

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.328.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>

Совершенствование теоретических концепций проектирования составов дисперсно-армированных бетонов

Т.К. Сапрыкина , В.И. Жаданов 

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

✉ belova_tatyana_90@mail.ru



EDN: UETQYD

Аннотация

Введение. В строительном материаловедении важной задачей является получение дисперсно-армированных бетонов с заданными свойствами. На сегодняшний день имеется большой опыт экспериментальных и теоретических исследований в области проектирования составов дисперсно-армированных бетонов. Имеющиеся работы в большей степени решают задачи моделирования структуры дисперсно-армированных систем с позиций механики разрушения. Важной задачей является определение минимального объемного коэффициента армирования строительного композита. Разработанные различными исследователями модели пригодны для воспроизведения только в условиях ограниченных рецептурно-технологических факторов. Целью исследования является совершенствование теоретических подходов и разработка аналитической модели определения объемного содержания волокон в композите. В данной работе предлагается рассмотреть свойства дисперсно-армированных бетонов с позиций теории перколяции и фрактальной геометрии.

Материалы и методы. В настоящей статье проведен литературный анализ значительного количества экспериментальных данных из информационных ресурсов по теме дисперсного армирования бетонов. В работе применялся статистический анализ полученных данных и их аппроксимация. На основании полученных функций построены графики зависимостей фрактальной размерности волокон от анализируемых факторов.

Результаты исследования. В работе приведено теоретическое обоснование определения объемного коэффициента армирования фибробетона с помощью положений теории протекания. Проведен анализ и сравнение экспериментальных значений коэффициента армирования с теоретическими, полученными с помощью решения задачи сфер. Предложена модель для определения фрактальной размерности волокон в дисперсно-армированном бетоне. Проведен анализ имеющихся экспериментальных данных различных исследователей для установления степени влияния удельной поверхности волокон на показатель фрактальной размерности. Приведены зависимости для различных по материалу видов волокон, полученные аппроксимацией данных методом наименьших квадратов.

Обсуждение и заключения. Предложено определять фрактальную размерность композита аналитическим способом. Показано влияние относительной длины волокон и их удельной поверхности на показатель фрактальной размерности. Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов. Это, безусловно, способствует дальнейшему развитию теоретических концепций получения композитов на основе фибробетонов.

Ключевые слова: дисперсно-армированные бетоны, теоретические концепции, проектирование составов, объемный коэффициент армирования, теория перколяции, протекание, фрактальная размерность.

Для цитирования. Сапрыкина Т.К., Жаданов В.И. Совершенствование теоретических концепций проектирования составов дисперсно-армированных бетонов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):66–73. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>

Improving Theoretical Concepts of Composition Design of Dispersedly-Reinforced Concretes

Tatyana K. Saprykina , Viktor I. Zhadanov 

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

 belova_tatyana_90@mail.ru

Abstract

Introduction. Obtaining the dispersedly-reinforced concretes with given properties is an important objective of materials science in civil engineering. Today, a great deal of experimental and theoretical research in the field of designing the compositions of dispersedly-reinforced concretes is being held. The majority of the existing works solve mainly the problems of modeling the structure of dispersedly-reinforced systems from perspective of fracture mechanics. However, an important objective is to determine a minimum reinforcement volume ratio of the composite material. The models developed by different researchers can be reproduced only for the limited recipe and technological factors. The aim of the present research is to improve the theoretical approaches and develop an analytical model for determining the volume of fiber in a composite. The paper proposes to investigate the properties of dispersedly-reinforced concrete from perspective of the percolation theory and fractal geometry.

Materials and Methods. Literature analysis of a significant amount of experimental data from information sources on the topic of dispersed reinforcement of concrete was carried out in the article. The statistical analysis and approximation of the obtained data was made within the research. Based on the obtained functions, the graphs of the dependencies of the fractal dimension of fiber on the analysed factors were plotted.

Results. The paper presents the theoretical grounds for determining the volume ratio of fiber concrete reinforcement using provisions of the percolation theory. The analysis and comparison of the experimental values of the reinforcement ratio with the theoretical values obtained by solving a problem involving spheres was carried out. A model for determining the fractal dimension of fibers in dispersedly-reinforced concrete was proposed. The available experimental data of different researchers was analysed to establish the degree of influence of the specific surface area of fibers on the fractal dimension parameter. Dependencies obtained by approximating the data using the least squares method were presented for the different types of fibers sorted by material.

Discussion and Conclusion. It is proposed to determine the fractal dimension of the composite material by the analytical method. The influence of the relative length of the fibers and their specific surface area on the fractal dimension parameter was shown. The research in this direction may be of certain scientific interest in terms of forecasting the properties of dispersedly-reinforced concretes and design of their compositions. This, undoubtedly, will contribute to further development of the theoretical concepts of creating the fiber reinforced concrete composites.

Keywords: dispersedly-reinforced concrete, theoretical concepts, composition design, reinforcement volume ratio, percolation theory, percolation, fractal dimension

For Citation. Saprykina TK, Zhadanov VI. Improving Theoretical Concepts of Composition Design of Dispersedly-Reinforced Concretes. *Modern trends in construction, urban and territorial planning*. 2024;3(4):66–73. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>

Введение. В строительном материаловедении направление, связанное с созданием композитов на основе дисперсно-армированных бетонов, зародилось во второй половине XX века и до сих пор не утратило своей актуальности [1, 2]. Дисперсно-армированные бетоны широко используются в различных сферах строительного производства, в том числе в конструкциях общестроительного назначения, инженерных и специальных сооружениях [3].

Важной задачей является получение дисперсно-армированных бетонов с заданными свойствами, что возможно за счет совершенствования теоретических концепций, связанных с проектированием составов фибробетонов и прогнозированием их свойств. На сегодняшний день в данном направлении накоплен большой опыт экспериментальных и теоретических исследований. Методики, применяемые в работах, в основном носят эмпирический характер и пригодны для воспроизведения только в условиях ограниченных рецептурно-технологических факторов [4, 5].

Нельзя не отметить весомый вклад отдельных исследователей в формирование теоретических подходов проектирования составов дисперсно-армированных бетонов и, в частности, определения минимально необходимого объемного коэффициента армирования μ [6–8]. Так, в работах Ю.В. Пухаренко с сотрудниками предложена структурно-технологическая модель фибробетона, отражающая взаимодействие основных структурообразующих элементов композита и их взаимосвязь со свойствами получаемого материала [7, 9]. Также в этих работах предложены формулы для прогнозирования прочности фибробетона и определения оптимального коэффициента армирования μ . Методологической основой исследований послужило видоизмененное «правило смесей».

Несмотря на разработанные аналитические формулы, некоторые параметры определяются эмпирическим путем (например, прочность сцепления волокон с цементным камнем).

Известен также подход, согласно которому оптимальное объемное содержание армирующих волокон в бетоне определяется аналитически по критерию максимального напряжения трещинообразования $\sigma_{\text{крит}}$ (величина, при превышении которой рост трещин в материале становится энергетически возможным процессом). При этом число армирующих элементов на каждом масштабном уровне структуры композита должно соответствовать числу трещин [7]. Несомненным достоинством данного подхода является моделирование структуры дисперсно-армированных бетонов на различных масштабных уровнях с учетом не только силовых факторов, но и объема энергии, которую необходимо затратить при разрушении. Вместе с тем разработанные зависимости можно применять при ограниченной относительной длине армирующих элементов, равной $L/d = 80 \div 120$, что требует дополнительных исследований в случае применения минеральных или органических волокон, относительная длина которых чаще всего варьируется в пределах от $L/d = 300$ до нескольких тысяч.

В данной работе предлагается рассмотреть свойства дисперсно-армированных бетонов с учетом положений теории перколяции (протекания) и фрактальной геометрии. В фибробетонах протекание возникает при определенном количестве армирующих элементов и локализации их в объеме композита, при которых формируемые кластеры оказываются «связанными» друг с другом. Таким образом, в композите образуется бесконечный кластер, геометрия которого определяет физические и физико-химические свойства системы [10, 11]. Целью настоящей работы является изучение фрактальной размерности композитов на основе дисперсно-армированных бетонов. Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов.

Материалы и методы. В настоящей статье проведен литературный анализ значительного количества экспериментальных данных из информационных ресурсов (монографий, диссертаций, научных статей) по теме дисперсного армирования бетонов. В качестве анализируемых параметров были выбраны:

- вид вяжущего, примененного при изготовлении образцов;
- вид матрицы (крупнозернистый бетон, мелкозернистый бетон, цементный камень);
- вид волокон и соотношение длины к диаметру L/d ;
- объемное содержание волокон μ ;
- прочностные характеристики дисперсно-армированного композита.

Экспериментальные данные были обобщены и сравнивались с теоретическими значениями объемного коэффициента μ , определенного с помощью задачи сфер [12]. Задача сфер играет в теории протекания особую роль — с ее помощью пытаются понять многие физические переходные процессы.

Также в работе применялся статистический анализ экспериментальных данных и их аппроксимация. На основании полученных функций построены графики зависимостей фрактальной размерности от анализируемых факторов.

Результаты исследования. Объемный коэффициент армирования μ , при котором происходит протекание, можно определить с помощью модели задачи сфер [12]. Эта модель играет ключевую роль в теории протекания, помогая понять многие физические процессы перехода. Представим, что волокна в хаотично армированном композите находятся внутри сфер, диаметр которых равен длине волокна L . Сферы считаются связанными, если центр одной из них находится внутри другой. Протекание возникает при достижении определенной концентрации пересекающихся сфер, которая определяется (1):

$$\frac{\pi}{6} D^3 n_V = B_{c,V}, \quad (1)$$

где $B_{c,V}$ — среднее количество пересекающихся сфер ($B_{c,V} = 2,7 \pm 0,1$); D — диаметр сферы (численно совпадает с длиной волокна L); n_V — концентрация сфер в единице объема.

Коэффициент армирования по объему композиционного материала равен:

$$\mu = \frac{V_l}{V_0}, \quad (2)$$

где V_l — объем волокон; V_0 — объем композита.

После преобразования получим:

$$\mu = \frac{3}{2} B_{c,V} \left(\frac{d_l}{L} \right)^2, \quad (3)$$

где d_l — диаметр волокна.

Значения объемного коэффициента армирования μ , рассчитанные по формуле (3) (рис. 1, таблица 1), являются минимальными и достаточными для формирования в дисперсно-армированной матрице бесконечного кластера [13]. Однако применительно к реальным объектам необходимо учитывать механические и физико-механические свойства материала волокон.

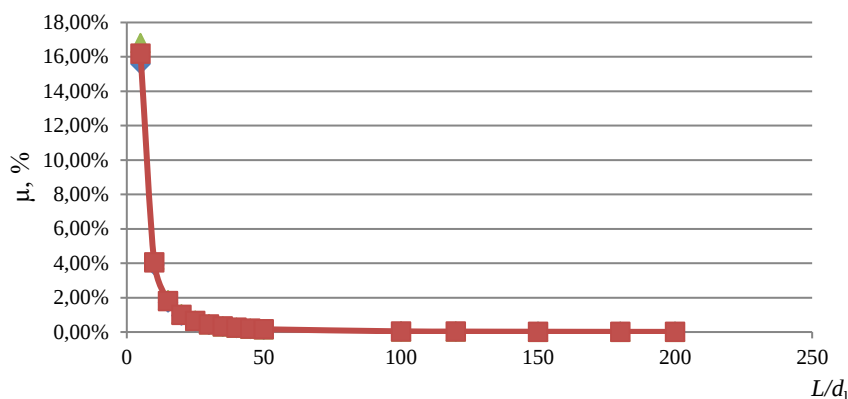
Рис. 1. Зависимость $\mu = (L/d_l)$ [13, с. 62]

Таблица 1

Значения μ (%), рассчитанные по формуле (3)

$B_{c,v}$	L/d_l								
	10	20	30	40	50	100	120	150	200
2,6	3,90	0,98	0,43	0,24	0,16	0,04	0,027	0,017	0,010
2,7	4,05	1,01	0,45	0,25	0,16	0,04	0,028	0,018	0,010
2,8	4,20	1,05	0,47	0,26	0,17	0,04	0,029	0,019	0,011

На основании литературного анализа монографий, научных статей и диссертационных исследований по теме дисперсного армирования получены данные значений $\mu(R_{\max})$ (при которых достигается максимальная прочность композита), используемых на практике. Также проведено их сопоставление с теоретическими значениями (таблица 2).

Анализируя данные таблицы 2, можно сделать вывод о том, что теоретическая формула применима только для небольших значений L/d_l . Очевидно, длина волокон (особенно минеральных и органических) может изменяться в процессе приготовления фибробетонной смеси в результате дробления или изгиба. Поэтому фактическое L/d_l будет существенно меньше. Кроме того, неоднородности в виде пор и включений заполнителя изменяют пространственную ориентацию волокон. Совокупность волокон в хаотично армированном бетоне будет иметь фрактальную размерность в диапазоне $1 < D < 3$ [14].

Таблица 2

Значения объемных коэффициентов армирования μ для различных видов армирующих волокон

№ п/п	Вид волокон	Отношение L/d_l	Содержание волокон, % по объему	
			экспериментальное	теоретическое
1	Стальные волокна	12 ÷ 120	6,9	3,45 ÷ 0,010
2	Минеральные волокна	300 ÷ 2000	2,0	$0,35 \times 10^{-2} \div 1,5 \times 10^{-4}$
3	Органические волокна	100 ÷ 1500	0,9	$0,041 \div 0,35 \times 10^{-3}$

Примечание: экспериментальные значения $\mu(R_{\max})$ определены по объему цементного камня в 1 м³ бетона.

Если предположить, что:

$$\mu = \frac{3}{2} B_{c,v} \left(\frac{d_l}{L} \right)^2 = \left(\frac{d_l}{L} \right)^{D_H}, \quad (4)$$

где D_H — размерность Хаусдорфа (фрактальная размерность).

Тогда D_H равна:

$$D_H = 2 + \frac{\ln\left(\frac{3}{2} B_{c,v}\right)}{\ln\left(\frac{d_l}{L}\right)}. \quad (5)$$

Значения фрактальной размерности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения фрактальной размерности при увеличении L/d_l

$B_{c,v}$	L/d_l									
	стальные волокна									минеральные волокна
	10	20	30	40	50	100	120	150	200	1000
2,6	1,41	1,55	1,60	1,63	1,65	1,70	1,72	1,73	1,74	1,80
2,7	1,39	1,53	1,59	1,62	1,64	1,70	1,71	1,72	1,74	1,80
2,8	1,38	1,52	1,58	1,61	1,63	1,69	1,70	1,71	1,73	1,79

Как видно из вышеприведенной таблицы, с увеличением соотношения L/d_l фрактальная размерность Хаусдорфа увеличивается, что связано с увеличением дисперсности волокон по мере уменьшения их диаметра и более разнообразной их ориентацией в объеме бетона. Показателем дисперсности волокон является их удельная поверхность $S_{l,u}$, отнесенная к объему волокна, размерность ($\text{м}^2/\text{м}^3$):

$$S_{l,u} = \frac{2}{L} \left(2 \frac{L}{d_l} + 1 \right). \quad (6)$$

Отсюда:

$$d_l/L = \frac{4}{S_{l,u}L - 2}. \quad (7)$$

Фрактальная размерность в этом случае будет равна:

$$D_H = 2 + \frac{\ln\left(\frac{3}{2} B_{c,v}\right)}{\ln\left(\frac{4}{S_{l,u}L - 2}\right)}. \quad (8)$$

Для установления степени влияния удельной поверхности волокон на показатель фрактальной размерности Хаусдорфа проведен анализ имеющихся экспериментальных данных различных исследователей по предложенной выше формуле (таблица 4).

Таблица 4

Исходные данные для установления зависимостей

№ п/п	Объем цементного камня, V_0 , м^3	Длина волокна, L , мм	Диаметр волокна, d_l , мм	Соотношение, L/d_l	Объемный коэффициент армирования, $\mu_v(R_{max})$	Удельная поверхность волокон, $S_{l,u}$, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Фрактальная размерность Хаусдорфа, D_H
Стальные волокна							
1	0,16	30	0,3	100	0,05	13400,00	1,70
2	0,21	50	1,0	50	0,024	4040,00	1,64
3	0,26	60	0,8	80	0,1	5366,67	1,68
4	0,26	33	0,9	35	0,1	4303,03	1,61
5	0,34	11	0,2	70	0,12	25636,36	1,67
6	0,32	20	0,2	100	0,06	20100,00	1,70
7	0,15	054	1,0	54	0,13	4037,04	1,65
8	0,44	32	0,3	100	0,07	12562,50	1,70
9	0,42	11	0,2	70	0,23	25636,36	1,67
10	0,14	54	1,0	54	0,14	4037,04	1,65
11	0,25	50	0,4	12,5	0,04	10400,00	1,45
12	0,25	10	0,4	25	0,04	10200,00	1,57
13	0,25	15	0,4	37,5	0,04	10133,33	1,61
14	0,2	40	0,8	50	0,08	5050,00	1,64
15	0,2	30	0,7	46	0,06	6200,00	1,63
16	0,2	55	0,7	75	0,06	5490,91	1,68
17	0,2	25	0,6	40	0,06	6480,00	1,62
18	0,2	45	0,6	75	0,06	6711,11	1,68
19	0,33	50	0,8	63	0,015	5080,00	1,66
20	0,33	30	0,8	37,5	0,015	5066,67	1,61
21	0,33	40	0,8	50	0,015	5050,00	1,64
22	0,33	32	0,9	35	0,015	4437,50	1,61
23	0,3	15	0,3	50	0,067	13466,67	1,64
24	0,23	30	0,8	37,5	0,08	5066,67	1,61
Минеральные волокна							
25	0,15	14	0,015	930	0,0043	266810	1,80
26	0,32	9	0,01	900	0,03	400220	1,79
27	0,24	12	0,013	920	0,033	307860	1,80
28	0,27	15	0,012	1250	0,04	333470	1,80
29	0,25	13	0,01	1300	0,036	400154	1,80
30	0,15	12	0,018	670	0,0008	222390	1,78
31	0,29	12	0,015	800	0,002	266830	1,79
32	0,33	12	0,012	1000	0,007	333500	1,80
22	0,24	12	0,012	1000	0,008	333500	1,80

Примечание: анализировались источники, в которых имелись необходимые исходные данные.

Зависимость $D_H = f(S_{i,u})$ описывается логарифмической функцией вида:

$$D_H = a + b \cdot \ln(S_{i,u}), \quad (9)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты, приведенные в таблице 5.

На рис. 2 приведены зависимости $D_H = f(S_{i,u})$ для различных видов волокон, полученные аппроксимацией исходных экспериментальных данных методом наименьших квадратов. В таблице 5 указаны значения эмпирических коэффициентов и статистических показателей функций.

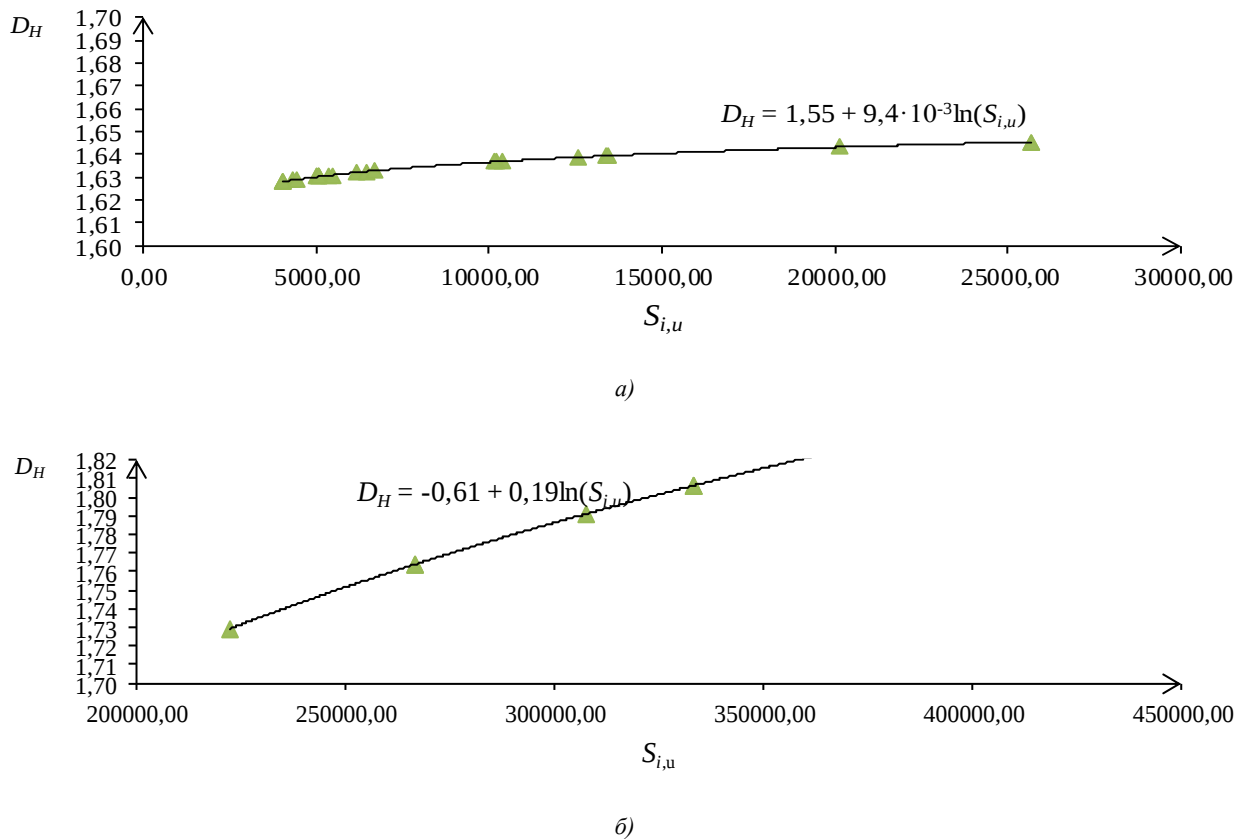


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от удельной поверхности волокон: a — для стальных волокон; $б$ — для минеральных волокон

Таблица 5

Значения эмпирических коэффициентов и статистических показателей функций

Вид волокон	Коэффициенты		Среднеквадратическое отклонение, σ	Коэффициент вариации, v , %
	a	b		
Стальные	1,55	$9,4 \times 10^{-3}$	0,052	3,0
Минеральные	-0,61	0,19	0,035	1,9

В обоих случаях зависимости имеют восходящий характер, что подтверждает вышеуказанное предположение. Однако при их сопоставлении четко наблюдается, что в случае применения стальных волокон значение удельной поверхности оказывает малое влияние на показатель фрактальной размерности. В области больших значений $S_{i,u}$, характерных для минеральных волокон, степень увеличения D_H выше.

В подтверждение рассчитаем коэффициенты корреляции $\text{cov}(D_H, S_{i,u})$, а также $\text{cov}(D_H, L/d_i)$. Так, для стальных волокон коэффициент корреляции составляет $\text{cov}(D_H, S_{i,u}) = 0,22$, $\text{cov}(D_H, L/d_i) = 0,86$, а для минеральных — $\text{cov}(D_H, S_{i,u}) = 0,73$, $\text{cov}(D_H, L/d_i) = 0,99$.

Обсуждение и заключение. Полученные данные указывают на слабую взаимозависимость удельной поверхности стальных волокон от их фрактальной размерности, в то же время в обоих случаях значимое влияние

оказывает именно относительная длина волокон L/d_f . Возможно, это связано с тем, что волокна изгибаются в композите, и их длина по факту варьируется, а удельная поверхность остается постоянной величиной.

Таким образом, в настоящей работе предложено определять фрактальную размерность композита аналитическим путем, несмотря на то что в настоящее время предложены различные экспериментальные методы определения фрактальной размерности. Статистический анализ обширных экспериментальных данных позволяет предположить, что фрактальная размерность может служить надежным инструментом для оценки оптимальности структуры композитных материалов.

Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов. Это, безусловно, способствует дальнейшему развитию теоретических концепций получения композитов на основе фибробетонов.

Список литературы / References

1. Rusanov VE, Maslov PS, Alekseev VA. The Effectiveness of Using Fibre-Reinforced Concrete in Underground Construction: Experience and Prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(3):276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287> (In Russ.)
2. Нажуев М.П., Самофалова М.С., Ельшаева Д.М., Жеребцов Ю.В., Доценко Н.А., Курбанов Н.С. и др. Влияние рецептурных факторов на прочностные характеристики базальтофибробетонов. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2021;(7):24–32. <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-7-24-32>
3. Nazhuyev MP, Samofalova MS, Elshaeva DM, Zherebtsov YuV, Dotsenko NA, Kurbanov NS, et al. Influence of Recipe Factors on Strengths Characteristics of Basalt Fiber Concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V. G. Shukhov*. 2021;(7):24–32. (In Russ.) <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-7-24-32>
3. Ибэ Е.Е., Шибаева Г.Н., Артемьев Н.А., Миколайчик А.А. Дисперсно-армированные бетоны на основе базальтового волокна. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(2(74)):245–260. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45485957_89333321.pdf (дата обращения: 01.11.2024).
4. Ibe EE, Shibaeva GN, Artemiev NA, Mikolaichik AA. Dispersed-Reinforced Concrete Based on Basalt Fiber. *Engineering Journal of Don*. 2021;(2(74)):245–260. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45485957_89333321.pdf (accessed: 01.11.2024).
4. Park JJ, Yoo DY, Kim S, Kim SW. Benefits of Synthetic Fibers on the Residual Mechanical Performance of UHPFRC after Exposure to ISO Standard Fire. *Cement and Concrete Composites*. 2019;104:103401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103401>
5. Althoey F, Zaid O, Serbanoiu AA, Gradinaru CM, Sun Y, Arbili MM, et al. Properties of Ultra-Performance Selfcompacting Fiber-Reinforced Concrete Modified with Nanomaterials. *Nanotechnology Reviews*. 2023;12(1):20230118. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0118>
6. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. *Вопросы теории и проектирования, технология, конструкция*. М.: Издательство АСВ; 2011. 642 с.
6. Rabinovich FN. *Composites Based on Disperse-Reinforced Concrete. Theory and Design Issues, Technology, Design*. Moscow: ASV Publ.; 2011. 642 p. (In Russ.)
7. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(5(87)):752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
7. Pukharensko YuV, Panteleev DA, Zhavoronkov MI. Evaluation of Dispersion Reinforcement in Concrete in Terms of Strength and Crack Resistance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(5(87)):752–761. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
8. Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого бетона и повышение его трещиностойкости. Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж; 2001. 21 с.
8. Korotkikh DN. *Multilevel Dispersed Reinforcement of the Structure of Fine-Grained Concrete and Increasing Its Crack Resistance*. Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Voronezh; 2001. 21 p. (In Russ.)
9. Пухаренко Ю.В., Инчик В.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Проектирование составов полиармированных фибробетонов. *Вестник гражданских инженеров*. 2018;3(68):118–122. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122>
9. Pukharensko YuV, Inchik VV, Panteleev DA, Zhavoronkov MI. Designing of Poly-Fiber-Reinforced Concrete Compositions. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov (Bulletin of Civil Engineers)*. 2018;3(68):118–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122>
10. Федер Е. *Фракталы*. М.: Мир; 1991. 254 с.

Feder E. *Fractals*. Moscow: Mir Publ.; 1991. 254 p. (In Russ.)

11. Терехов С.В. *Фракталы и физика подобия*. Донецк: Цифровая типография; 2011. 255 с.

Terekhov SV. *Fractals and Physics of Similarity*. Donetsk: Digital Printing House; 2011. 255 p. (In Russ.)

12. Эфрос А.Л. *Физика и геометрия беспорядка*. М.: Наука; 1982. 270 с.

Efros AL. *Physics and Geometry of Disorder*. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 270 p. (In Russ.)

13. Зыонг Тхань Куй. *Высокопрочные легкие фибробетоны конструкционного назначения*. Дис. канд. техн. наук. Москва; 2020. 201 с.

Duong Thanh Quy. *High-Strength Lightweight Fiber-Reinforced Concrete for Structural Purposes*. Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Moscow; 2020. 201 p. (In Russ.)

14. Омурбекова Г.К., Жапаркулов А.М., Салиева М.Г. Моделирование зависимости прочности бетона от фрактальной размерности кварцевого песка. *Наука. Образование. Техника*. 2024;2(80):29–33. <https://doi.org/10.54834/vi2/.370>

Omurbekova GK, Zhaparkulov AM, Salieva MG. Modeling of Concrete Strength Dependence on Fractal Dimension of Silica Sand. *Science. Education. Technology*. 2024;(2(80)):29–33. <https://doi.org/10.54834/vi2/.370>

Об авторах:

Татьяна Константиновна Сапрыкина, старший преподаватель кафедры технологии строительного производства Оренбургского государственного университета (460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр. Победы, 13), кандидат технических наук, [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), belova_tatyana_90@mail.ru

Жаданов Виктор Иванович, заведующий кафедрой строительных конструкций Оренбургского государственного университета (460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр. Победы, 13), доктор технических наук, профессор, [ResearcherID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), organ-2003@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Т.К. Сапрыкина: формирование основной концепции, цели и задач исследования, анализ и статистическая обработка данных литературных источников, формирование выводов;

В.И. Жаданов: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatyana K. Saprykina, Cand.Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Construction Production Technology Department, Orenburg State University (13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), belova_tatyana_90@mail.ru

Viktor I. Zhadanov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Construction Production Technology Department, Orenburg State University (13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation), [ResearcherID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-1234-5678), organ-2003@bk.ru

Claimed Contributions:

TK Saprykina: formulating the main concept, aim and objectives of the study, analysis and statistical processing of data from the literature sources, formulating the conclusions;

VI Zhadanov: scientific supervision, analysis of the research results, refining the text, correcting the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript

Поступила в редакцию/ Received 18.11.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 01.12.2024

Принята к публикации/ Accepted 09.12.2024