



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 620.186:691.542

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9855>**Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателей микроструктуры и свойств затвердевших цементных систем**А. А. Леденев^{1✉}, В. Т. Перцев², О. Б. Рудаков², С. М. Усачев²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), ул. Ст. Большевиков, 54а, Воронеж 394064, Российская Федерация

²Воронежский государственный технический университет, Московский пр., 14, Воронеж 394026, Российская Федерация

Аннотация

Изучение химических и физических процессов твердения полидисперсных цементных систем до сих пор основано преимущественно на эмпирических подходах. Феноменологический анализ взаимосвязи структурных показателей затвердевших цементных систем на микроуровне с их физико-механическими свойствами предложен как один из научно-практических подходов к управлению физико-химическими процессами структурообразования бетонов с заданными свойствами. Для оценки структурных изменений при варьировании состава цементных систем может быть использовано сопоставление количественных показателей микроструктуры цементного камня и его функциональных свойств. Целью работы является получение количественных данных структурно-феноменологического анализа затвердевших цементных систем для установления взаимосвязи показателей микроструктуры с их физико-механическими свойствами.

Для анализа структуры цементных систем реализованы методы, основанные на положениях фрактальной геометрии и теории протекания (перколяции), с привлечением современных методов моделирования, а также сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Для количественной оценки микроструктуры цементного камня, полученного без добавки и с органоминеральной добавкой, применили показатель фрактальности D и показатель микрошероховатости S , которые были сопоставлены со свойствами цементного камня, определенными в ходе стандартных физико-механических испытаний.

Расчет показателей микроструктуры и определение оптимального содержания компонентов органоминеральной добавки позволили расширить представления о фрактально-кластерном механизме самоорганизации цементных систем с учетом топологии распределения частиц. Показано, что между показателями D , S , прочностью на сжатие и плотностью цементного камня существует определенная взаимосвязь, а именно, более высокий параметр фрактальности и сравнительно низкий уровень микрошероховатости являются признаками материала с улучшенными физико-механическими свойствами. Наблюдения за трендами изменения величин D и S могут использоваться для управления процессами структурообразования цементных систем.

Ключевые слова: полидисперсные цементные системы, фрактально-кластерные микроструктуры, электронная микроскопия, фрактальность, микрошероховатость, физико-механические свойства

Благодарности: экспериментальные исследования проводили на базе Центра коллективного пользования им. проф. Ю. М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, Проект № 2021-2296-512-0001-060.

Для цитирования: Леденев А. А., Перцев В. Т., Рудаков О. Б., Усачев С. М. Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателей микроструктуры и свойств затвердевших цементных систем. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 326–334. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9855>

✉ Леденев Андрей Александрович, e-mail: ledenoff@mail.ru

© Леденев А. А., Перцев В. Т., Рудаков О. Б., Усачев С. М., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Ledenev A. A., Pertsev V. T., Rudakov O. B., Usachev S. M. Structural-phenomenological analysis of interrelation of microstructure indexes and properties of set cement systems. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(3): 326–334. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9855>

1. Введение

Под феноменологической теорией в самом общем представлении понимают формулировку закономерностей, определяющих взаимосвязь между различными наблюдениями явлений (феноменов) в соответствии с фундаментальной теорией, но непосредственно из этой теории не следующих. В естественнонаучном плане феноменологический анализ – это подход, при котором проводится процедура соотнесения различных сторон и компонентов феномена с целью установления формы и структуры, видов и типов проявления и функционирования, в аспекте связей с другими явлениями и взаимного влияния их друг на друга. Для строительного материаловедения дальнейшие исследования, направленные на совершенствование методологических подходов анализа и оценки параметров структуры материалов и установление их взаимосвязи с физико-химическими показателями, характеризующими функциональные свойства формирующихся систем, представляют собой важные фундаментальные задачи. Развитие представлений о структурообразовании сложных полидисперсных гетерогенных систем, которыми является затвердевший цементный камень, может быть реализовано комплексно на основе системного структурно-феноменологического подхода. Структурно-феноменологический подход предусматривает отображение взаимосвязи между явлениями и их физико-механическими свойствами, а также комплексный микроскопический анализ количественных показателей структуры. Это позволяет установить механизмы взаимодействия компонентов цементных систем и влияния их на физико-химические процессы структурообразования, протекающие на микроуровне.

Актуальность реализации структурно-феноменологического подхода связана с широким применением органоминеральных добавок (ОМД) для получения цементных бетонов с улучшенными физико-техническими показателями на основе многокомпонентных высокодисперсных смесей [1–18]. Однако вопросы управления процессами структурообразования цементных систем изучены недостаточно. Разрабатываемые цементные системы с ОМД существенно отличаются от традиционных бето-

нов по структурной топологии. Как известно, в процессах твердения в результате химического, физического межмолекулярного, межчастичного и межфазного взаимодействия компонентов цементных систем в твердой фазе формируется неоднородная агрегированная фрактально-кластерная структура. В микрообъеме затвердевшего цементного камня сформированная кристаллогидратная структура является ключевым элементом, определяющим свойства всей системы в целом [19–22]. При этом на формирование микроструктуры оказывает влияние свойства поверхности минеральных составляющих, степень дисперсности, что проявляется в анизотропии цементных систем, их фрактально-кластерной неоднородности [20–23].

Задачи изучения процессов структурообразования дисперсно-неупорядоченных фрактально-кластерных систем на микроуровне могут быть успешно реализованы на основе развития положений фрактальной геометрии, статистической физики, теории протекания (теории перколяции) с привлечением современных численных и компьютерных моделей, физико-химических методов исследований. Одними из доступных методов исследования микроструктуры твердых тел являются электронная и атомно-силовая микроскопия. В данном случае представляется эффективным применение количественных показателей фрактальной размерности (фрактальности), микрошероховатости, которые позволяют оценить степень однородности и упорядоченности сложных фрактально-кластерных объектов на микроуровне [24–29].

Таким образом, развитие структурно-феноменологического подхода к анализу и оценке формирующихся систем на микроуровне, на наш взгляд, является одним из важнейших аспектов управления процессами структурообразования и направленного регулирования свойств цементных систем. Получение новых научных знаний в данном направлении дает возможность расширить представления о механизме взаимодействия компонентов различной физико-химической природы и их влияния на микроструктуру цементных бетонов. Это позволит стать заделом для дальнейшего совершенствования составов и технологии бетонов с улучшенными функциональными характеристиками, а также

базисом для разработки композитов с уникальными свойствами.

Целью работы является получение количественных данных структурно-феноменологического анализа затвердевших цементных систем для установления взаимосвязи показателей микроструктуры с их физико-механическими свойствами.

2. Экспериментальная часть

Объектом исследований являлись модельные и затвердевшие цементные системы – цементные камни с добавкой и без добавки ОМД. Исследовали характеристики микроструктуры и физико-механические свойства затвердевшей цементной системы. Для сравнительного анализа готовили две серии образцов размером $2.0 \times 2.0 \times 2.0$ см: 1) контрольный состав – цементный камень без добавок; 2) цементный камень композиционной системы с комплексной добавкой ОМД – «портландцемент + ОМД». Для этих целей использовали портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н с величиной удельной площади поверхности $3000 \text{ см}^2/\text{г}$, плотностью частиц $3.1 \text{ г}/\text{см}^3$. Минералогический состав портландцемента (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. В качестве составляющих ОМД применяли сырьевые материалы, показавшие высокую эффективность по результатам предварительных исследований [21–23]. Химической составляющей ОМД являлась пластифицирующая добавка на основе поликарбоксилатов «Melflux 2651F», дозировка составляла 0.8 % от массы цемента. Минеральным компонентом ОМД являлся тонкодисперсный кварцевый песок дисперсностью $7000 \text{ см}^2/\text{г}$ с содержанием SiO_2 97 %, плотностью частиц $2.6 \text{ г}/\text{см}^3$, дозировкой 5, 10, 15, 20 % от массы цемента.

Введение предварительно подготовленной комплексной добавки ОМД в состав цементной системы осуществляли в сухом виде. Содержание воды в исследуемых системах подбирали, исходя из постоянной реологической характеристики, количественно оцениваемой по показателю расплыва конуса, который составлял 13–15 см [21–23].

Технические испытания образцов по прочности на сжатие (МПа) и средней плотности ($\text{г}/\text{см}^3$) проводили по ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». После испытаний из разрушенных образцов цементного камня путем механи-

ческого шлифования готовили пробы для анализа их микроструктурных характеристик. Размер исследуемых образцов составлял $5 \times 5 \times 2$ мм.

Аналитическую оценку показателей микроструктуры цементной системы, включающей ОМД с различной дозировкой тонкодисперсного кварцевого песка, проводили методами численного и компьютерного моделирования на основе представлений, изложенных в теории протекания (перколяции) [22, 29]. Для исследуемых систем применяли понятия протекания по касающимся и по перекрывающимся сферам, которыми являлись модели частиц твердой фазы микронаполнителя – тонкодисперсного кварцевого песка и цемента. В ходе расчета оценивали количественное соотношение (по объему), которое характеризует долю микронаполнителя, определяющую процессы формирования структуры и свойства цементной системы по формуле:

$$V = \frac{N\pi d^3}{6}, \quad (1)$$

где V – объемное содержание сфер (моделей частиц твердой фазы микронаполнителя); N – число сфер (моделей частиц твердой фазы микронаполнителя); d – диаметр сферы (модели частиц твердой фазы).

Также в ходе анализа структурных характеристик цементной системы рассчитывали соотношение частиц микронаполнителя к частицам цемента по формуле:

$$C = \frac{n_{mk}}{n_c}, \quad (2)$$

где n_{mk} , n_c – концентрации (счетные) частиц микронаполнителя и цемента, которые рассчитывали по формулам:

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

$$n_c = \frac{6m_c}{\pi d_c^3 \rho_c}, \quad (4)$$

где m_{mk} , m_c – доля частиц микронаполнителя и цемента (по массе); d_{mk} , d_c – средний диаметр частиц микронаполнителя и цемента; ρ_{mk} , ρ_c – плотность частиц микронаполнителя и цемента.

Визуализацию и геометрическое моделирование частиц в исследуемой двухкомпонентной цементной системе проводили в компьютерной программной среде Unity3d. В программе создавались сферы, являющиеся моделями частиц

твердой фазы, вводились расчетные значения характеристик компонентов, на основании которых рассчитывались параметры структуры и визуализировалась ее модель [22].

Анализ сформированной структуры затвердевшей цементной системы на микроуровне проводили с использованием двух методов физико-химических исследований: сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. С применением метода сканирующей микроскопии на установке Scanning Electron Microscope «Jeol jsm-6380LV» были получены микрофотографии поверхности структуры с разрешением 5 нм при увеличении в 2000 раз. Полученные электронные изображения использовали для фрактального анализа микроструктуры. Количественное определение показателя фрактальной размерности D осуществляли методом островов среза в программном комплексе Fractall.Stat 3.1 [24]. Для реализации данного метода цифровое изображение поверхности микроструктуры, полученное на электронном микроскопе в градациях серого, преобразовывалось в черно-белое, при этом регулировали яркость и контрастность в программе Paint.NET. Преобразованное изображение загружали в компьютерную программу Fractall.Stat 3.1, в которой изображение структуры последовательно разбивалось на фрагменты (островки) и рассчитывались площадь плотных зон A и периметр P для каждого выделенного фрагмента. Показатель фрактальной размерности рассчитывался как тангенс угла наклона зависимости периметра плотных зон P от их площади A , построенной в двойных логарифмических координатах. Для обеспечения корректности и достоверности полученных данных количество фрагментов изображения структуры составляло более 10. Пример графического отображения результатов расчета фрактальной размерности приведен на рис. 1.

Методом атомно-силовой микроскопии на установке «NanoEducator» получали изображения трехмерной топологии и определяли по максимальному пику трехмерного изображения (по оси z) показатель микрошероховатости поверхности S (нм). Размер участка сканирования для получения изображения составлял 9×9 мкм.

3. Результаты и обсуждение

В ходе физико-механических испытаний установили, что затвердевшая цементная система с комплексной добавкой ОМД прогнозируемо

обладает значительно более высокими показателями физико-механических свойств (табл. 1), чем без добавки. Полученные результаты являются следствием активного влияния органической и минеральной составляющих комплексной добавки ОМД на формирование микроструктуры цементного камня. Механизм действия органической составляющей «Melflux 2651F» на основе поликарбоксилатов проявляется в пластификации и модифицировании цементной системы за счет эффекта «стерического» отталкивания обводненных частиц твердой фазы при адсорбции поверхностно-активного вещества [21, 23]. Действие минерального компонента ОМД – тонкодисперсного кварцевого песка, проявляется в модифицировании структуры цементной системы за счет наличия на аморфизированной поверхности частиц SiO_2 полярных силанольных групп, способных химически участвовать в процессе гидратационного твердения [23].

Также влияние оказывает физический фактор межчастичного взаимодействия, проявляющийся в переформировании структуры цементного камня на микроуровне при введении ОМД с различным содержанием молотого кварцевого песка [22]. Согласно модельным представлениям теории протекания (перколяции) топологическое распределение частиц микронаполнителя, соответствующее формированию перколяционного «бесконечного» фрактального кластера, будет определять свойства всей цемент-

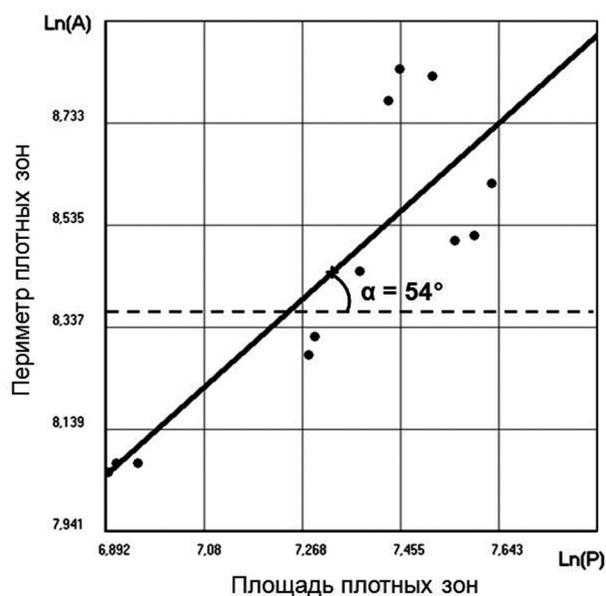


Рис. 1. Пример графического отображения результатов расчета по определению фрактальной размерности в программе Fractall.Stat 3.1 [24]

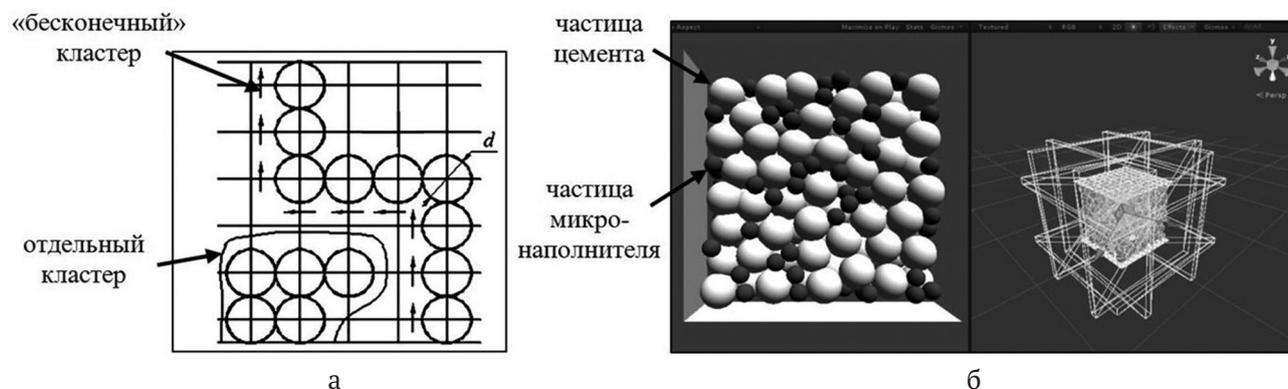
Таблица 1. Влияние ОМД с различным содержанием молотого кварцевого песка на физико-механические свойства затвердевшей цементной системы

Цементная система	Содержание компонентов системы			Физико-механические свойства	
	массовое содержание молотого песка, %	объемное содержание молотого песка, V	соотношение компонентов в системе, C	прочность на сжатие, МПа	плотность, г/см^3
с комплексной добавкой ОМД	5	0.054	0.47	114	2.26
	10	0.104	0.99	135	2.28
	15	0.149	1.57	121	2.26
	20	0.189	2.23	103	2.25
без добавок	–	–	–	57	2.07

ной системы в целом (рис. 2а) [22, 29]. Экспериментально установлено, что наибольшими показателями прочности и плотности обладают цементные системы с объемным содержанием молотого кварцевого песка $V \approx 0.1–0.15$ (см. табл. 1). Сходимость полученных экспериментальных значений и ранее вычисленных для наполненных композитов оптимальных показателей $V \approx 0.076–0.16$ подтверждает кластерный механизм агрегирования частиц твердой фазы и возможность топологического анализа структуры с применением методов теории протекания [22]. Показано, что для структуры с содержанием молотого кварцевого песка 10 % при $V \approx 0.1$ соотношение компонентов в системе составляет $C \approx 1$ (см. табл. 1). Фрагмент визуализации и геометрического моделирования частиц при данных структурных характеристиках цементной системы, проведенной в компьютерной среде Unity3d, представлен на рис. 2б. По-видимому, в реальных условиях топологическое распределение агрегированного микронаполнителя предусматривает его размещение в пустотах

и между частицами цемента, что способствует уплотнению цементной системы. Полученные расчетные значения и представленные модели характеризуют оптимальное содержание компонентов ОМД с точки зрения формирования микроструктуры и улучшения физико-механических свойств наполненной цементной системы.

Анализ изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, позволил визуально установить качественное изменение микроструктуры цементной системы, формирующейся при гидратационном твердении (рис. 3). Для цементной системы, включающей комплексную добавку ОМД, отличительной особенностью является формирование более однородной и пространственно упорядоченной микроструктуры, включающей плотные кристаллические новообразования (рис. 3а). В свою очередь микроструктура затвердевшей цементной системы без добавок характеризуется менее однородным распределением твердой фазы с наличием структурных элементов пустотности – «темные» зоны (рис. 3б).


Рис. 2. Плоская схематичная модель, описывающая протекание «бесконечного» кластера (а) и геометрическая визуализация модели структуры цементной системы с микронаполнителем в программе Unity3d (б) [22]

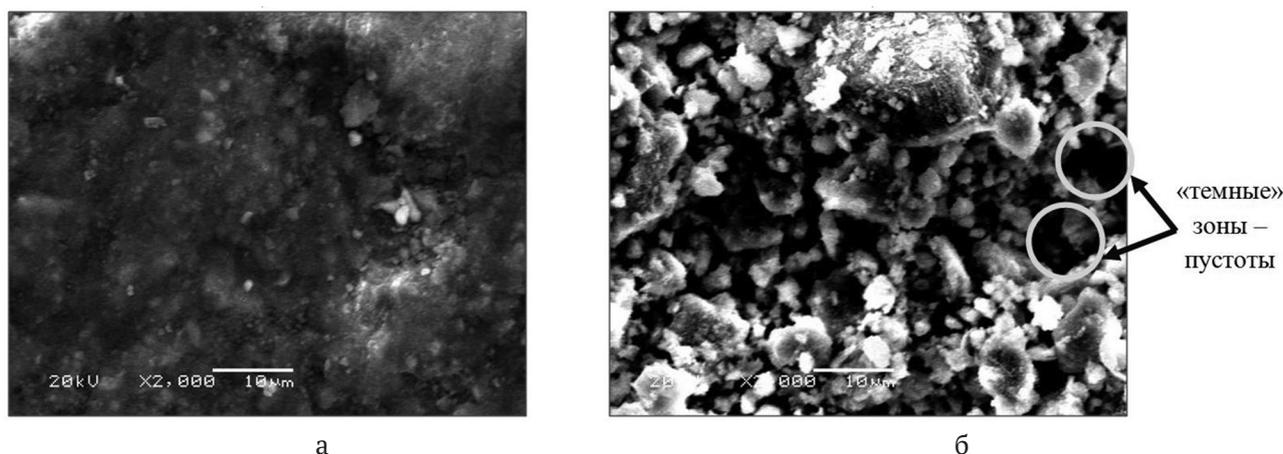


Рис. 3. Изображения микроструктуры затвердевшей цементной системы, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа ($\times 2000$): а) цементная система с добавкой ОМД; б) цементная система без добавок

Полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа изображения структуры обрабатывались для количественной оценки методами фрактального анализа (рис. 4). Установлено, что для более однородной и упорядоченной микроструктуры, сформированной в системе с комплексной добавкой ОМД, показатель фрактальности выше $D = 1.85$ (рис. 4а) по сравнению с показателем для структуры без добавок – $D = 1.43$ (рис. 4б). Увеличение показателя фрактальности количественно характеризует геометрическое перестроение сформированной микроструктуры и соотносится с прочностными показателями и плотностью цементного камня (табл. 2). В частности, чем выше показатель фрактальности, а его значение ближе к $D = 2$, тем более равномерно распределены плотные эле-

менты (участки) в пространстве микроструктуры системы, соответственно формируемая система цементного камня является более плотной и прочной.

В ходе анализа микроструктуры на атомно-силовом микроскопе также просматривается взаимосвязь показателя микрошероховатости S с физико-механическими свойствами систем (рис. 5, см. табл. 2). Установлено, что более плотная и прочная цементная система с добавкой ОМД характеризуется более однородным и упорядоченным рельефом поверхности (рис. 5а). Для менее однородной структуры цементной системы без добавок характерен сложный рельеф поверхности с большим количеством выступов и более высоким значением микрошероховатости (рис. 5б).

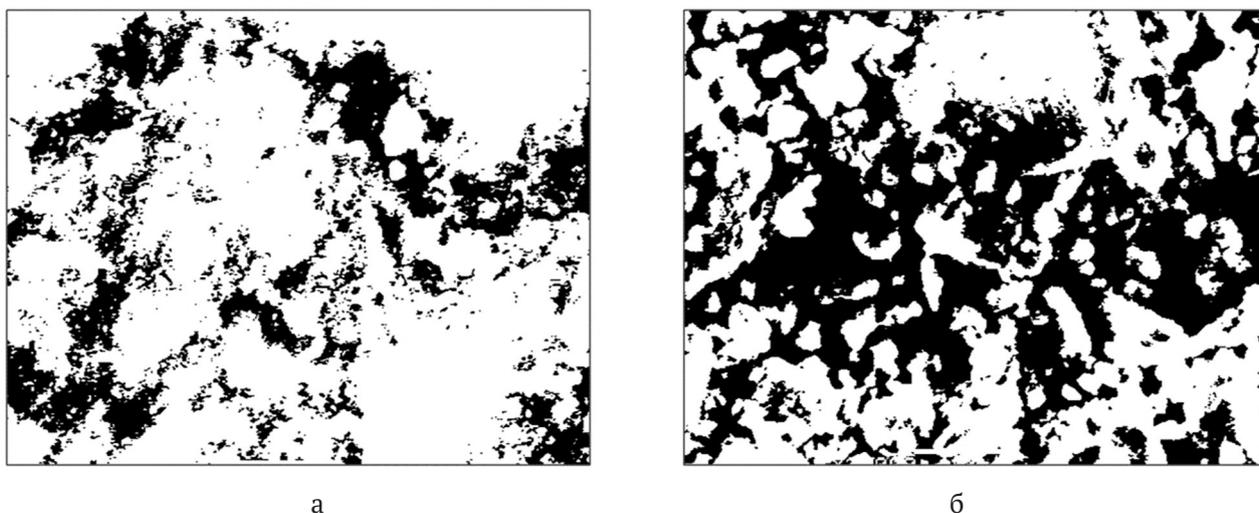
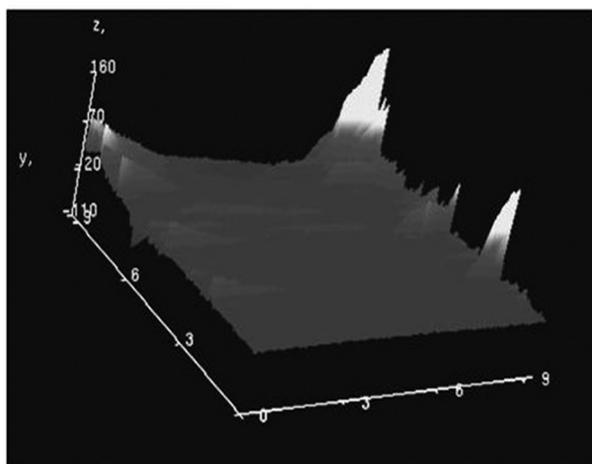


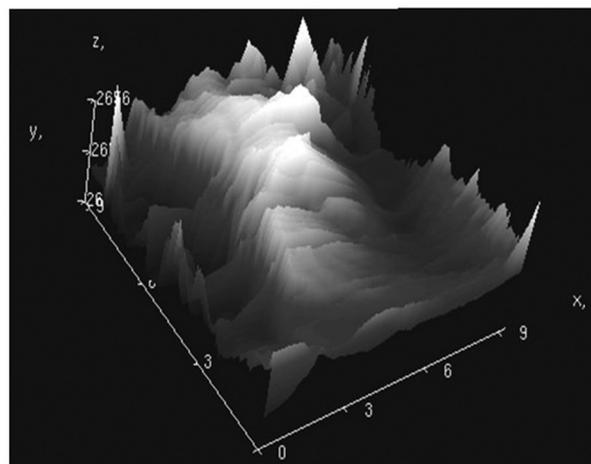
Рис. 4. Обработанные изображения микроструктуры затвердевшей цементной системы: а) цементная система с добавкой ОМД ($D = 1.85$); б) цементная система без добавок ($D = 1.43$)

Таблица 2. Показатели физико-механических свойств и показатели микроструктуры затвердевшей цементной системы

Цементная система	Физико-механические свойства		Показатели микроструктуры	
	прочность на сжатие, МПа	плотность, г/см ³	фрактальность, D	микрошероховатость, S , нм
с комплексной добавкой ОМД	135	2.28	1.85	160
без добавок	57	2.07	1.43	2656



а



б

Рис. 5. Изображения микроструктуры поверхности затвердевшей цементной системы, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (размерность x, y – мкм, z – нм): а) цементная система с добавкой ОМД ($S = 160$ нм); б) цементная система без добавок ($S = 2656$ нм)

4. Выводы

Структурно-феноменологический подход к анализу и оценке формирующихся цементных систем позволил расширить представления о фрактально-кластерном механизме их структурообразования. В ходе сопоставления количественных данных моделирования топологии распределения частиц, а также показателей фрактальной геометрии электронных изображений с параметрами микрорельефа и физико-механическими свойствами установлена взаимосвязь показателей микроструктуры со свойствами цементных систем. Разработанная методология может быть полезна для дальнейшего изучения факторов управления процессами структурообразования и регулирования свойств цементных систем.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных

отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Дондуков В. Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов. *Строительные материалы*. 2017;11. 4–10. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-754-11-4-10>
- Управление процессами технологии, структурой и свойствами бетонов* / под. ред. Е. М. Чернышова, Е. И. Шмитько. Воронеж: ВГАСУ; 2002. 344 с.
- Тараканов О. В., Акчурин 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): 174–181. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42737922>
- Лесовик В. С., Федюк Р. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений. *Строительные материалы*. 2021;3: 9–17. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>
- Нелюбова В. В., Усиков С. А., Строкова В. В., Нецвет Д. Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модифи-

- каторов. *Строительные материалы*. 2021;12: 48–54. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54>
6. Свинцов А. П., Аббас Абдулхуссейн Абд Нур, Абдель-Сатер Аббас, Сорокин А. Н. Влияние наномодифицированной добавки на подвижность бетонных смесей. *Строительные материалы*. 2020;7: 54–59. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-54-59>
7. Ахвердиева Т. А., Джафаров Р. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона. *Строительные материалы*. 2019;3: 73–76. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76>
8. Баженов Ю. М., Булгаков Б. И., Нго Суан Хунг. Гидротехнический бетон с органоминеральной добавкой. *Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию выдающегося ученого-материаловеда, академика РААСН Ю. М. Баженова, 1–2 октября 2020, Москва*. М.: ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»; 2020. с. 114–117.
9. Pan G., Li P., Chen L., Li 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060>
10. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfinesement-based grouts mixed with microfines fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 2019;212: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314>
11. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059>
12. Li Z., Cao G. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*. 2019;120: 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
13. Choi B. I., Kim J. H., Shin, T. Y. Rheological model selection and a general model for evaluating the viscosity and microstructure of a highly concentrated cement suspension. *Cement and Concrete Research*. 2019;123: 105775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.020>
14. Alatawna Amr, Birenboim Matan, Nadiv Roey, Buzaglo Matat, Peretz-Damari Sivan, Peled Alva, Regev Oren, Sripada Raghu. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. *Construction and Building Materials*. 2020;232: 117141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117141>
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117527>
16. Chintalapudi K., Pannem R. M. R. An intense review on the performance of graphene oxide and reduced graphene oxide in an admixed cement system. *Construction and Building Materials*. 2020;259: 120598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120598>
17. Zhu H., Gou H., Zhou H., Jiang Z. Microscopic analysis of nano-modified fly ash by fluidized bed reactor-vapor deposition. *Construction and Building Materials*. 2020;260: 120434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120434>
18. Li D., Wang D., Ren C., Rui Y. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018;188: 1007–1013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.186>
19. Смирнов В. А., Королев Е. В. Иерархическое моделирование строительных материалов как дисперсных систем: специализированная программа реализации. *Строительные материалы*. 2019;1–2: 43–53. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-43-53>
20. Леденев А. А., Перцев В. Т., Рудаков О. Б., Барабаш Д. Е. Развитие представлений о реологическом поведении строительных смесей с учетом фрактально-кластерных процессов при их структурообразовании. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(4): 473–480. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3059>
21. Перцев В. Т., Халилбеков Я. З., Леденев А. А., Перова Н. С. Состав и технология комплексных добавок для бетона на основе промышленных отходов. *Цемент и его применение*. 2019;3: 98–101. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39321673>
22. Леденев А. А., Перцев В. Т. Моделирование и оценка структурных характеристик цементного камня, модифицированного микронаполнителями. *Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию выдающегося ученого-материаловеда, академика РААСН Ю. М. Баженова, 1–2 октября 2020, Москва*. М.: ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»; 2020. с. 59–64.
23. Леденев А. А., Козодаев С. П., Перцев В. Т., Баранов Е. В., Загоруйко Т. В., Внуков Д. Н. Механизмы действия различных видов органоминеральных добавок в цементной системе. *Вестник*

БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021;9: 8–19. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19>

24. Головинский П. А., Ушаков И. И. Теория фрактального роста трещин и сопутствующая акустическая эмиссия. *Сборник тезисов ФиПС*. М.: Интерконтакт-наука; 1999. с. 20–24.

25. Яблоков М. Ю. Определение фрактальной размерности на основе анализа изображений. *Журнал физической химии*. 1999;2: 73.

26. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований; 2002. 656 с.

27. Королев Е. В., Гришина А. Н., Айзенштадт А. М. Анализ структурообразования композиций с использованием фрактальной размерности. *Строительные материалы*. 2020;9: 54–61. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61>

28. Кривоносова Е. А., Рудакова О. А., Встовский Г. В. Мультифрактальный анализ структурного состава зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010;6(76): 26–30. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14992942>

29. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: Едиториал УРСС; 2002. 112 с.

Информация об авторах

Леденев Андрей Александрович, к. т. н., с. н. с., Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2493-8952>
ledenoff@mail.ru

Перцев Виктор Тихонович, д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-8882-4930>
perec_v@mail.ru

Рудаков Олег Борисович, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой химии и химической технологии материалов, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2527-2857>
robi57@mail.ru

Усачев Сергей Михайлович, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3856-187X>
sergey.usa4ev@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 15.06.2022; опубликована онлайн 25.09.2022