

В.П. СЕЛЯЕВ<sup>1</sup>, В.Н. УТКИНА<sup>1</sup>, Д.Р. БАБУШКИНА<sup>1</sup>, И.В. АРХИПОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА

**Аннотация.** В представленной статье излагаются результаты экспериментальных исследований, которые служат веским подтверждением выдвинутой гипотезы о фрактальной природе структуры бетона. Авторами работы было установлено, что традиционные методы анализа не в полной мере отражают сложность строения этого композитного материала. Для адекватной и комплексной оценки его структурной неоднородности и присущей ему многомасштабности настоятельно рекомендуется применять математический аппарат фрактальной геометрии. В ходе экспериментов было наглядно продемонстрировано ключевое влияние выявленной структурной неоднородности на механизм разрушения бетонных образцов. Было установлено, что процесс деструкции не является локализованным и одноуровневым; напротив, он носит ярко выраженный многомасштабный характер, что означает его способность развиваться и протекать одновременно на различных структурных уровнях — от макроскопических трещин до микродефектов. В качестве теоретической основы для описания данного сложного процесса в статье предлагаются новые методологические принципы. Эти принципы синтезируют в себе фундаментальные положения механики разрушения и современные подходы фрактальной геометрии, что позволяет создать более полную и адекватную модель прогнозирования поведения бетона под нагрузкой.

**Ключевые слова:** бетон, фрактал, многомасштабность, инвариантность, разрушение, структура.

V.P. SELYAEV<sup>1</sup>, V.N. UTKINA<sup>1</sup>, D.R. BABUSHKINA<sup>1</sup>, I.V. ARKHIPOV<sup>1</sup><sup>1</sup>National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

## METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTING THE THEORY OF CONCRETE DESTRUCTION

**Abstract.** This paper presents the results of experimental studies that provide strong confirmation for the proposed hypothesis on the fractal nature of concrete's structure. The authors established that traditional analysis methods fail to fully capture the complexity of this composite material's architecture. For an adequate and comprehensive assessment of its structural heterogeneity and inherent multi-scale nature, the application of fractal geometry's mathematical framework is strongly recommended. The experiments clearly demonstrated the critical influence of the identified structural heterogeneity on the failure mechanism of concrete specimens. It was found that the fracture process is not localized or single-scale; on the contrary, it is distinctly multi-scale. This means it develops and propagates simultaneously across different structural levels—from macroscopic cracks to micro-defects. As a theoretical basis for describing this complex process, the article proposes new methodological principles. These principles synthesize the fundamental tenets of fracture mechanics with modern approaches of fractal geometry, enabling the development of a complete and more adequate model for predicting the behavior of concrete under load.

**Keywords:** concrete, fractal, multiscales, invariance, fracture, structure.

## 1. Введение

Современные теории разрушения бетона до сих пор строятся на гипотезах классической механики деформируемого твердого тела, согласно которым структура бетона представляется в виде сплошной, однородной среды, изменения которой под действием механических нагрузок и внешних воздействий можно описать системой уравнений: физических, геометрических, статических. Разрушение бетона рассматривается как мгновенный акт, который наступает, как только некоторый критерий разрушения достигнет предельного значения. На этих принципах формировались феноменологические механические теории прочности, теории локального предельного соединения. Предполагалось, что разрушение изделия из бетона наступит, как только нормальные или касательные напряжения, относительные деформации достигнут предельных значений.

Многочисленные опытные данные, полученные в результате экспериментальных исследований, наблюдений в процессе эксплуатации конструкций, изделий из бетона не соответствуют механическим теориям прочности.

С учетом новых экспериментальных исследований, накопленного опыта эксплуатации и развития теорий сопротивления материалов внешним воздействиям предлагаются новые методологические принципы построения теории разрушения бетона и металла [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Экспериментально и теоретически установлено: разрушение бетона следует рассматривать как процесс накопления повреждений в объеме изделий в процессе деформирования; разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, который развивается во времени и при этом на разных масштабных уровнях структуры могут действовать несколько механизмов разрушения: хрупкий, пластический, отрывной, сдвиговой. Поэтому при теоретическом обосновании механики разрушения бетона следует учитывать: особенности строения структуры бетона; дискретный характер разрушения, рассматривая разрушение как процесс разделения целого на части с образованием новых поверхностей.

## 2. Модели и методы

Бетон не является однородным, сплошным, упругим: физически он представляет собой капиллярно-пористый материал, в объеме которого присутствуют все три фазы – твердая, жидкая, газообразная; разрушение сжимаемого образца может произойти вследствие скола или разрыва образца в поперечном направлении; процесс деформирования сопровождается образованием и закрытием микротрещин; на процесс разрушения заметное влияние оказывают силы трения; разрушение структуры может одновременно происходить на разных масштабных уровнях путем реализации как отрывного так и сдвигового механизмов разрушения.

Исходя из изложенного предлагаем при построении модели разрушения бетона следовать принципам:

1. Структура материала неоднородна, многомасштабна, инвариантна формируется из отдельных блоков – фракталов, которые на каждом масштабном уровне отличаются геометрическими размерами, но подобны по строению структуры и физико-химическим свойствам [7, 8, 9, 10].

2. Разрушение – это процесс, развитие которого начинается с разрушения фракталов на микроуровне с последовательным переходом на более высокие смежные уровни, и завершается разделением изделия на отдельные части.

3. При разрушении фракталов необходимо учитывать возможность реализации как сдвигового, так и отрывного механизмов.

4. Для аналитического описания процесса разрушения фракталов на различных масштабных уровнях необходимо применять методы фрактальной геометрии.

5. Разрушение фрактала на определенном масштабном уровне следует описывать методами механики разрушения (модели Гриффитса, Ирвина, Орована, Леонова, Панасюка, Баренблатта и др.) [6, 7, 14].

6. При анализе процесса разрушения структурной системы необходимо рассматривать возможность реализации как отрывного, так и сдвигового механизма разделения изделия на отдельные части.

**Многомасштабность и самоподобие (инвариантность) строения структуры бетона**

Инвариантность структуры означает, что ее физическое и математическое описание остается неизменным при переходе с одного масштабного уровня на другой.

Экспериментально установлено, что разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, развитие которого происходит одновременно на разных масштабных уровнях структуры и при этом возможна реализация одновременно как отрывного, так и сдвигового механизмов разделения изделий на отдельные части.

Блочно-иерархическое строение структуры бетона рассматривалось в работах Н. И. Карпенко, С. М. Скоробогатова, В. П. Селяева, В. В. Михайлова, О. Я. Берга, В. И. Соломатова, Е. М. Чернышева [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12].

Для решения практических задач предлагается рассматривать три масштабных уровня структуры, которая построена по принципу «Структура в структуре» (В. И. Соломатов), «блок в блоке» (М. А. Садовский) [6, 7, 8].

Естественная фрагментарность строения структуры характерна для горных пород (М. А. Садовский, М. В. Курления, В. Н. Опарин); для бетонов (В. И. Соломатов, С. М. Скоробогатов, Е. М. Чернышов, В. П. Селяев); для металлов (Д. Броек) [3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12].

В результате анализа литературных данных можно утверждать, что современные модели разрушения композиционных материалов (типа металл, бетон, горная порода) предлагается строить, основываясь на предположении о блочно-иерархическом строении структуры; наличии дефектов структуры в виде пор, трещин, раковин, жестких (твердых) включений.

При этом выделяются структурные элементы на трех масштабных уровнях: микро-, мезо- и макроструктуры. Размеры характерного элемента структуры предложены соответственно: для бетона (Н. И. Карпенко) микро -  $l_{01} = 0,5 \div 1,5$  мм; мезо -  $l_{02} = 10 \div 25$  мм; макро -  $l_{03} = 50 \div 200$  мм; для металла (Д. Броек):  $l_{01} \leq 500A^0$ ;  $l_{02} \leq 500 \div 5000A^0$ ;  $l_{03} = 0,5 \div 50$  мкм.

**Фрактальное строение структуры бетона**

Для математического описания многомасштабных неоднородных структур Б. Мандельброт в 1975 г. обосновал принципы построения фрактальной геометрии, основанной на двух аксиомах – о многомасштабности и о самоподобии неупорядоченных, нецельноразмерных, дробных, фрагментарных пространств с размерностью несовпадающей с размерностью Евклидова пространства, в котором они существуют [10].

Под многомасштабностью понимается зависимость измеряемой характеристики  $N$  объекта от разрешающего масштаба  $\alpha$  измерительного прибора. Число масштабов зависит от количества масштабных уровней измерения и описывается степенной функцией (закон Мандельброта-Ричардсона) вида:

$$N = c(\alpha)^{d-D}, \tag{1}$$

где  $d$  – размерность объекта в Евклидовом пространстве ( $d = 1, 2, 3$ );  $D$  – размерность в фрактальном пространстве;  $c$  – коэффициент;  $1 < D < 2$  или  $2 < D < 3$ ,  $\alpha$  – масштабный уровень структуры.

Фрактальные объекты как в целом, так и любые их фрагменты имеют одну и ту же размерность (самоподобны).

В математическом виде это свойство можно выразить функцией вида:

$$\beta N = c(\beta\alpha)^{d-D}, \tag{2}$$

где  $\beta$  – масштабный множитель.

Фрактальное строение структуры бетона характеризуется фрактальной размерностью, численное значение которой не зависит от масштабного уровня структуры и имеет одинаковые размеры при 10-, 20- кратном увеличении масштаба. Численное значение фрактальной размерности зависит от изменения однородности структуры.

Экспериментальные исследования, проведенные Л. М. Ошкиной и Л. И. Куприяшкиной, подтвердили фрактальность строения структуры цементных композитов [12, 13].

На рисунках 1 и 2 показана неоднородность структуры цементного камня, содержащего в качестве наполнителя порошки диатомита. Установлено, что структуры, сформированные из частиц цемента и наполнителя, отвечают принципам фрактальности – многомасштабности и самоподобия. Фрактальные размерности, определенные методами: прямого сканирования; наименьшего размаха; островов подтверждают фрактальность строения структуры материала.

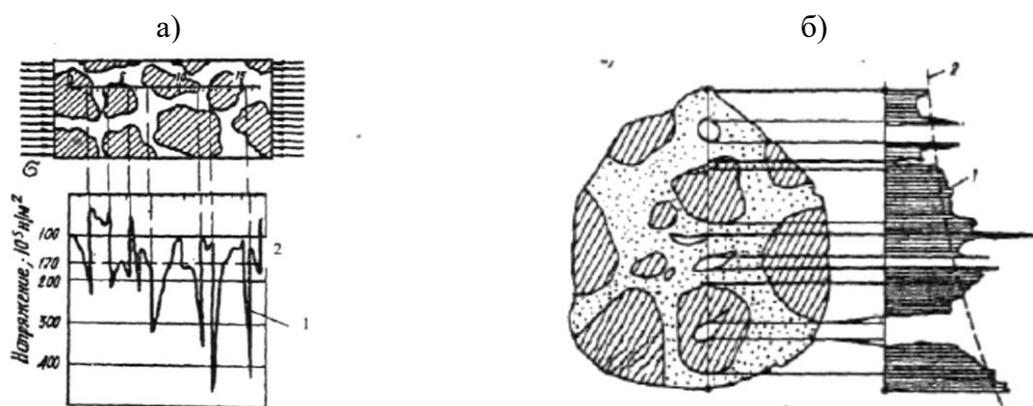


Рисунок 1 – Действительные (1) и осредненные эюры (2) напряжений в бетоне: а) по И.М. Грушко; б) по Н.И. Карпенко

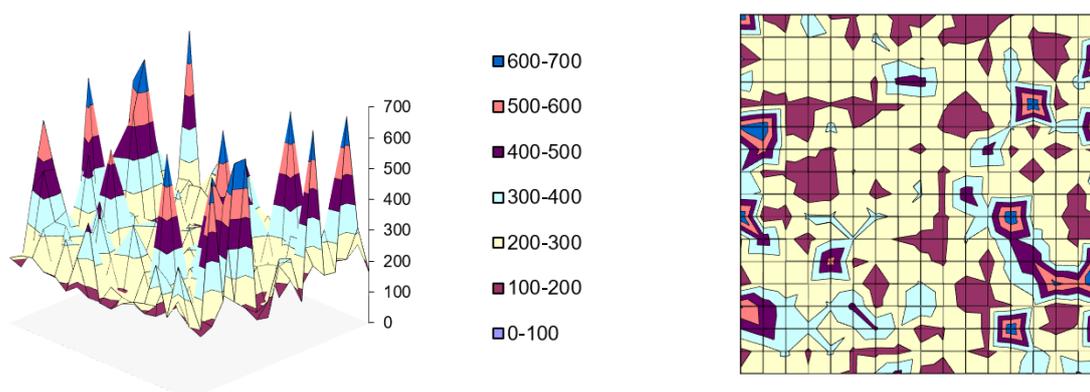


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по поверхности наполненных диатомитом цементных композитов (скорость перемешивания – 360 об/мин, время перемешивания – 40 с)

Фрактальная размерность, определенная по данным о распределении микротвердости в пределах поперечного сечения образцов, не зависит от масштабного уровня структуры (см. табл. 1).

Таблица 1 – Результаты определения фрактальной размерности  $D$  наполненных цементных композитов

№ состава	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К-во цеолита ( $x_1$ )	20%	10%	10%	13%	17%	10%	10%	17%	13%	13%
Песок/цемент ( $x_2$ )	1/1	4/1	1/1	3/1	2/1	2/1	3/1	1/1	1/1	2/1
В/Ц ( $x_3$ )	0,6	0,6	0,9	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7
$D$ (увел $\times 10$ )	2,03	2,55	2,16	2,20	2,42	2,22	2,20	2,07	2,03	2,13
$D$ (увел $\times 25$ )	2,03	2,47	2,24	2,19	2,40	2,20	2,20	2,05	2,02	2,11

Экспериментально установлено, что фрактальная размерность зависит от степени наполнения, скорости и длительности перемешивания композиции в процессе приготовления. Установлена корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности и прочности при сжатии (см. рис. 3).

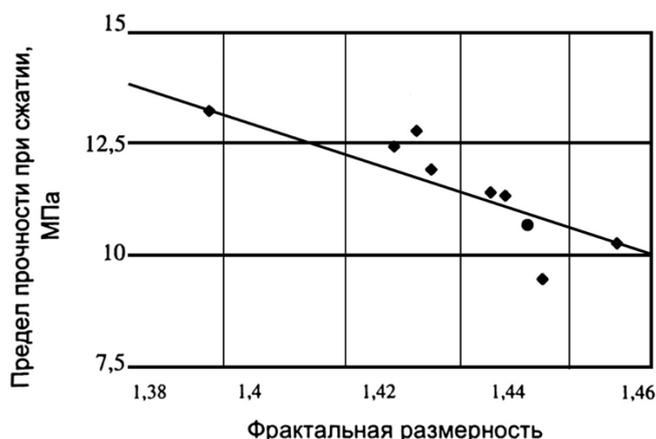


Рисунок 3 – Корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности и прочности при сжатии

### 3. Результаты исследования и их анализ

*Диаграммы деформирования бетона при сжатии с учётом фрактального строения структуры*

Фрактальное строение структуры бетона наиболее чётко отражается на диаграммах деформирования, полученных в процессе испытания на сжатие в динамическом (непрерывном) режиме нагружения образцов-призм из цементных композитов.

Испытания проводились на прессе модели 13-PD/401, снабженном программным комплексом WilleGeotechnik, который позволил производить нагружение с постоянной скоростью  $v = 0,5$  мм/мин, и фиксировать показания датчиков «сила-перемещение» с частотой  $n = 10$  измерений в секунду.

Наиболее характерные диаграммы деформирования приведены на рисунках 4, 5. Испытания в жёстком режиме нагружения позволили зафиксировать дискретность процесса разрушения материала с грубогетерогенной структурой. При нагружении образцов, возникающие напряжения неравномерно распределяются по объёму образца. В зоне контакта матрицы с жёсткими включениями, в области пор и иных дефектов структуры, которые являются концентраторами, возникают напряжения, величина которых превышает предел упругости материала матрицы, развиваются пластические деформации. На диаграмме

деформирования, в некоторых случаях, формируется область, в пределах которой рост деформаций происходит при незначительной величине (почти нулевой, не фиксируемой приборами) приложенных усилий. Подобное явление описано в литературе при анализе результатов испытания кристаллов [15].

Математически это явление можно описать, моделируя процесс разрушения структуры материала с применением методов механики разрушения (Гриффитса) и фрактальной геометрии. Прочность материала на базовом (масштабном) уровне опишем функцией, с учетом закона Мандельброта-Ричардсона:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_0}} \alpha^{d_e - d_m}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – плотность поверхностной энергии;  $E$  – модуль упругости материала;  $l_0$  – размер дефекта;  $\alpha$  – масштабный уровень структуры;  $d_e$ ,  $d_m$  – размерность по Евклиду, Мандельброту.

Рассмотрим разрушение на микромасштабном уровне  $\beta$ . Тогда формула 3 примет вид:

$$\beta \sigma_\beta = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_0}} (\beta \alpha)^{d_e - d_m} \quad (4)$$

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_0}{\beta} \beta^{0,5(d_e - d_m)}; 1 < d_m < 2 \quad (5)$$

Примем  $d_e - d_m = 0,5$ , тогда  $\sigma_\beta = \frac{\sigma_0}{\beta^{1,25}}$ .

Предположим, что  $\beta = 0,1$ , то  $\sigma_\beta \approx 18\sigma_0$ .

Следовательно, напряжения на микроуровне структуры ( $\beta = 0,1$ ) будут в 18 раз больше приложенных к образцу. Под действием этих напряжений на уровне микроструктуры развиваются пластические деформации и это отражается на первом участке диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ .

По мере накопления микроповреждений и с ростом уровня напряжений разрушение структуры будет переходить на более высокие масштабные уровни.

На диаграмме деформирования процесс разрушения фракталов выражается в виде цепочки петель сброса и роста нагрузки (см. рис. 4,5). Каждую петлю можно представить в виде диаграммы деформирования фракталов при их разрушении.

Для описания диаграммы деформирования бетона при сжатии с применением фрактальной модели рассмотрим наиболее актуальные, часто применяемые функции Р. Гука, Ф.И. Герстнера, Т.Л. Лукаша, которые имеют вид:  $\sigma_0 = E\varepsilon$ ;  $\sigma_\Gamma = \alpha\varepsilon - \beta\varepsilon^2$ ;  $\sigma_\Pi = \alpha\varepsilon - \beta\varepsilon^3$ , где  $\sigma$  – напряжение;  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon$  – относительные деформации;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, определяемые из соответствующих нормируемых показателей.

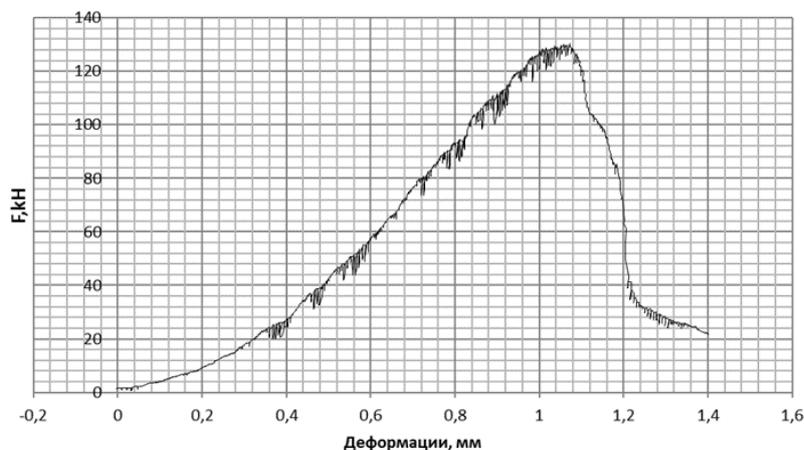


Рисунок 4 – Диаграмма деформирования образца из рядового бетона

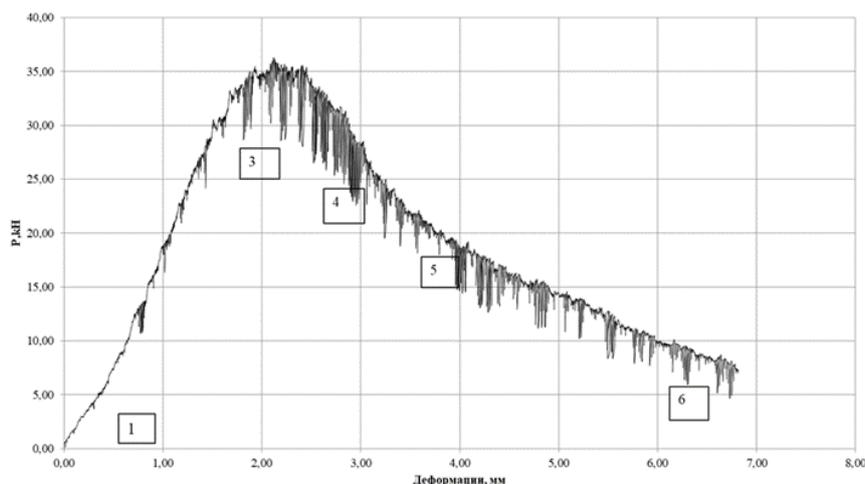


Рисунок 5 – График зависимости нагрузки от деформаций. Образец из туфобетона

Из уравнения  $d\sigma/d\varepsilon$  находим  $\alpha$  из условия  $\varepsilon = 0$  и  $\beta$  из условия  $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$ , если  $d\sigma/d\varepsilon = 0$ .

После определения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  можем записать соответствующие функции:

$$\text{Ф.И. Герстнера} \quad \sigma_{\Gamma} = E_0 \varepsilon (1 - 0,5 \varepsilon / \varepsilon_{bu}) \quad (6)$$

$$\text{П.А. Лукаша} \quad \sigma_{\text{Л}} = E_0 \varepsilon \left( 1 - \frac{1}{3} \varepsilon^2 / \varepsilon_{bu}^2 \right) \quad (7)$$

Для перехода от записи функции « $\sigma - \varepsilon$ » в общепринятом виде к фрактальной, используем правило перехода, предложенное В.К. Балхановым [16].

На первом этапе рассматриваем закон Гука в виде функции  $d\sigma/d\varepsilon = E$ . Согласно правилу фрактального преобразования можем записать:

$$d\sigma/d\varepsilon \rightarrow \int \sigma d_D \varepsilon = E. \quad (8)$$

Возьмем от функции (8) фрактальную производную:

$$\left( \frac{d}{d\varepsilon} \right)_D \int \sigma d_D \varepsilon = \left( \frac{d}{d\varepsilon} \right)_D E. \quad (9)$$

Согласно правилам фрактального дифференцирования, получаем:

$$\sigma_D = c^{-1} E \varepsilon^D, \quad (10)$$

где  $c$  – множитель, корректирующий масштабный уровень структуры;  $D$  – фрактальная размерность ( $D < E_p$ ), которая меньше евклидовой ( $E_p$ ).

Применяя аналогичные преобразования, получаем:

$$\sigma_{\Gamma D} = c_1^{-1} E_0 \varepsilon^D - 0,5 \frac{E_0}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon^{1+D} \cdot c_2^{-1} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{Л}D} = c_1^{-1} E_0 \varepsilon^D - c_2^{-1} \frac{E_0}{\varepsilon_{bu}^2} \cdot \frac{1}{3} \varepsilon^{2+D} \quad (12)$$

Формулы (10), (11), (12) дают возможность описать диаграммы деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » бетона на разных масштабных уровнях с учетом структурной неоднородности.

#### 4. Заключение

1. Предложены новые принципы построения теории разрушения бетона, основанные на экспериментальных данных о фрактальном строении структуры бетона, её многомасштабности, инвариантности.

2. Предложены аналитические формулы для описания диаграмм деформирования бетона с учётом многомасштабности и инвариантности структурной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Диалектика механики железобетона / В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2002. – №1. – С. 24-27.
2. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва: Стройиздат, 1996. – 412 с.
3. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – Москва: Стройиздат, 1961. – 96 с.
4. Чанышев, А.И. Блочно-иерархическая модель деформирования и разрушения горных пород. Экспериментальная проверка и теоретический анализ / А.И. Чанышев, О.Е. Белоусова // ФТПРПИ. – 2003. – №3. – С. 73-84.
5. Скоробогатов, С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории) / С.М. Скоробогатов. – Екатеринбург: Уральский ГУПС, 2009. – 511 с.
6. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2018. – 220 с.
7. Чернышев, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышев, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж: ГАСУ, 2012. – 224 с.
8. Соломатов, В.И. Теоретические основы создания композитов по принципу образования «Структуры в структуре». В книге Современные строительные композиты и их технология: Проблемы и перспективы развития / В.И. Соломатов, В.П. Селяев и др.; Под ред. В.П. Селяева. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 1994. – 175 с.
9. Садовский, М.А. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко // Физика земли. – 1982. – №12. – С. 3-18.
10. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Бенуа Б. Мандельброт; Пер. с англ. А.Р. Логунова. – Москва: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
11. Курленя, М.В. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядов атомно-ионных радиусов / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1996. – №12. – С. 3-14.
12. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина. – Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2001. – 150 с.
13. Куприяшкина, Л.И. Наполненные цементные композиты: монография / Л.И. Куприяшкина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2007. – 180 с.
14. Griffith, A.A. The theory of rupture // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft. 1924. – P. 55-63.
15. Фелтам, П. Деформация и прочность материалов / Пер. с англ. Н. З. Перцовского ; Под ред. М. Г. Лозинского. – Москва : Металлургия, 1968. – 120 с.
16. Балханов, В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / В. К. Балханов ; Ин-т физического материаловедения СО РАН. – Улан-Удэ : Изд-во БГУ, 2013. – 223 с.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M. Dialectics of reinforced concrete mechanics. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2002. No. 1. Pp. 24-27.
2. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 412 p.
3. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat, 1961. 96 p.
4. Chanyshev A.I., Belousova O.E. Block-hierarchical model of deformation and destruction of rocks. Experimental verification and theoretical analysis. *FTPRPI*. 2003. No. 3. Pp. 73-84.
5. Skorobogatov S.M. Disasters and survivability of reinforced concrete structures (classification and elements of theory). Yekaterinburg: Uralsky GUPS, 2009. 511 p.
6. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Physico-chemical foundations of the mechanics of destruction of cement composites. Saransk: Mordovian University Press, 2018. 220 p.
7. Chernyshev E.M., Dyachenko E.I., Makeev A.I. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites. Voronezh: GASU Publ., 2012. 224 p.
8. Solomatov V.I., Selyaev V.P. et al. Theoretical foundations of the creation of composites based on the principle of "Structure within structure" formation. In: *Modern building composites and their technology: Problems and prospects of development*. Ed. by V.P. Selyaev. Saransk: Mordovian University Press, 1994. 175 p.
9. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. On the discreteness property of rocks. *Physics of the earth*. 1982. No. 12. Pp. 3-18.
10. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. Moscow: Institute of Computer Research, 2002. 656 p.
11. Kurlenya M.V., Oparin V.N. On the large-scale factor of the phenomenon of zonal disintegration of rocks and canonical series of atomic-ion radii. *FTPRPI*. 1996. No. 12. Pp. 3-14.

12. Selyaev V.P., Solomatov V.I., Oshkina L.M. Chemical resistance of filled cement composites. Saransk: Ogarev Mordovian State University, 2001. 150 p.
13. Kupriyashkina L.I. Filled cement composites: a monograph. Saransk: Ogarev National Research Mordovian State University, 2007. 180 p.
14. Griffith A.A. The theory of rupture. *Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech.* Delft, 1924. Pp. 55-63.
15. Feltam P. Deformation and strength of materials. Moscow: Metallurgiya Publ., 1968. 120 p.
16. Balkhanov V.K. Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus. Ulan-Ude: Publishing House of BSU, 2013. 223 p.

**Информация об авторах:**

**Селяев Владимир Павлович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой строительных конструкций. E-mail: [ntorm80@mail.ru](mailto:ntorm80@mail.ru)

**Уткина Вера Николаевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: [uvn27@mail.ru](mailto:uvn27@mail.ru)

**Бабушкина Дельмира Рафиковна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, аспирант. E-mail: [delmira2009@yandex.ru](mailto:delmira2009@yandex.ru)

**Архипов Игорь Владимирович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, аспирант. E-mail: [arhipov\\_igor2000@list.ru](mailto:arhipov_igor2000@list.ru)

**Information about authors:**

**Selyaev Vladimir P.**

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Head of the Department "Building Structures". E-mail: [ntorm80@mail.ru](mailto:ntorm80@mail.ru)

**Utkina Vera N.**

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Building Structures". E-mail: [uvn27@mail.ru](mailto:uvn27@mail.ru)

**Babushkina Delmira R.**

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student of the Department of "Building Structures". E-mail: [delmira2009@yandex.ru](mailto:delmira2009@yandex.ru)

**Arhipov Igor V.**

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student of the Department of "Building Structures". E-mail: [arhipov\\_igor2000@list.ru](mailto:arhipov_igor2000@list.ru)

Статья поступила в редакцию 19.07.2025  
Одобрена после рецензирования 09.08.2025  
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 19.07.2025  
Approved after reviewing 09.08.2025  
Accepted for publication 11.08.2025