать granulometрический состав заполнителей для получения более плотной структуры бетона.

Реализованные методические подходы по установлению закономерности показателей структуры и свойств с учетом фрактально-кластерных процессов на различных масштабных уровнях и этапах позволяют расширить существующие возможности управления структурообразованием и прогнозирования формирующихся структур, что дает возможность целенаправленно подойти к выбору компонентов для регулирования свойств цементных композитов и бетонов. На основании системного рассмотрения процессов формирования структуры от микро- до макроуровня с оценкой эффективности минеральных компонентов в составе органоминеральных добавок, а также оптимизации granulometрического состава заполнителей получены цементные бетоны с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Дальнейшие исследования в рамках представленных направлений развития методологии управления структурообразованием предусматривают совершенствование существующих, а также разработку перспективных составов и технологий строительных композитов различного функционального назначения с оценкой их технико-экономической эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеева Е.В., Бобрышев А.Н., Воронов П.В., Головинский П.А., Лахно А.В., Перцев В.Т. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2010. EDN QNOZJR.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN ZWUFVB.
3. Калашиников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 62–67. EDN XXHNSZ.
4. Alatawna A., Birenboim M., Nadiv R., Buzaglo M., Peretz-Damari S., Peled A. et al. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 232. P. 117141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117141
5. Pan G., Li P., Chen L., Liu G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 224. Pp. 1069–1080. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060
6. Hedayatinia F., Delnavaz M., Emamzadeh S.S. Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 206. Pp. 122–129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059
7. Syntsov A.P., Shchesnyak E.L., Galishnikova V.V., Fediuk R.S., Stashevskaya N.A. Effect of nano-modified additives on properties of concrete mixtures during winter season // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. P. 117527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117527
8. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kanaka D.S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review // Journal of Nanomaterials. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/1004597
9. Nahirwa D., Zmatou H., Lenormand H., Leblanc N. The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits : a review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. P. 100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
10. Lee J., Lothenbach B., Moon J. Performance improvement of Portland-limestone cement by mechanochemical activation // Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 176. P. 107411. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107411
11. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research progress of resourceful and efficient utilization of coal gangue in the field of building materials // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111526. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111526
12. Алфимова Н.И., Шадский Е.Е., Никуфорова Н.А. Эффективность использования органоминерального модификатора на основе вулканогенно-осадочных пород // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 120–128. EDN UBCXGV.
13. Тараканов О.В., Акчурун Т.К., Утюгова Е.С. Эффективность применения комплексных органоминеральных добавок для бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 174–181. EDN SBKZAG.
14. Ткач Е.В., Рахимов М.А., Тоимбаева Б.М., Рахимова Г.М. Влияние органоминерального модификатора на физико-механические и деформативные свойства бетона // Фундаментальные исследования. 2012. № 3–2. С. 428–431. EDN PBAOWR.
15. Нгуен Тхе Винь Т.В., Нгуен Динь Чинь Д.Ч., Баженов Ю.М. Разработка органоминеральных модификаторов для получения высокопрочных бетонов с компенсированной усадкой // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 72–76. EDN PCITEL.
16. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 212. Pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314
17. Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кляшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP.
18. Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзентадт А.М. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 54–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61. EDN FMNDZB.
19. Усачев С.М., Перцев В.Т. Совершенство-вание технологии вибропрессованных бетонов : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2007. 142 с. EDN QNNHFP.
20. Головинский П.А., Ушаков И.И. Теория фрактального роста трещин и сопутствующая акустическая эмиссия // Сборник тезисов ФиПС. 1999. С. 20–24.

Поступила в редакцию 26 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 30 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Александрович Леденев** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил); **Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»);** 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 А; РИНЦ ID: 608032, ORCID: 0000-0003-2493-8952; ledenoff@mail.ru;

Виктор Тихонович Перцев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ);** 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 177365, ORCID: 0000-0002-8882-4930; peres_v@mail.ru.

Вклад авторов:

Леденев А.А. — концепция исследования, развитие методологии, выполнение экспериментов, анализ и обработка результатов, подготовка текста, итоговые выводы.

Перцев В.Т. — научное консультирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alekseeva E.V., Bobryshev A.N., Voronov P.V., Golovinsky P.A., Lahno A.V., Pertsev V.T. *Structural and rheological properties of dispersed-granular systems : monography.* Voronezh, VGASU, 2010. EDN QNOZJR. (rus.).
2. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Construction Materials.* 2017; 11:4-10. EDN ZWUFVB. (rus.).
3. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation. *Construction Materials.* 2017; 1-2:62-67. EDN XXIHSZ. (rus.).
4. Alatawna A., Birenboim M., Nadiv R., Buzaqlo M., Peretz-Damari S., Peled A. et al. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. *Construction and Building Materials.* 2020; 232:117141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117141
5. Pan G., Li P., Chen L., Liu G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. *Construction and Building Materials.* 2019; 224:1069-1080. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060
6. Hedayatinia F., Delnavaz M., Emamzadeh S.S. Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan. *Construction and Building Materials.* 2019; 206:122-129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059
7. Svintsov A.P., Shchesnyak E.L., Galishnikova V.V., Fediuk R.S., Stashevskaya N.A. Effect of nano-modified additives on properties of concrete mixtures during winter season. *Construction and Building Materials.* 2020; 237:117527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117527
8. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kanaka D.S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review. *Journal of Nanomaterials.* 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/1004597
9. Ndahirwa D., Zmamou H., Lenormand H., Leblanc N. The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits : a review. *Cleaner Materials.* 2022; 5:100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
10. Lee J., Lothenbach B., Moon J. Performance improvement of Portland-limestone cement by mechanochemical activation. *Cement and Concrete Research.* 2024; 176:107411. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107411
11. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research progress of resourceful and efficient utilization of coal gangue in the field of building materials. *Journal of Building Engineering.* 2025; 99:111526. DOI: 10.1016/j.job.2024.111526
12. Alphonsova N.I., Shadskii E.E., Nikiforova N.A. Effectiveness of the use of organo-mineral modifier based on the volcanic sediments. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2016; 2(17):120-128. EDN UBCXGV. (rus.).
13. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Utyugova E.S. Efficiency of application of integrated organomineral additives for concretes. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. *Series: Construction and Architecture.* 2020; 1(78):174-181. EDN SBKZAG. (rus.).
14. Tkach E.V., Rakhimov M.A., Toimbaeva B.M., Rakhimova G.M. The effect of the organic-mineral modifier on physical and mechanical deformation properties of the concrete. *Fundamental Research.* 2012; 3-2:428-431. EDN PBAOWR. (rus.).
15. Nguyen The Vinh T.V., Nguyen Dinh Trinh D.T., Bazhenov Yu.M. Development of organic-mineral modifiers to obtain high-strength concrete with shrinkage compensated. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow*

State University of Civil Engineering]. 2012; 1:72-76. EDN PCITEL. (rus.).

16. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 2019; 212:10-18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314

17. Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327.

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP. (rus.).

18. Korolev E.V., Grishina A.N., Aizenshtadt A.M. Analysis of structure formation of composites using fractal dimension. *Construction Materials*. 2020; 9:54-61. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61. EDN FMNDZB. (rus.).

19. Usachev S.M., Pertsev V.T. *Perfection of technology vibration pressing of concretes : monography*. Voronezh, VGASU, 2007; 142. EDN QNNHFP. (rus.).

20. Golovinskij P.A., Ushakov I.I. Theory of fractal growth of shakes and accompanying acoustical emission. *Collection of abstracts FIPS*. 1999; 20-24. (rus.).

Received September 26, 2025.

Adopted in revised form on September 30, 2025.

Approved for publication on February 13, 2026.

B I O N O T E S : **Andrey A. Ledenev** — Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, Research Centre (Problems of Application, Security and Control of Aviation Air Force); **Military Educational and Scientific Centre of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh)**; 54 A St. Bolshhevikov st., Voronezh, 394064, Russian Federation; ID RSCI: 608032, ORCID: 0000-0003-2493-8952; ledenoff@mail.ru;

Victor T. Pertsev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20 let Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 177365, ORCID: 0000-0002-8882-4930; perec_v@mail.ru.

Contribution of the authors:

Andrey A. Ledenev — research concept, development of methodology, performance of experiments, analysis and machining of outcomes, next preparation, total conclusions.

Victor T. Pertsev — scientific consultation.

The authors declare that they have no conflict of interest.