

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-8-15

Сулейманова Л.А., \*Рябчевский И.С., Погорелова И.А., Богачева М.А.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
\*E-mail: kloud09@mail.ru

## ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

**Аннотация.** Исследование фрактальной размерности пор в ячеистом бетоне и газобетонных блоках существенно влияет на понимание пористой структуры материалов. Одним из ключевых методов оценки этой размерности является подсчет ячеек. Фрактальная размерность пор свидетельствует о степени их плотного распределения и тесно связана с физическими свойствами материала, такими как тепло- и звукоизоляция. Результаты исследования показали, что повышение фрактальной размерности пор связано с увеличением количества мельчайших пор и усложнением их пространственного размещения. При этом, использование метода подсчета ячеек позволяет более точно оценить эту фрактальную размерность, основываясь на числе ячеек, содержащих поры различных масштабных уровней. Одним из значимых аспектов является корреляция фрактальной размерности пор с их площадью и размерами, что позволяет оценить шероховатость пор и их распределение в материале, а также понять, как увеличение размеров пор ведет к уменьшению их количества и утолщению стенок между ними. Фрактальная размерность пор позволяет охарактеризовать структуру порового пространства, что имеет важное значение для понимания микроструктуры материала. Управление микроструктурой ячеистого бетона при помощи анализа фрактальной размерности может улучшить его теплоизоляцию, прочность и звукоизоляцию, открывая новые возможности для создания более эффективных строительных материалов.

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, пористая структура, ячеистый бетон, метод подсчета ячеек, коэффициент регрессии.

**Введение.** В сфере современного строительства ячеистый бетон стал одним из наиболее распространенных материалов благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая теплоизоляция, долговечность, звукоизоляция и экологическая безопасность [1–3]. Ячеистый бетон низкой плотности с высокой пористостью часто используют для улучшения теплоизоляционных показателей зданий в качестве утепления стен и чердачных перекрытий [4–6].

Изучение структуры ячеистого бетона приобретает большое значение в современном мире из-за многочисленных преимуществ этого материала. Однако реальная структура пор ячеистого бетона представляет собой сложную и хаотичную систему. Эти поры имеют различные размеры и формы, что затрудняет их точное измерение и анализ. Даже если у пор общие характеристики, например, объемные свойства, их формы могут значительно различаться, что делает полный анализ структуры пор более сложным и трудоемким. Поэтому для более точного понимания внутренней структуры материала необходимы более точные методы измерения и анализа, которые позволят лучше охарактеризовать разнообразие форм пор. В настоящее время существуют некоторые параметры, используемые для понимания структуры пор ячеистого бетона, такие как форма пор и их распределение по размерам и др., однако они имеют свои ограничения и не всегда

могут обеспечить полное исследование и описание всего многообразия структуры пор.

Фактическая морфология пористой микроструктуры более сложна, чем обычная форма, выраженная в целочисленных измерениях, таких как точка, линия, плоскость и пространство, определенные в евклидовой геометрии. Чтобы оценить реалистичные геометрические характеристики такой структуры, в конце 1970-х годов математиком Бенуа Мандельбротом была введена фрактальная геометрия [6]. Согласно фрактальной геометрии, фрактальной структурой можно считать структуру, обладающую характеристиками самоподобия и рекурсивности, в которой небольшая часть структуры подобна всей структуре и повторяется в пределах определенного масштаба. Хотя фрактальная структура представляет собой структурно сложную и хаотическую систему, ее можно количественно определить, как нецелое фрактальное измерение с помощью теоретических выражений. Следовательно, сложные геометрические характеристики пористой структуры внутри пористой микроструктуры могут быть количественно оценены через нецелые фрактальные размерности [7, 8]. Геометрически сложная форма пористой структуры материала формируется в результате серии процессов газовой выделенности и гидратации вяжущего и представляет собой фрактальную структуру с очевидными фрактальными характеристиками.

ками с точки зрения распределения пор по размерам и извилистости связывающих поры путей. Следовательно, если структура пор анализируется с использованием параметров геометрической характеристики фрактальных размеров вместе с существующими параметрами объемной характеристики, сложная структура пор может быть проанализирована более эффективно, поскольку два типа параметров действуют дополняюще [9].

Модели, разработанные для описания геометрических характеристик с точки зрения распределения пор по размерам, обычно подразделяются на три концепции, основанные на теоретических принципах: фрактал поверхности пор, фрактал массы пор и фрактал твердой массы [10]. Эти три концепции фрактальных моделей описывают характеристики распределения пор по размерам микроструктуры в трех аспектах: поверхность пор, объем пор и объем твердого тела соответственно. Однако на сегодняшний день эти модели по-разному используются разными исследователями без учета внутренних свойств анализируемых материалов.

Следовательно, чтобы получить отдельные результаты и сделать возможным сравнение с другими результатами исследований, посвященных различным пористым материалам, необходимо определить репрезентативную фрактальную концепцию, подходящую для анализа поровой структуры вяжущего материала. Более того, исследования, основанные на таком учете свойств материалов, необходимы для практического использования [11, 12].

Существует несколько основных методов определения фрактальной размерности.

Метод ячеек разбивает изображение или объект на сетку квадратных ячеек заданного размера. Затем определяется, сколько ячеек содержит часть объекта. При изменении размера ячеек результаты снова оцениваются, и повторяются до тех пор, пока не будет достигнута определенная граница размера ячейки. После этого происходит расчет фрактальной размерности на основе соотношения между размером ячейки и количеством ячеек, содержащих объект.

Метод растущих квадратов также основан на размещении квадратов различного размера на изучаемом объекте. Здесь начинается с квадрата минимального размера, затем постепенно увеличивается размер квадратов и определяется, сколько из них покрывает объект. Фрактальная размерность вычисляется на основе того, как количество квадратов меняется в зависимости от их размера. Для определения фрактальной размерности методом рассеивания используются геометрические преобразования, чтобы оценить

структуру объекта при разных масштабах. Объект разбивается на части, которые затем масштабируются, перемещаются и поворачиваются. Анализируется, как эти преобразования влияют на структуру объекта, и на основе этих изменений определяется его фрактальная размерность.

Метод Фурье использует преобразование Фурье для анализа частотных характеристик текстур или структур. Он основан на связи между фрактальной размерностью и наклоном графика логарифма спектра мощности. Анализируя спектральные характеристики объекта, можно определить его фрактальную размерность.

Метод хаоса используется для создания фрактальных фигур и последующего анализа их структуры. Он основан на стохастическом алгоритме, который создает фрактальные фигуры, и их структура анализируется для вычисления фрактальной размерности [12].

**Материалы и методы.** Для более точного количественного описания характера пористой структуры в ячеистом бетоне вводится безразмерный параметр фрактальности. Авторами предложено использовать фрактальную размерность  $D$  в качестве такого параметра, который отражает степень заполнения порами объема ячеистого бетона. Этот параметр принимает значения в диапазоне от 1 до 2. Значение  $D = 1$  указывает на отсутствие пор, а  $D = 2$  означает полное заполнение площади рассматриваемой структуры ячеистого бетона порами, формируя одну сплошную пору [13–15].

При использовании метода подсчета ячеек для исследования фрактальной размерности пористой структуры пористого бетона необходимо определить площадь, занимаемую порами на плоскости. Для этого необходимо разбить плоскость на элементы определенного размера  $a$  и определить количество элементов  $N$ , проходящих через внутреннюю границу поры. Связь между  $N$  и  $a$  описывается формулой Мандельброта-Ричардсона.

$$N = C \cdot a^{-D}, \quad (1)$$

где  $D$  – фрактальная размерность рассматриваемой пористой структуры,  $C$  – типовой во фрактальной геометрии неопределенный множитель.

Показатель  $D$ , как это следует из (1), удобно определить следующим образом:

$$D = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln N(a)}{\ln 1/a}. \quad (2)$$

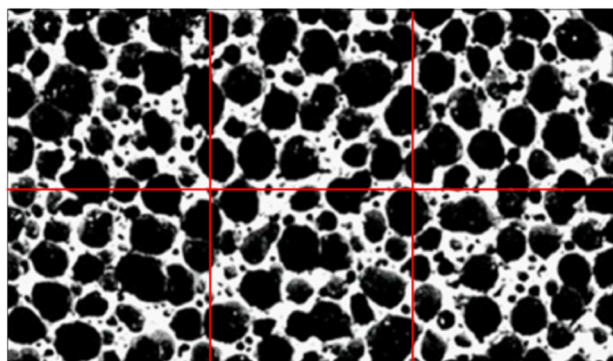
При совершенствовании технологии ячеистого бетона анализ фрактальной размерности пористой структуры позволяет определить не только количество пор, но и их форму, будь то сферический многогранник или эллипсоид вращения. Этот анализ позволяет рассчитать площади пор и их соотношения [16, 17]. Фрактальная

размерность структуры определяется по формуле:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \ln N \cdot \sum_{i=1}^n \ln a - n \sum_{i=1}^n \ln a \cdot \ln N}{n \sum_{i=1}^n \ln a^2 - (\sum_{i=1}^n \ln a)^2}, \quad (3)$$

где  $n$  – число измерений.

Для проведения исследования использовался фрагмент газобетонного блока марки по средней плотности  $D500$  завода ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия) размером  $8 \times 15$  мм, лицевая поверхность которого представлена на рисунке 1, а. Для улучшения качества оцифровки поры образца заполнены пигментом на основе черной гуаши. Оцифрованная поверхность поделена на шесть равных по площади участков (рис. 1, б) с а)



целью упрощения анализа изображений и повышения однородности показателей пористой структуры. Цифровое изображение импортируется в специализированную программу для обработки изображений, позволяющую определить процентное содержание пикселей каждого по-пиксельного значения RGB на изображении. Показатель пористости ячеистого бетона определяется процентным содержанием пикселей сформированного цифрового изображения, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету. Результаты анализа изображений представлены в таблице 1.

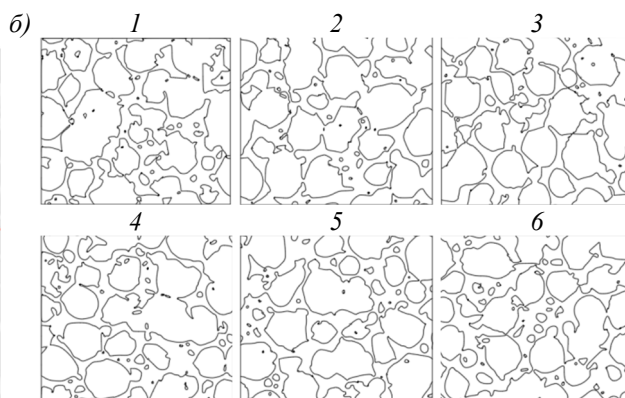


Рис. 1. Лицевая поверхность образца ячеистого бетона: а – натуральный вид, поделенный на участки; б – оцифрованный вид; 1-6 – номера участков

Таблица 1

**Результаты анализа изображений поверхности ячеистого бетона**

Номер участка	Пористость, %	Средний диаметр пор, мм	Площадь поверхности пор, мм <sup>2</sup>	Коэффициент формы пор
1	66,38	0,8448	237,44	1,85
2	65,73	1,23689	235,11	4,00
3	65,85	1,1291	235,54	3,33
4	66,08	0,9884	236,37	2,54
5	62,97	0,7834	225,24	1,77
6	59,67	0,6658	213,44	1,21

Для расчета фрактальной размерности в ячеистом бетоне используются размеры ячеек плоскости на уровнях 2,5, 2,0, 1,0, 0,5 и 0,1 мм. Для изучения разброса среднего значения фрактальной размерности применяется выборка из 5 изме-

ренных точек, вычисляются 10 значений показателя  $h = 2(D-1)$ , где  $D$  – фрактальная размерность, вычисленная по формуле (4):

$$h = (\ln(K_{n+1}) - \ln(K_n)) / (\ln(a_{n+1}) - \ln(a_n)). \quad (4)$$

**Основная часть.** Результаты расчета фрактальной размерности представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Результаты расчета фрактальной размерности**

Размер ячейки $a$ , мм	Номер участка																	
	1			2			3			4			5			6		
	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек $N$	$\ln a$	$\ln N$
2,5	110	0,92	4,7	110	0,92	4,7	110	0,92	4,7	110	0,92	4,7	110	0,92	4,7	110	0,92	4,7
2	167	0,69	5,12	168	0,69	5,12	164	0,69	5,1	161	0,69	5,08	171	0,69	5,14	170	0,69	5,14
1	784	0	6,66	817	0	6,71	788	0	6,67	764	0	6,64	777	0	6,66	772	0	6,65
0,5	5758	1,61	8,66	6042	1,61	8,71	5766	1,61	8,66	5631	1,61	8,64	5797	1,61	8,67	5515	1,61	8,62
0,1	37978	2,3	10,54	37307	2,3	10,53	43066	2,3	10,67	39038	2,3	10,57	40840	2,3	10,62	39992	2,3	10,6

На основании полученных данных построены графики зависимости фрактальной размерности от основных характеристик пористой

структуры ячеистого бетона, представленные на рисунке 2.

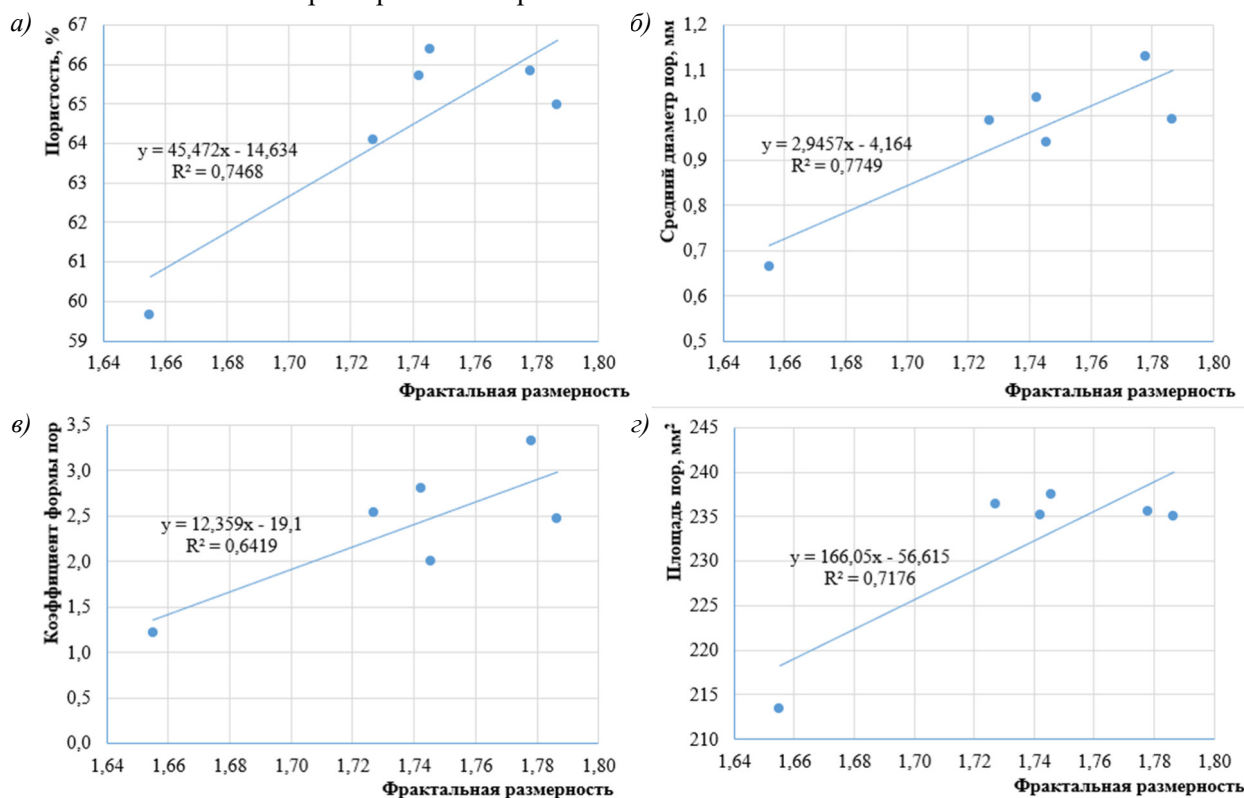


Рис. 2. Зависимости фрактальной размерности от основных характеристик пористой структуры ячеистого бетона: а – от пористости; б – от среднего диаметра пор; в – от коэффициента формы пор; г – от площади пор

Из данных, представленных на рисунке 2, а, видно, фрактальная размерность пор увеличивается пропорционально увеличению пористости. Присутствует значительная связь между пористостью и фрактальной размерностью пор. Коэффициент регрессии  $R^2 = 0,7468$  указывает на сильную зависимость между фрактальной размерностью пор и уровнем пористости: чем выше фрактальная размерность, тем выше пористость. Это означает, что пористость, то есть объем пор в материале, увеличивается параллельно увеличению сложности структуры пор. Фрактальная размерность в данном случае является мерой этой сложности изображений структуры пор. Изменения во фрактальной размерности указывают на увеличение пространственной заполненности структуры материала порами при росте пористости. Это означает, что с увеличением пористости структура материала становится более сложной и заполненной порами, что подтверждается анализом фрактальной размерности пористой структуры.

Коэффициент регрессии  $R^2$  между фрактальной размерностью и средним размером составляет 0,7749 (рис. 2, б), что указывает на наличие определенной корреляции между фрактальной

размерностью и средним размером пор в материале.

Согласно теории фракталов, чем больше фрактальная размерность пор, тем меньше средний размер пор и тем сложнее пространственное распределение пор в материале. Это означает, что при увеличении фрактальной размерности пор увеличивается количество мелких пор. При одинаковой пористости ячеистого бетона, увеличение среднего диаметра пор и среднего размера пор приводит к уменьшению количества отверстий и увеличению толщины стенок пор соответствующей поровой структуры. Это происходит из-за того, что при больших размерах пор среднее количество отверстий уменьшается, и поры имеют более толстые стенки.

Такие результаты показывают, что фрактальная размерность пор может быть полезным инструментом для описания распределения пор по размерам и структуры порового пространства материала. Кроме того, она предоставляет возможность для дальнейшего изучения взаимосвязи между фрактальной размерностью и капиллярным давлением воды, что имеет значение для понимания физико-механических свойств материала.

Фактор формы является ключевым показателем, определяющим форму поровой структуры и близость ее к круглой форме. Коэффициент формы отражает, насколько форма поровой структуры отличается от сферической. Например, для сферы коэффициент формы равен 1, и чем больше значение этого коэффициента для поровой структуры, тем больше ее отклонение от сферической формы. Этот показатель позволяет оценить, насколько форма поровых структур соответствует сферическим формам и определить их отклонение от данной геометрии. Из рисунка 2, в видно, что коэффициент регрессии  $R^2$  между фрактальной размерностью и коэффициентом формы достигает 0,6419. По мере увеличения фрактальной размерности пористой структуры увеличивается и коэффициент формы пористой структуры. Это указывает на то, что форма поровой структуры больше отклоняется от круглой, что аналогично зависимости фрактальной размерности пор от пористости, приведенной на рисунке 2, а. Поэтому фрактальная размерность пор может быть использована для характеристики степени отклонения структуры пор от круглой формы.

Из рисунка 2, г видно, что коэффициент регрессии  $R^2$  между фрактальной размерностью пор и площадью поверхности пор составляет 0,7176. Это значение указывает на наличие хорошей корреляции между фрактальной размерностью пор и площадью поверхности пор. При одинаковой пористости материала, меньшая площадь поверхности пор свидетельствует о наличии меньшего количества пор малого диаметра и о более гладкой поверхности пор. Это связано с тем, что при одинаковой пористости, если поры имеют меньшую площадь поверхности, они склонны иметь больший диаметр, что делает их менее шероховатыми.

Оценка фрактальной размерности пор позволяет не только оценить шероховатость поверхности пор, но и оценить распределение пор по размерам на поверхности пор. Фрактальная размерность служит индикатором структурной сложности пористой поверхности, отражая ее геометрические характеристики и связь между размерами пор и их геометрическими параметрами.

Путем анализа фрактальных параметров пор, таких как размеры, формы и распределение пор, можно определить оптимальную конфигурацию пор, способствующую улучшению характеристик материала. Например, более регулярная или определенная геометрическая организация пор может способствовать улучшению теплоизоляционных свойств, прочности и звукоизоляции газобетона. Такое улучшение свойств может быть достигнуто за счет более точного контроля

над структурой пор, обеспечивая оптимальные условия для улучшения функциональных характеристик материала.

**Вывод.** Фрактальная размерность пористой структуры ячеистых бетонов коррелирует с их пористостью и размерами пор. Увеличение фрактальной размерности связано с увеличением количества мелких пор и усложнением пространственного распределения пор. При одинаковой пористости, увеличение размеров пор приводит к уменьшению количества пор и толщине стенок пор.

Корреляция фрактальной размерности пор с площадью и размером пор позволяет оценить шероховатость и распределение пор по размерам. Большая фрактальная размерность связана с меньшей площадью поверхности пор, что указывает на меньшую шероховатость пор и их более крупные размеры.

Увеличение фрактальной размерности пор говорит о более сложной структуре порового пространства. Фрактальная размерность может описать распределение пор по размерам и структуру порового пространства, что открывает возможности для изучения связи с физико-механическими свойствами материала.

Оценка фрактальной размерности формы пор в ячеистом бетоне играет важную роль в контроле микроструктуры материала. Определение этой размерности позволяет лучше понять, как поры организованы на микроуровне, отражает степень их сходства на различных масштабах и точнее определяет качество пористой структуры. Это важно для разработки методов и стратегий улучшения пористой структуры, оптимизации производства и контроля размеров пор.

Анализ фрактальной размерности в микроструктуре ячеистого бетона может улучшить его технические свойства: увеличить теплоизоляцию, повысить прочность и улучшить звукоизоляцию материала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.
2. Сулейманова Л.А., Жерновский И.В., Шамшуров А.В. Специальное композиционное вяжущее для газобетонов неавтоклавного твердения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 39–45.
3. Давидюк А.А., Фискинд Е.С., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Преимущества в производстве и применении блоков из ячеистого бетона // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 41–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43

4. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А., Петрова Т.М. Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 67–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71
5. Львова Д.В., Кристин А.П. Особенности использования ячеистого бетона // Аллея науки. 2018. Т. 4, № 6(22). С. 256–259.
6. Сулейманова Л.А. Алгоритм получения энергоэффективного газобетона с улучшенными показателями качества // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 59–61.
7. Cai J., Zhang L., Ju Y., Pia G., Zhang Z. An introduction to fractal-based approaches in unconventional reservoirs – part I // Fractals. 2018. Vol. 26(2). 1802001. DOI: 10.1142/S0218348X18020012
8. Kim J., Choi S. A fractal-based approach for reconstructing pore structures of GGBFS-blended cement pastes // Construction Building Materials. 2020. Vol. 265. 120350. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120350
9. Chen Y., Xu F. Compressive strength of fractal-textured foamed concrete // Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society. 2019. Vol. 27. No. 1. 1940003. DOI: 10.1142/S0218348X19400036
10. Konkol J., Prokopski G. The use of fractal geometry for the assessment of the diversification of macro-pores in concrete // Image Analysis & Stereology. 2011. Vol. 30. No. 2. Pp. 89–100. DOI: 10.5566/ias.v30.p89-100
11. Fu J., Yu Y. Experimental study on pore characteristics and fractal dimension calculation of pore structure of aerated concrete block // Advances in Civil Engineering. 2019. No 2. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2019/8043248
12. Alfonso I., Beltran A., Abatal M. Fractal dimension determination of rock pores by multi-scale analysis of images obtained using OM, SEM and XCT // Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society. 2018. Vol. 26, No. 5 1850067. DOI: 10.1142/S0218348X18500676
13. Pang C.M. Shaohua W. Void characterization and effect on properties of foam concrete // Journal of Building Materials, 2017. Vol. 20. Pp. 93-98. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.01.017
14. Gabriele A., Losa D.R., Dejan R., Ivan Z., Stefano B. From fractal geometry to fractal analysis // Applied Mathematics. 2016. Vol. 7. No. 4. Pp. 346–354. DOI: 10.4236/am.2016.74032
15. Zhao L., Wang W., Li Z., Chen Y.F. Microstructure and pore fractal dimensions of recycled thermal insulation concrete // Materials Testing. 2015. Vol. 57. No. 4. Pp. 349–359. DOI: 10.3139/120.110713
16. Ebrahimi S., Tavakolii M.B., Setoudeh F. Iris recognition system based on fractal dimensions using improved box counting // Journal of Information Science and Engineering. 2019. Vol. 32. Pp. 275–290. DOI: 10.6688/JISE.201903\_35(2).0002
17. Peng R.D., Xie H.P., Ju Y. Computation method of fractal dimension for 2D digital image // Journal of China University of Mining & Technology. 2004. Vol. 33. Pp. 19–24.

#### Информация об авторах

**Сулейманова Людмила Александровна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Рябчевский Игорь Сергеевич**, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kcloud09@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Погорелова Инна Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Богачева Марина Александровна**, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: marisha\_shugaeva@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

Поступила 18.12.2023 г.

© Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., Погорелова И.А., Богачева М.А., 2024

**Suleymanova L.A., \*Ryabchevskiy I.S., Pogorelova I.A., Bogasheva M.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: kloud09@mail.ru*

## FRactal Dimension of the Porous Structure of Cellular Concrete

**Abstract.** *The study of the fractal dimension of pores in cellular concrete and aerated concrete blocks significantly influences the understanding of the porous structure of materials. One of the key methods for estimating this dimension is cell counting. The fractal dimension of pores indicates the degree of their dense distribution and is closely related to the physical properties of the material, such as heat and sound insulation. The results of the study showed that an increase in the fractal dimension of pores is associated with an increase in the number of smallest pores and the complication of their spatial arrangement. At the same time, the use of the cell counting method allows to estimate accurately this fractal dimension, based on the number of cells containing pores at different scales. One of the significant aspects is the correlation of the fractal dimension of pores with their area and size. This makes it possible to evaluate the roughness of pores and their distribution in the material, as well as to understand how an increase in pore size leads to a decrease in their number and thickening of the walls between them. The fractal dimension of pores makes it possible to characterize the structure of the pore space, which is important for understanding the microstructure of the material. Manipulating the microstructure of cellular concrete using fractal dimension analysis can improve its thermal insulation, strength and sound insulation, opening new possibilities for creating more efficient building materials.*

**Keywords:** *fractal dimension, porous structure, cellular concrete, cell counting method, regression coefficient.*

### REFERENCES

1. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete [Upravlenie processom formirovaniya poristoj struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)
2. Suleymanova L.A., Zhernovskiy I.V., Shamshurov A.V. Special composite binder for non-autoclaved aerated concrete [Special'noe kompozicionnoe vyazhushchee dlya gazobetonov neavtoklavogo tverdeniya]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2012. No. 1. Pp. 39–45. (rus)
3. Davidiyuk A.A., Fiskind E.S., Gusar O.A., Balakireva V.V. Advantages in the production and use of cellular concrete blocks [Preimushchestva v proizvodstve i primenenii blokov iz yacheistogo betona]. Construction materials. 2018. No. 12. P. 41–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43 (rus)
4. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A., Petrova T.M. Features of the porous structure of cellular concrete and its influence on thermal conductivity [Osobennosti poristoj struktury yacheistyh betonov i ee vliyanie na teploprovodnost']. Construction materials. 2021. No. 8. Pp. 67–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71 (rus)
5. Lvova D.V., Kristin A.P. Features of the use of cellular concrete [Osobennosti ispol'zovaniya yacheistogo betona]. Alley of Science. 2018. T. 4, No. 6(22). P. 256–259. (rus)
6. Suleymanova L.A. Algorithm for producing energy-efficient aerated concrete with improved quality indicators [Algoritm polucheniya energoefektivnogo gazobetona s uluchshennymi pokazatelyami kachestva]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2011. No. 4. Pp. 59–61. (rus)
7. Cai J., Zhang L., Ju Y., Pia G., Zhang Z. An introduction to fractal-based approaches in unconventional reservoirs – part I. Fractals. 2018. Vol. 26(2). 1802001. DOI: 10.1142/S0218348X18020012
8. Kim J., Choi S. A fractal-based approach for reconstructing pore structures of GGBFS-blended cement pastes. Construction Building Materials. 2020. Vol. 265. 120350. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120350
9. Cheny Y., Xu F. Compressive strength of fractal-textured foamed concrete. Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society. 2019. Vol. 27. No. 1. P. 1940003. DOI: 10.1142/S0218348X19400036
10. Konkol J., Prokopski G. The use of fractal geometry for the assessment of the diversification of macro-pores in concrete. Image Analysis & Stereology. 2011. Vol. 30. No. 2. Pp. 89–100. DOI: 10.5566/ias.v30.p89-100
11. Fu J., Yu Y. Experimental study on pore characteristics and fractal dimension calculation of pore structure of aerated concrete block. Advances in Civil Engineering. 2019. No 2. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2019/8043248
12. Alfonso I., Beltran A., Abatal M. Fractal dimension determination of rock pores by multi-scale analysis of images obtained using OM, SEM and XCT. Fractals-Complex Geometry Patterns and

Scaling in Nature and Society. 2018. Vol. 26. No. 5 Pp. 1850067. DOI: 10.1142/S0218348X18500676

13. Pang C.M. Shaohua W. Void characterization and effect on properties of foam concrete. Journal of Building Materials, 2017. Vol. 20. Pp. 93-98. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.01.017

14. Gabriele A., Losa D.R., Dejan R., Ivan Z., Stefano B. From fractal geometry to fractal analysis. Applied Mathematics. 2016. Vol. 7. No. 4. Pp. 346–354. DOI: 10.4236/am.2016.74032

15. Zhao L., Wang W., Li Z., Chen Y.F. Microstructure and pore fractal dimensions of recycled

thermal insulation concrete. Materials Testing. 2015. Vol. 57. No. 4. Pp. 349–359. DOI: 10.3139/120.110713

16. Ebrahimi S., Tavakolii M.B., Setoudeh F. Iris recognition system based on fractal dimensions using improved box counting. Journal of Information Science and Engineering. 2019. Vol. 32. Pp. 275–290. DOI: 10.6688/JISE.201903\_35(2).0002

17. Peng R.D., Xie H.P., Ju Y. Computation method of fractal dimension for 2D digital image. Journal of China University of Mining & Technology. 2004. Vol. 33. Pp. 19–24.

#### *Information about the authors*

**Suleymanova, Lyudmila A.** DSc, Professor, Head of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ryabchevskiy, Igor S.** Senior Lecturer of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: kloud09@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Pogorelova, Inna A.** PhD, Assistant professor. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bogacheva, Marina A.** Assistant of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: marisha\_shugaeva@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 18.12.2023*

#### **Для цитирования:**

Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., Погорелова И.А., Богачева М.А. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №2. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-8-15

#### **For citation:**

Suleymanova L.A., Ryabchevskiy I.S., Pogorelova I.A., Bogacheva M.A. Fractal dimension of the porous structure of cellular concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 2. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-8-15