

<sup>1,2</sup>Кожухова М.И., канд. техн. наук,<sup>1</sup>Фомина Е.В., канд. техн. наук,<sup>1</sup>Фомин А.Е., аспирант<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин, США

## ФРАКТАЛЫ КАК ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Современные тенденции развития строительного материаловедения все больше ориентированы на реализацию принципов подражания природным объектам. Инструментарий природоподобных технологии основан на инновационных междисциплинарных областях исследований, к которым можно отнести теорию фракталов. В работе отражена возможность практической реализации одной из концепций фрактальных алгоритмов, основанных на иерархическом принципе подобия геометрических структур на примере получения супергидрофобных покрытий для цементобетонных композитов. Фрактал – это новый инструмент оптимизации строительного композита, ориентированный на системный принцип построения структуры на каждом уровне масштаба с возможностью регулирования технико-эксплуатационных параметров готового изделия.

Описана теоретическая модель формирования упорядоченного фрактального принципа текстуры поверхности цементобетона на микро-, субмикро- и наноразмерном уровне организации в зоне контакта «бетон – силиконовое покрытие» путем подбора функциональных элементов. Одним из функциональных элементов для обеспечения определенной шероховатости поверхности выступает фибра. Упорядоченные фибровые волокна, выступая на поверхности, формируют положительные и отрицательные формы рельефа (впадины, бугорки и другие макронеровности), создавая, таким образом, «рельефные ловушки» для водяных капель, попадающих на поверхность. Другим элементом является минеральная составляющая ограноминеральной эмульсии. Разноразмерные минеральные частицы силиконовой эмульсии в силу их морфологии, энергетического состояния в условиях критического размера, вносят вклад в текстуру поверхности и способствуют формированию сил взаимодействия частиц с верхним слоем цементной матрицы.

В итоге микро- и макрошероховатость формируется за счет естественной морфологии бетонной поверхности и ворсистой структуры верхнего слоя мелкозернистого фибробетона; нано- и субмикрощероховатость – за счет капиллярно-пористой поверхности цементно-песчаной матрицы и высокодисперсных минеральных компонентов, содержащихся в защитном слое, покрывающем разноразмерные структурообразующие элементы бетона. При общей работе упорядоченной иерархической структуры возможно достичь сверх- и супергидрофобных свойств цементобетона (краевой угол смачивания поверхности более  $150^\circ$ , критический угол скатывания менее  $15^\circ$ ).

**Ключевые слова:** фрактал, иерархия, природоподобие, цементобетон, супер- и ультрагидрофобность, морфология.

**Введение.** На современном этапе развития строительного материаловедения стоит сложная задача по созданию новых интеллектуальных строительных композитов, способных обеспечить систему зданий и сооружений, формирующих пространственную среду, качественную и безопасную для жизни и деятельности людей. Современная номенклатура строительных изделий должна отвечать повышенным требованиям в соответствии с территориальной расположением проектируемого строительного объекта и условиями его эксплуатации. В решении этих сложных задач приоритет приобретают принципиально новые природоподобные технологии, которые не наносят урон окружающему миру, а

существуют с ним в гармонии и позволяют восстановить нарушенный человеком баланс между биосферой и техносферой [1].

Соединение различных структур в единое целое, придание изделию многофункциональных свойств, диктует выполнение определенных требований и необходимых условий для обеспечения их совместной работы. Исследуя сложные системы по классическим подходам и старым алгоритмам, невозможно получить новые прорывные результаты. Инструментарием нового подхода являются современные трансдисциплинарные исследования, основанные на положениях геоники (геомиметика) [2–4] и бионики (биомиметика).

**Основная часть.** Принципы подражания природным объектам проявляются в самых необычных функционально-структурных, конструктивных и декоративных решениях. Современные архитекторы в своем творчестве основываются на инновационных междисциплинарных областях исследования.

Наиболее распространенный пример – теория фракталов [5]. Идеей данного направления послужили основные алгоритмы самоподобия кристаллических структур. В архитектуре это наиболее устойчивая и крепкая форма. Применение фрактальной теории отражено в работах П. Эйзенмана, Ч. Дженкса. Самая известная работа – генеральный план города Дубай (ОАЭ) (рис. 1) [6].

Современные представления американского архитектора Даниэля Либерскинда об органично вписанной в ландшафт архитектуре, основаны на

уникальных геометрических подобию кристаллических структур (рис. 2 а) [7].



Рис. 1. Применение фрактальной теории в генеральном плане города Дубай (ОАЭ)



а



б

Рис. 2. Геометрические подобию природных структур в архитектуре: а – реконструированное здание Королевского музея Онтарио (Royal Ontario Museum), Торонто; б – китайский павильон Vanke на выставке ЭКСПО 2015

Один из универсальных фрактальных алгоритмов, спиральный, широко распространенный в неорганической (от траекторий элементарных частиц до циклонов и галактик) и живой природе (раковины моллюсков, рога копытных, завитки побегов растений) дает множество сходных решений морфогенеза. Именно спираль является универсальным фракталом, так как в абсолютно любой части подобна самой себе (рис. 2 б).

Фрактальные структуры самоподобия – это иерархический принцип организации. Подобный принцип широко изучен на примере супергидрофобных свойств листа лотоса – «эффекта лотоса», свойства которого зависят от упорядоченного расположения конусообразных формирований, создающих определенный рельеф поверхности листа (рис. 3 а).

Подобие геометрических структур (фракталов) поверхности листка лотоса можно достигнуть при формировании супергидрофобной по-

верхности цементобетонных путем подбора функциональных элементов на нано-, субмикро- и микроуровне и учета свойств вводимых элементов (рис. 3 б). Однако, при создании высокоразвитой поверхности заданной текстуры основной проблемой является стабилизация «построенных» структур на цементной поверхности, а также сочетание средства гидрофобизатора с обрабатываемой бетонной поверхностью. Другой проблемой является неудовлетворительные физико-механические характеристики существующих бетонов с поверхностной гидрофобизацией. Значительный интерес представляет механизм формирования гидрофобной иерархической структуры в зоне контакта «бетон – силиконовое покрытие».

Эффективным способом создания высокоразвитой поверхности бетона с достижением сверх- и супергидрофобных свойств является применение фиброволокна в композиции с органоминеральной эмульсией. Механизм действия

фибры в цементно-песчаной матрице состоит в том, что фибра обеспечивает формирование упорядоченной ворсистой структуры на поверхности цементобетона и вносит вклад в придание высокогидрофобных свойств. Геометрически идеализированная модель хаотичного и равномерного распределения фибры на единицу площади стро-

илась согласно математическим расчетам. Однонаправленное расположение фибры и необходимую шероховатость обеспечивала абразивная обработка поверхности. Несомненным достоинством введения фибры является микроармирование цементобетона, что позволяет повысить его прочность.

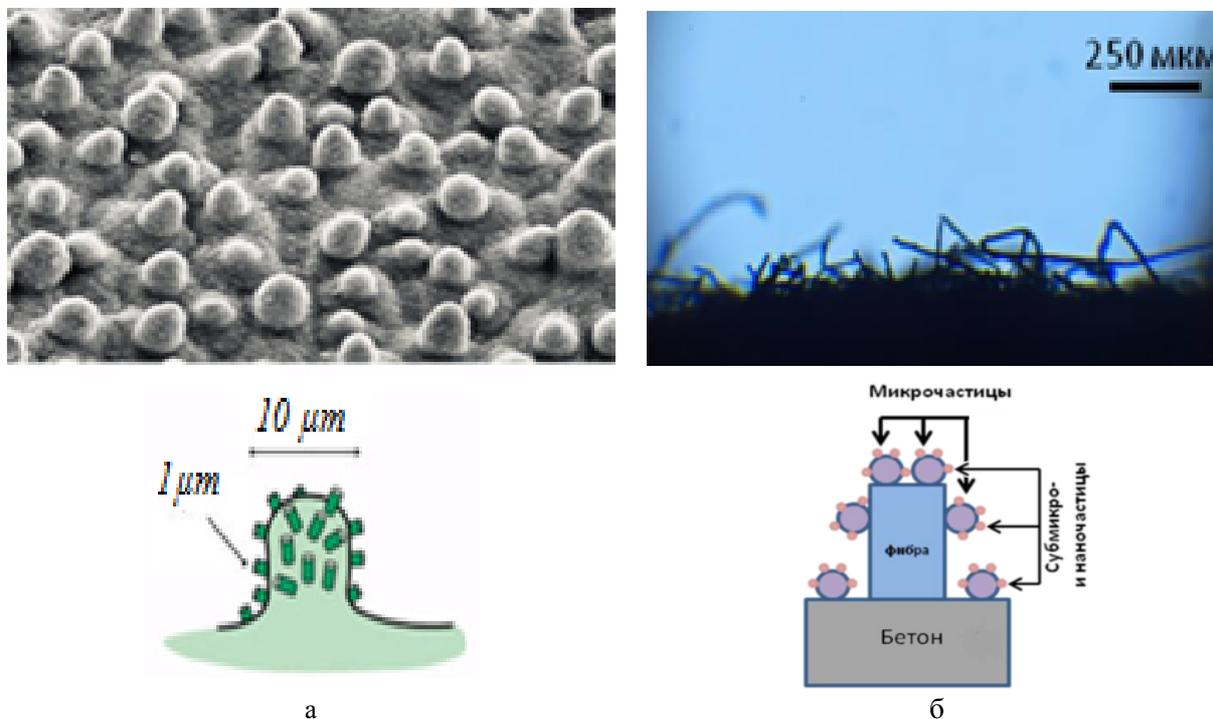


Рис. 3. Копирование упорядоченных элементов микроструктуры поверхности листа лотоса: а – поверхность листка лотоса [8]; б – высокоразвитая иерархическая структура бетона [9, 10]

Особенность подхода к созданию органического покрытия состоит в оптимизации высокодисперсного минерального наполнителя. Оптимизация высокодисперсного минерального наполнителя, в данном аспекте, интерпретируется как селекция по морфологическому, размерному, химическому, а также объемному признаку с целью достижения максимально возможных и практически приемлемых упорядоченных характеристик поверхности бетона со сверх- и супергидрофобными свойствами.

В итоге модель формирования фрактальной иерархической структуры бетона заключается в создании на поверхности бетона ворсистой структуры где микро- и макрошероховатость формируется за счет естественной морфологии бетонной поверхности и ворсистой структуры верхнего слоя мелкозернистого фибробетона; нано- и субмикрошероховатость – за счет капиллярно-пористой поверхности цементно-песчаной матрицы и высокодисперсных минеральных компонентов, содержащихся в защитном слое, а также гидрофобной природы силоксанового компонента, входящего в состав эмульсии, покрывающей разноразмерные структурообразующие

элементы бетона (рис. 3 б). Учитывая особенности структурной морфологии, возможно, направлено изменять текстурную поверхность цементобетона, (краевой угол смачивания поверхности более  $150^\circ$ , критический угол скатывания менее  $15^\circ$ ).

**Выводы.** Реализация природоподобных технологий путем реализации фрактального алгоритма построения упорядоченной иерархической структуры комплексного покрытия, позволяет сохранить цементобетону его функциональные свойства в зависимости от назначения и условий эксплуатации и придать ему сверх- и супергидрофобные свойства и является инновационным инструментом создания строительных композитов нового поколения.

**Источник финансирования.** Стипендия Президента РФ 2018–2020 гг.; Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Из выступления президента России В.В. Путина на 70-й Ассамблеи ООН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/50385>

2. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) примеры реализации в строительном материаловедении. В.С. Лесовик. 2-е изд., доп. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 287 с.

3. Лесовик В.С., Трифонов Б.В., Фомина Е.В. Некоторые аспекты применения положений геоники в стоматологическом материаловедении // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика, 2016. С. 147–150.

4. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Кристаллогенетические аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук,

профессора Валерия Станиславовича Лесовика, 2016. С. 151–156.

5. Поморов С.Б., Филиппов А.А. Фракталы и их участие в архитектурном проектировании // Ползуновский вестник. 2014. № 1. С. 141–147.

6. Kravchenko V.F. Application of the Boltzmann Function to the Theory of Fractal Antennas. Doklady Physics. 2002. Vol. 66 (2). P. 294–300.

7. Daniel Libeskind. Date Views. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://archi.ru/architects/world/22/daniel-libeskind>

8. Nanomaterials: Shedding light and water The Agency for Science // A\*STAR Research 2012 [www.sciencedaily.com/releases/2012/08/120820121230.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2012/08/120820121230.htm)

9. Кожухова М.И., Кнотько А.В., Соболев К.Г., Кожухова Н.И. Микроструктурные особенности формирования иерархической структуры на гидрофобизированной поверхности бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 6–3.

10. Кожухова М.И., Флорес-Вивиан И., Рао С., Строкова В.В., Соболев К.Г. Комплексное силосановое покрытие для супергидрофобизации бетонных поверхностей // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 26–30.

*Информация об авторах*

**Кожухова Марина Ивановна**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, инженер кафедры материаловедения и технологии материалов.

E-mail: [kozuhovamarina@yandex.ru](mailto:kozuhovamarina@yandex.ru)

Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин.

P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Фомина Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии.

E-mail: [fomina.katerina@mail.ru](mailto:fomina.katerina@mail.ru)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Фомин Александр Евгеньевич**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: [fomin.alex@mail.ru](mailto:fomin.alex@mail.ru)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в апреле 2018 г.*

© Кожухова М.И., Фомина Е.В., Фомин А.Е., 2018

---

**M.I. Kozhukhova, E.V. Fomina, A.E. Fomin**  
**FRACTALS AS A PRINCIPLE OF HIERARCHICAL STRUCTURE FORMATION**  
**IN CONSTRUCTION MATERIAL SCIENCE**

*Modern trends of construction material are focused on realization of principles based on biomimicry that is an imitation of natural objects. The biomimetic technologies consist are of the interdisciplinary research areas including fractals theory. In this work the opportunity of real application of one of the fractal concept based on hierarchical formation of natural geometric structures was presented using synthesis of superhydro-*

phobic top layers for cement-based concrete composites. Fractal concept is a new apparatus of structure optimization of construction composite based on complex principle of structure formation at different scales allowing the control of the composite performance.

The theoretical model of fractal formation of surface structure for cement-based concrete at micro-, sub-micro- and nano-scale in an interface zone «concrete – hydrophobic layer» was described by a selection of functional component, such as fibers which are responsible for surface relief. Being a part of the top layer of concrete surface the oriented in a certain way fibers are able to form positive and negative surface topology such as cavities and bumps providing so-called «traps» for water droplets.

The mineral fillers in the composition of hydrophobic layer is considered as another key component in the fractal formation of surface structure. The wide range of particle size of mineral component, their morphological features as well as energy state in terms of their critical dimensional conditions significantly contribute into the surface morphology and cause interaction forces between the mineral particles and cement matrix.

Therefore, micro- and macro relief is achieved by a contribution from natural concrete surface morphology as well as incorporated fibers; submicron relief is formed due to capillary-porous surface of cement-sand matrix and high dispersity of mineral components containing in superhydrophobic layer that covers concrete surface. Complex formation of hierarchically arranged surface structure allows for over- and superhydrophobic characteristics of cement-based concrete surface with the contact angle more than  $150^\circ$ , and roll-off angle less than  $15^\circ$ .

**Keywords:** fractal formation, hierarchical structure, biomimetic technologies, cement-based concrete, over- and superhydrophobicity,

## REFERENCES

1. From the Speech of President of Russian Federation presented at 70<sup>th</sup> UN Assembly: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/50385>
2. Lesovik V.S. Geonika (geomimetics). Implementation examples in construction material science: monography Belgorod: BSTU, 2016. 287 c.
3. Lesovik V.S., Trifonov B.V., Fomina E.V. Some aspects of application of geonika principles in stomatological material science. Proceedings of Int. Research-to-practice Conf. «Intellectual construction composites for green construction», 2016, pp. 147–150.
4. Lesovik V.S., Fomina E.V. Krystallogenetic aspects of technogenic metasomatism in construction material science. Proceedings of Int. Research-to-practice Conf. «Intellectual construction composites for green construction», 2016, pp. 151–156.
5. Pomorov S.B., Filippov A.A. Fractals and its application when architectural design. Polzunovsky vestnik, 2014, no. 1, pp. 141–147.
6. Kravchenko V.F. Application of the Boltzmann Function to the Theory of Fractal Antennas. Doklady Physics, 2002, vol. 66 (2), pp. 294–300.
7. Daniel Libeskind. Date Views. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://archi.ru/architects/world/22/daniel-libeskind>
8. Nanomaterials: Shedding light and water The Agency for Science // A\*STAR Research 2012 [www.sciencedaily.com/releases/2012/08/120820121230.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2012/08/120820121230.htm)
9. Kozhukhova M.I., Knotko A.V., Sobolev K.G., Kozhukhova N.I. Microstructural features of hierarchical structure at repellent concrete surface. Bulletin of BSTU named V.G. Shukhov, 2016, no. 9, pp. 6–3.
10. Kozhukhova M.I., Florwes-Vivian I., Rao S., Strokova V.V., Sobolev K.G. Complex siloxane coating for super-hydrophobicity of concrete surfaces. Stroitel'nye Materialy, 2014, no. 3, pp. 26–30.

### Information about the author

**Marina I. Kozhukhova**, PhD, Post-Doctoral Associate  
E-mail: [kozuhovamarina@yandex.ru](mailto:kozuhovamarina@yandex.ru)  
University of Wisconsin-Milwaukee  
3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ekaterina V. Fomina**, PhD, Assistant professor.  
E-mail: [fomina.katerina@mail.ru](mailto:fomina.katerina@mail.ru)  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Alexander E. Fomin**, Postgraduate student.  
E-mail: [fomin.alex@mail.ru](mailto:fomin.alex@mail.ru)  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in April 2018*

**Для цитирования:**

Кожухова М.И., Фомина Е.В., Фомин А.Е. Фракталы как иерархический принцип организации в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №7. С. 18–23.  
DOI: [10.12737/article\\_5b4f02b20be876.03657115](https://doi.org/10.12737/article_5b4f02b20be876.03657115).

**For citation:**

Kozhukhova M.I., Fomina E.V., Fomin A.E. Fractals as a principle of hierarchical structure formation in construction material science. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no.7, pp. 18–23.  
DOI: [10.12737/article\\_5b4f02b20be876.03657115](https://doi.org/10.12737/article_5b4f02b20be876.03657115).