

ЩЕРЕДИН А. С., БАЛЫКОВ А. С.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
И АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ  
ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

**Аннотация.** Изложены основные методы фрактального анализа строительных материалов. Предложено использование метода островов среза для оценки поровой структуры мелкозернистых бетонов. Показано, что использование программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов» позволяет автоматизировать количественное определение фрактальной размерности поровой структуры, существенно снижая временные затраты на его получение.

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, поровая структура, мелкозернистые бетоны, метод островов среза, программный комплекс.

SCHEREDIN A. S., BALYKOV A. S.

**QUANTITATIVE ASSESSMENT OF FRACTAL DIMENSION OF PORE STRUCTURE  
OF FINE-GRAINED CONCRETES WITH SOFTWARE "IDENTIFICATION AND  
ANALYSIS OF POROSITY OF CONSTRUCTION MATERIALS"**

**Abstract.** Basic methods of fractal analysis of construction materials are considered. It is suggested to use the method of isles cut to assess the pore structure of fine-grained concretes. It is demonstrated that the use of software "Identification and analysis of porosity of construction materials" automates quantitative measuring of the fractal dimension of the pore structure and significantly reduces the time required to receive it.

**Keywords:** fractal dimension, pore structure, fine-grained concretes, method of isles cut, software.

Пористые материалы представляют собой своеобразный класс неупорядоченных сред, особенности которых затрудняют применение традиционных методов описания их структуры. Для исследования таких материалов оказалось эффективным привлечение аппарата фрактальной геометрии, позволяющего адекватно описать параметры строения и связать их с физико-механическими характеристиками [1–4].

До недавнего времени структуру пористых материалов связывали, в основном, с плотностью и размером пор. Однако устойчивых закономерностей связи структуры со свойствами установить не удалось [5]. Согласно концепции фракталов, в качестве параметра

структуры пористого материала следует принять фрактальную размерность, определяемую распределением пор по размерам.

В последнее время идеи фрактальной геометрии находят все большее применение при количественной оценке параметров реальных объектов [2–10]. К настоящему времени известно множество экспериментальных методов определения фрактальной размерности, в том числе метод покрытия квадратами, метод Херста (метод нормированного размаха), метод вертикальных сечений, метод островов среза, Фурье-анализ профилей и т. д. [3; 4; 6]. Методы фрактального исчисления находят свое применение для анализа кривых деформирования мелкозернистых бетонов [11; 12], позволяя количественно определять положение параметрических точек, что является важной информативной характеристикой при изучении процессов разрушения композиционных материалов различной природы.

Классическим для определения фрактальной размерности является пример, где в качестве фрактальной системы рассматривают непрерывную линию, являющуюся берегом реки, озера или моря [6]. Данный метод заключается в измерении длины линии различными по размерам звеньев ломаными. По мере уменьшения звеньев длина ломаной, которая аппроксимирует рассматриваемую линию, будет возрастать. Измеренная длина описывается приближенной формулой

$$L(\delta) = a \cdot \delta^{1-D}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – размер звена ломаной линии;  $a$  – постоянный коэффициент;  $D$  – фрактальная размерность.

Достаточно широкое развитие при определении фрактальной размерности получил метод покрытия квадратами. В общем случае при использовании данного метода требуется покрыть фрактальное множество  $d$ -мерными блоками с длиной ребра  $\delta$ , произвести подсчет их числа  $N(\delta)$ , построить график в двойных логарифмических координатах  $\log(N(\delta)) - \log(\delta)$  и определить по углу наклона величину фрактальной размерности:

$$D = -\Delta \log(N(\delta)) / \Delta \log(\delta). \quad (2)$$

Общая идея метода островов среза основывается на изучении соотношения площади и периметра островов, образующихся при пересечении исследуемой поверхности горизонтальными плоскостями. Известно [6], что для каждого семейства плоских евклидовых фигур одинаковой формы отношение периметра к квадратному корню из охватываемой площади  $\rho = P/\sqrt{A}$  не зависит от размера фигуры. Так, для окружностей, квадратов и равносторонних треугольников указанное отношение соответственно равно  $2 \cdot \sqrt{\pi}$ , 4 и

$6/\sqrt[4]{3}$ . Для фрактальных фигур данное выражение имеет вид

$$\rho_D = \frac{P(\delta)^{1/D'}}{A(\delta)^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $D'$  – фрактальная размерность очертаний островов среза;  $\delta$  – длина используемого для подсчета площади и периметра эталона.

При использовании метода островов среза соотношение периметра и площади описывается уравнением [6]

$$P(\delta) = C \cdot \delta^{(1-D')} \cdot A(\delta)^{D'/2}, \quad (4)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Это соотношение выполняется для любого эталона длины  $\delta$ , достаточного, чтобы удовлетворительно обмерять самый малый из островов.

Необходимо также отметить, что свойство точного самоподобия характерно лишь для регулярных фракталов. В случае исследования случайных фракталов, что характерно для реальных структур, увеличенная часть фрактала не точно идентична исходному фрагменту, однако их статистические характеристики совпадают.

Опыт применения методов фрактального исчисления показал [3; 4; 6], что разработка алгоритмов и путей их программной реализации очень важна для получения корректных результатов при минимальных временных затратах. Установлено [3; 4], что для оценки поровой структуры цементных композитов наиболее приемлемым является метод островов среза. Предлагается для реализации данного метода использовать программный комплекс (ПК) «Идентификация и анализ пористости строительных материалов [13]», позволяющий определять суммарную площадь пор исследуемого композита, а также распределение пор по размерам. При использовании данной методики с помощью ПК подсчитывается число пикселей, занятых каждой порой. Размер ячейки (пикселя), отождествляемый с размером клетки при использовании метода покрытия квадратами, определяется по формуле

$$\delta(K_{dpi}) = 2.54 \cdot 10^4 / K_{dpi}, \quad (5)$$

где  $K_{dpi}$  – величина разрешения при сканировании;

Величину фрактальной размерности определяют по углу наклона графика изменения площадей пор от их периметров (рис. 1), построенного в двойных логарифмических координатах  $\log(A(\delta)) - \log(P(\delta))$ . Для определения периметра пор была разработана дополнительная надстройка к указанному выше ПК.

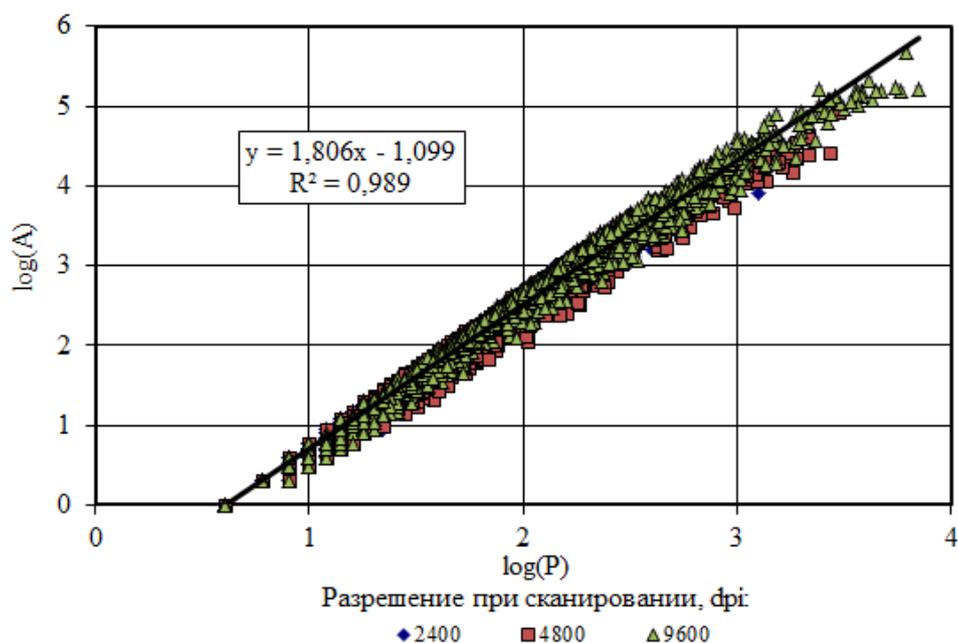


Рис. 1. Связь между периметром и площадью пор состава дисперсно-наполненного мелкозернистого бетона.

Из анализа полученных данных видно (рис. 1), что связь между периметром и площадью пор, полученных при сканировании исследуемых поверхностей с различным разрешением (2400, 4800 и 9600 dpi) описывается линейной зависимостью с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.989$ . Полученные результаты подтверждают перспективность использования предлагаемого подхода для определения фрактальной размерности поровой структуры, в том числе дисперсно-наполненных мелкозернистых бетонов [14].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявский С. В. Применение методов фрактального анализа для исследования структуры пористых металлических материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2001. – 223 с.
2. Фролкин О. А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Саранск, 2000. – 223 с.
3. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
4. Низина Т. А. Экспериментально-теоретические основы прогнозирования и повышения долговечности защитно-декоративных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. – Саранск, 2007. – 408 с.
5. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.

6. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

7. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Определение фрактальной размерности как структурного параметра при анализе полимерных композитов // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения: Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – С. 73–76.

8. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Фрактальный анализ структуры наполненных эпоксидных композитов // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – 2006. – Вып. 10. – С. 123–128.

9. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А. Фрактальный анализ структуры наполненных полимерных композитов // Известия ВУЗов. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 43–48.

10. Селяев В. П., Баженов Ю. М., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Фрактальные методы анализа структуры композиционных строительных материалов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 158–175.

11. Низина Т. А., Балбалин А. В., Балыков А. С. Фрактальный анализ кривых деформирования композиционных строительных материалов при сжатии // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». 2015. – Выпуск 13. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fraktalnyj-analiz-krivyx-deformirovaniya-kompozicionnyx-stroitelnyx-materialov-pri-szhatii>.

12. Селяев В. П., Низина Т. А., Балыков А. С., Низин Д. Р., Балбалин А. В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 129–146.

13. В. П. Селяев, Т. А. Низина, О. А. Фролкин, В. В. Цыганов, Ю. А. Ланкина Идентификация и анализ пористости строительных материалов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610364 от 24.01.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613072 от 24.11.2005 г.

14. Низина Т. А., Щередин А. С., Балыков А. С. Фрактальный анализ поровой структуры дисперсно-наполненных мелкозернистых бетонов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1(16). – Режим доступа: [trts.esrae.ru/28-153](http://trts.esrae.ru/28-153).