



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК [691.327.33:004.94]:656.21

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>

СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ ДЛЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЗДАНИЙ

Адилходжаев А.И.*, Шаумаров С.С.

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика
Узбекистан

* E-mail: anvar_1950@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты анализа механизма формирования структуры ячеистых бетонов во взаимосвязи с их физико-механическими параметрами. Для установления данной взаимосвязи был применён метод фрактальной размерности структуры ячеистых бетонов на основе структурно-имитационного моделирования. Разработан подход к оценке свойств ячеистого бетона на основании анализа его изображения. Практическая значимость исследования состоит в разработке расчётного программного комплекса по определению фрактальной размерности ячеистого бетона.

Ключевые слова: железнодорожные здания, структурно-имитационное моделирование, фрактальная размерность, ячеистый бетон, пористость, физико-механические свойства

© Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С., 2020

Поступила: 31 июля 2020; Принята к публикации: 17 декабря 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

Для цитирования:

Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С. Структурно-имитационное моделирование макроструктуры лёгких бетонов для наружных ограждающих конструкций железнодорожных зданий // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.43-52. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>

STRUCTURAL-SIMULATION MODELING OF MACHINE STRUCTURE OF LIGHT CONCRETE FOR EXTERNAL PROTECTING CONSTRUCTIONS OF RAILWAY BUILDINGS

Adilhodzaev A.I.*, Shaumarov S.S.

Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

* E-mail: anvar_1950@mail.ru

Abstract. The article analyzes the macrostructure of cellular concrete, which characterizes the connection with their strength and heat engineering properties. In this connection, it is necessary to determine the fractal dimension of the structure of cellular concrete to clarify the connection with its porous structure based on structural-simulation modeling. An approach has been developed to assess the properties of cellular concrete based on the analysis of its image. Practical significance consists in the development of a design software package for determining the fractal dimension of cellular concrete.

Keywords: railway buildings, structural-simulation modeling, fractal dimension, cellular concrete, porosity, physical and mechanical properties

© Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S., 2020

Received: July 31, 2020; Accepted: December 17, 2020; Published: December 24, 2020

For citation:

Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S. Structural and simulation modeling of machine structure of light concrete for external protecting constructions of railway buildings // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020. 2020, vol.10, no.1, pp.43-52. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

В настоящее время актуальной проблемой при возведении энергоэффективных зданий на железнодорожном транспорте является разработка экономичных по составам материалов, которые применяются для наружных ограждающих конструкций с требуемыми прочностными и теплозащитными свойствами. Решение данных задач осуществляется по следующим направлениям:

- совершенствование методов теплотехнического расчёта ограждающих конструкций;
- развитие новых технологий получения материалов со средней плотностью ниже 500 кг/м³;
- разработка современных автоматизированных методов математического моделирования структуры ячеистых бетонов на макроуровне;
- установление взаимосвязи между средней плотностью ячеистого бетона и его структурными особенностями.

Результаты проведённых в Ташкентском государственном транспортном университете исследований показали [1–3], что механизм формирования пористой структуры ячеистых бетонов с требуемым комплексом физико-механических и теплотехнических параметров описывается постулатами структурно-имитационного моделирования.

В данном случае использование концепции фракталов позволяет детально проследить эволюцию получения ячеистого бетона с заданным комплексом свойств. Это обусловлено тем, что теория фракталов позволяет трактовать понятие «структура» на основе количественной оценки структур, определяющих конечные свойства строительных материалов. Особую важность такая количественная оценка имеет как для учёта рецептурных и технологических факторов, так и особенностей сложно организуемых структур, присутствующих в ячеистом бетоне [4–6].

До настоящего времени исследование структуры пористых материалов связывали с плотностью и размерами пор. Такой подход не позволяет в полной мере установить чёткую взаимосвязь между структурой и свойствами ячеистых бетонов. Исходя из концепции разработки эффективных теплоизоляционных материалов, в качестве метода оценки параметров структуры пористого материала целесообразно использовать теоретические предпосылки фрактальной геометрии, которая позволяет производить анализ формирующейся структуры материала с ранжированием пор по размеру.

2. Краткий обзор исследований в области создания материалов с заранее заданными свойствами на основе использования положений теории фрактальной размерности

На сегодняшний день выполнен комплекс научных исследований [7–15], направленных на создание материалов с заранее заданными свойствами, с использованием в качестве научного инструмента теории фрактальной размерности. Основным направлением работ

является использование различных добавок для оптимизации поровой структуры ячеистых бетонов и совершенствования технологии их производства. Так, например, С.Ф. Кореньковой, И.В. Якушиным, В.Г. Заминой [16] проведены исследования по установлению связи между фрактальной структурой шламов и их реологическими свойствами. Данный метод позволяет авторам смоделировать поверхность частиц выбранного шлама на основе заданного гранулометрического состава и получить их фрактальное изображение.

В работах А.Н. Бобрышева, В.Т. Ерофеева и Д.Е. Жарина [17] рассматриваются вопросы оценки показателей фрактальности модельных систем и структуры разнообразных строительных материалов. Приводится трактовка физической сущности показателей фрактальной размерности систем и образования фрактально-кластерных структур композитов в процессах структурообразования, фазовых переходов, разделения фаз и так далее.

В.Д. Глуховским, П.В. Кривенко и Старчуком В.Н. [18] были выполнены исследования, направленные на управление процессом получения бетонов с заранее заданными свойствами при помощи модифицирующих добавок, регулирующих такие показатели среды, как рН, ионная сила, образовательная способность компонентов и др.

Как показывает анализ представленных выше работ, для успешного использования рассмотренных методов управления структурообразованием лёгких бетонов, с одной стороны, необходим единый подход к исследованию и проектированию материалов различного химического состава как системы, имеющей несколько уровней структурной организации. С другой стороны, оптимизация поровой структуры ячеистых бетонов в результате введения различных добавок и совершенствования технологических решений его производства, является весьма трудоёмким процессом. Реализация этого процесса путём проведения множества экспериментов связана со значительными затратами. Более того, даже эксперимент, основанный на разработанных технологических приёмах, не гарантирует получения требуемых значений основных характеристик ячеистого бетона [19].

Наиболее целесообразным, на наш взгляд, является применение подхода, основанного на математическом моделировании структуры ячеистого бетона с заданными свойствами. При построении математической модели предлагается использовать постулаты теории фрактальной размерности.

3. Постановка задачи

В соответствии с методологией формирования фрактальных объектов, были выполнены численные расчёты по определению фрактальной размерности пор с целью установления связи последней с пористой структурой бетона. Для этого была построена физическая модель ячеистого бетона (рис. 1) с гексагональной упаковкой.

Данная физическая модель предполагает формиро-

вание пространственного каркаса, заполненного порами определенного размера [1, 19]. При этом плотное формирование пор достигается в результате самопроизвольной перестройки решётки. Капиллярные поры образуют гексагональную, кубическую или ромбическую решётку межпорового материала.

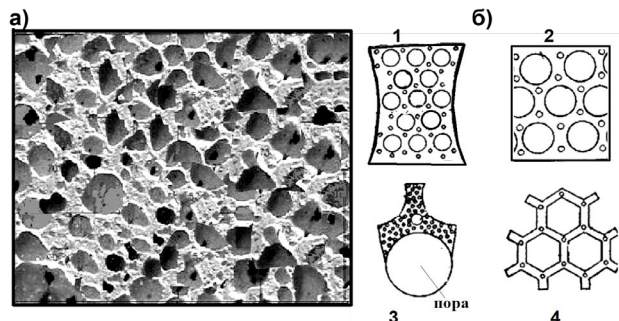


Рис. 1. Физическая модель пористой структуры ячеистого бетона: а) микроснимок ячеистого бетона гексагональной упаковки с бинарной решёткой первого порядка; б) схематический рисунок гексагональной упаковки с бинарной решёткой второго порядка (1,2), 3 – пространственная решётка со сферическими порами, 4 – трансформация пор в многогранные

Fig. 1. Physical model of the porous structure of cellular concrete: a) micrograph of cellular concrete of hexagonal packing with a first-order binary lattice; b) a schematic drawing of a hexagonal packing with a binary lattice of the second order (1,2), 3 – a spatial lattice with spherical pores, 4 – transformation of pores into polyhedral

4. Структурно-имитационное моделирование для определения фрактальной размерности ячеистого бетона

Математическая модель представленной в разделе 2 физической организации пористой структуры ячеистого бетона строилась на основании правил распределения плотности пор по их радиусам сечений для гексагональной (рис. 1) упаковки так, чтобы пористость решётки при толщине перегородок 20-60 мкм изменялась в диапазоне от 10% до 90%.

Далее, для определения фрактальной размерности и дальнейшего установления связи фрактальной размерности с формирующейся пористостью ячеистого бетона был разработан метод, основанный на анализе изображений образца ячеистого бетона, полученного с помощью оптического микроскопа «Neophot-21» (рис.2).

В данном разделе представлен расчёт фрактальной размерности по данным сформированных массивов с координатами границ и центров квадратов сетки. Для наглядного представления объектов на изображении, подвергнутом машинному анализу, на рис. 3 приведена микрофотография фрагмента структуры ячеистого бетона.

Поскольку технология получения изображения не является однозначной, то изображению свойственны помехи (шумы), искажающие истинную картину

структуры образца. Поэтому в целях фильтрации подобного рода помех в программный комплекс обработки изображений включена процедура квантования – осреднение по градациям уровней яркости в заданных диапазонах. Данная процедура позволяет привести изображение к некоторым средним стандартным условиям.

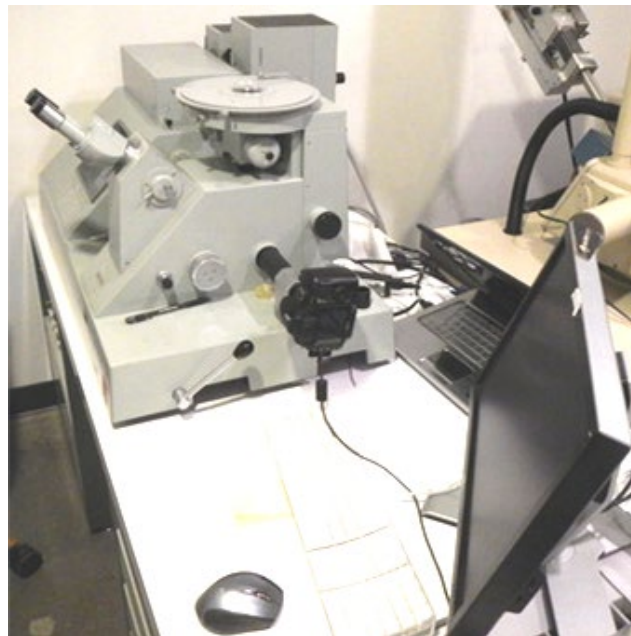


Рис. 2. Общий вид установки на основе микроскопа «Neophot-21» для оптического отображения пористости ячеистого бетона

Fig. 2. Laboratory setup based on the "Neophot-21" microscope for optical imaging of the porosity of cellular concrete

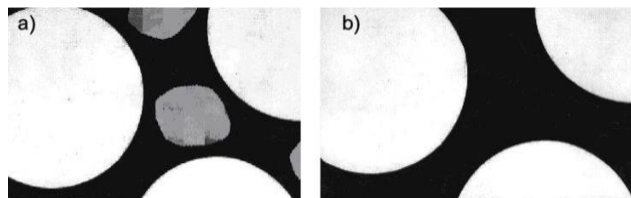


Рис. 3. Микрофотография ячеистого бетона: а) светлый цвет – воздушные пузырьки; черный цвет – матрица; серый цвет – наполнитель; б) то же изображение в бинарном виде (квантованное на два уровня)

Fig. 3. Micrograph of cellular concrete: a) light color – air bubbles; black color – matrix; gray – filler; b) the same image in binary form (quantized into two levels)

В сущности, количество уровней может быть произвольным, но обязательным является задание последнего уровня как бинарного. Это условие является необходимым, так как нас интересуют два объекта: материал и поры. На языке обработки изображений – это две градации, в нашем случае – черный и белый цвет.

На **рис. 4б** приведены результаты квантования изображения, представленного на **рис. 1** и **рис. 4а**.

Оказалось, что фильтрация, приводящая изображение к некоторым средним условиям съёмки, выполняет чрезвычайно важную функцию, связанную с характеристикой структуры образца в целом (**рис. 4б**). Видно, что на последних изображениях **рис. 4б** проявляется геометрия формирования структуры образца в целом, носящая анизотропный характер, определяемый ориентацией макроструктуры в преимущественном направлении. При этом, с увеличением уровня квантования, указанная особенность макроструктуры проявляется в большей степени. Сказанное поясняет **рис. 5**, где показано увеличенное изображение бинарного уровня (**рис. 4б, 8**) с преимущественным направлением

сформированной макроструктуры в целом (направление указано стрелкой). Для данного образца, полученного по определенной технологии, основное направление сформированной макроструктуры находится под углом 18° к горизонтальной линии.

Как будет показано ниже, предложенный подход оценки физико-механических параметров проектируемого материала на основании анализа изображений позволяет с учётом различных значений прочности как в «тонких», так и в «толстых» структурах, формирующихся вокруг газо-воздушных пузырьков прослоек, производить анализ формирующегося прочного композита с требуемыми параметрами. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

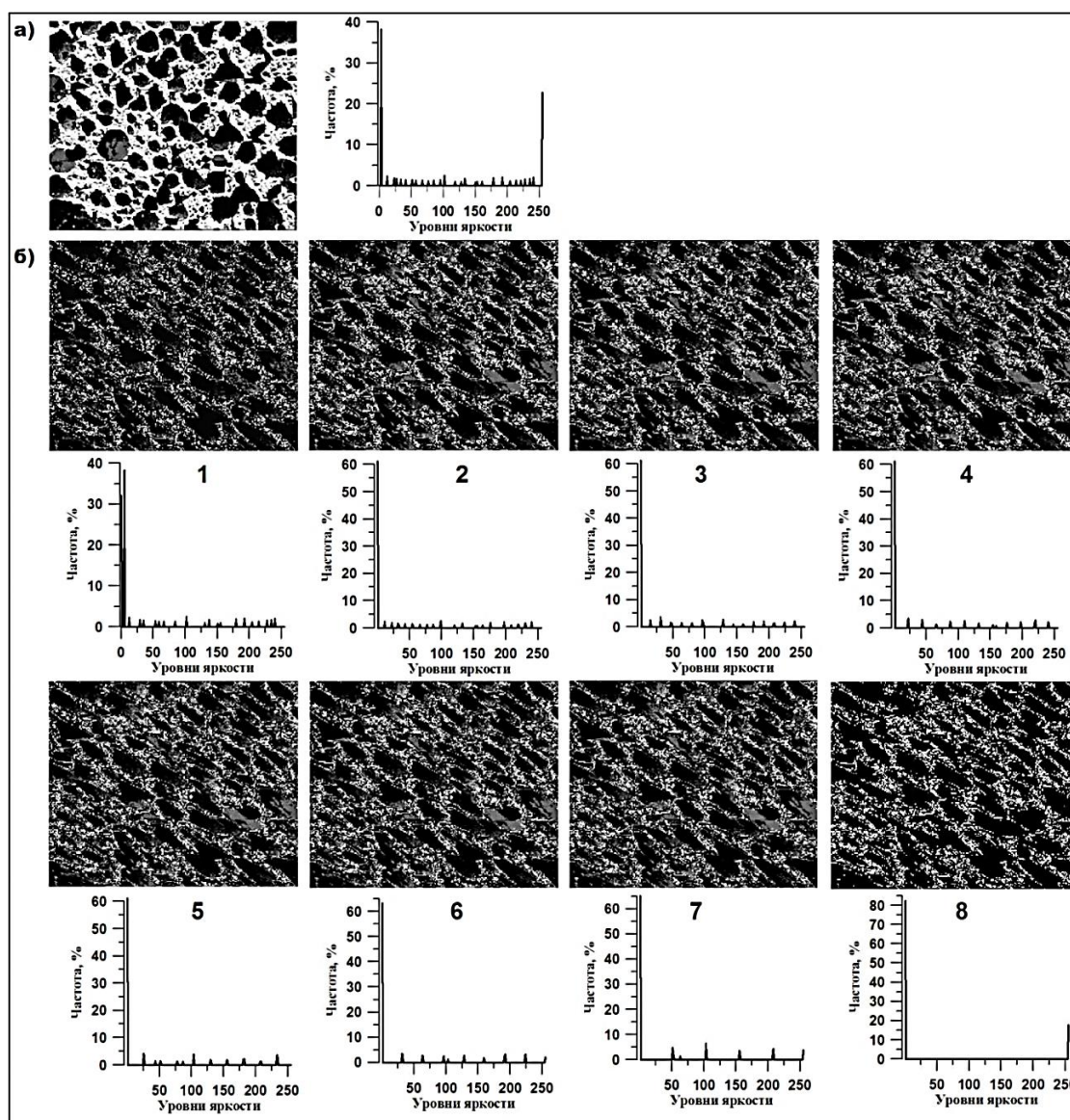


Рис. 4. Результаты обработки изображения структуры ячеистого бетона: а) исходное изображение ячеистого бетона и его гистограмма; б) квантованные изображения от первого до восьмого уровней и соответствующие гистограммы

Fig. 4. The results of processing the image of the cellular concrete structure: a) the original image of cellular concrete and its histogram; b) quantized images from 1st to 8th levels and corresponding histograms

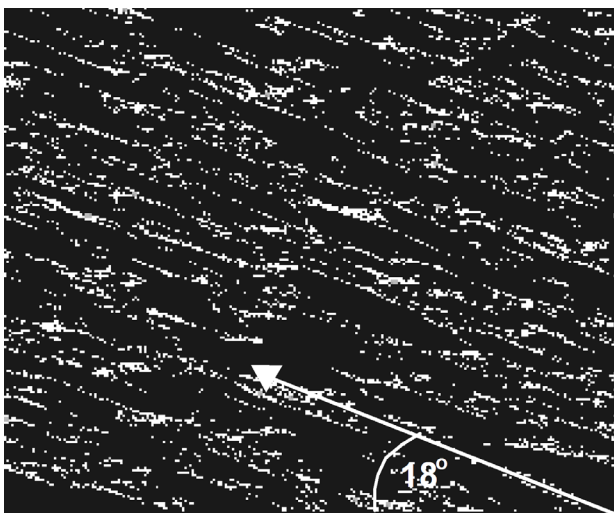


Рис. 5. Анизотропный характер сформированной макро­структуры ячеистого бетона

Fig. 5. Anisotropic nature of the formed cellular concrete macrostructure

Согласно [20, 21], прочностные показатели материала, при прочих равных факторах, определяются изотропностью его структуры относительно приложенной к нему нагрузки. В нашем случае, анизотропия макро­структуры уменьшает среднюю прочность ячеистого бетона при направленном действии волны нагрузки. Особенности напряженного состояния, возникающего в образце ячеистого бетона на наклонной площадке, представлены на рис. 6а.

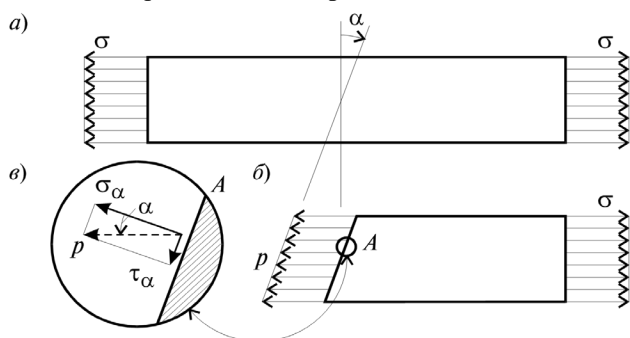


Рис. 6. Напряжения в наклонной площадке образца, находящейся под углом α к плоскости нормального сечения

Fig. 6. Stresses in an inclined sample area, located at an angle α to the plane of normal section

Обозначим через \vec{P} полное напряжение в окрестности некоторой точки выделенной области образца, возникающее в результате приложенной внешней нагрузки

$$\vec{P} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \vec{R}}{\Delta F} \right), \quad (1)$$

где $\Delta \vec{R}$ – внутренняя сила сцепления; ΔF – элемент площади.

Из условия равновесия образца, записанного для отсеченной части стержня (рис. 6в), выражение для напряжения \vec{P} запишется в виде

$$\vec{P} \cdot F_\alpha = \sigma F, \quad (2)$$

где σ – нормальное напряжение – проекция вектора \vec{P} на нормаль к площадке ΔF ; F – площадь поперечного сечения стержня; F_α – площадь наклонного сечения.

Величина F_α определяется по следующей формуле [20, 21]

$$F_\alpha = \frac{F}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

Отсюда

$$\vec{P} = \sigma \cos \alpha. \quad (4)$$

Раскладывая напряжение \vec{P} по нормали и касательной к наклонной площадке (рис. 6б), получим

$$\sigma_\alpha = p \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

$$\tau_\alpha = p \sin \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sin^2 \alpha. \quad (6)$$

Полученные выражения показывают, что для одной и той же точки тела величины напряжений, возникающих в сечениях, проходящих через эту точку, зависят от ориентации этой площадки [20, 21], то есть от угла α . В нашем случае $\alpha = 18^\circ$, тогда, как нетрудно видеть, прочность исследуемого образца в направлении сформированной макро­структуры уменьшится примерно в 0.1 раза.

При наличии линейной зависимости между напряжениями и деформациями (в соответствии с законом Гука), в качестве коэффициента пропорциональности выступает модуль упругости (модуль Юнга) $E = \sigma / \varepsilon$ (ε – относительное удлинение), который вместе с величиной модуля сдвига $G = \tau / \alpha$, коэффициентом Пуассона $\nu = |\varepsilon' / \varepsilon|$ (ε' – абсолютное значение относительного поперечного сжатия) и объёмным модулем сжатия $K = \sigma / \Delta$ (Δ – относительное объёмное сжатие) определяют, в общем, прочностные характеристики материала.

В случае изотропной структуры, соответствующие модули упругости одинаковы по всем направлениям. При этом они связаны друг с другом следующими соотношениями [20]

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (7)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (8)$$

В данном случае, модуль упругости E и модуль сдвига G являются независимыми величинами, и упругие свойства изотропного материала определяются двумя упругими постоянными параметрами.

В случае же анизотропного материала, параметры

E , G и ν принимают различные значения в разных направлениях и величины их могут изменяться в широких пределах.

Заметим, что прочностные свойства материалов, в зависимости от их степени анизотропности, достаточно хорошо изучены применительно к материалам волокнистой структуры. Известно, что у таких материалов с характерной анизотропностью, прочность и другие свойства различаются в зависимости от направления волокон [22].

Таким образом, граница «материал – поры», имеющая преимущественную ориентацию (анизотропия структуры), является слабым звеном в прочностных свойствах ячеистого бетона как строительного материала, независимо от его средних прочностных номиналов, удовлетворяющих действующим стандартам [23].

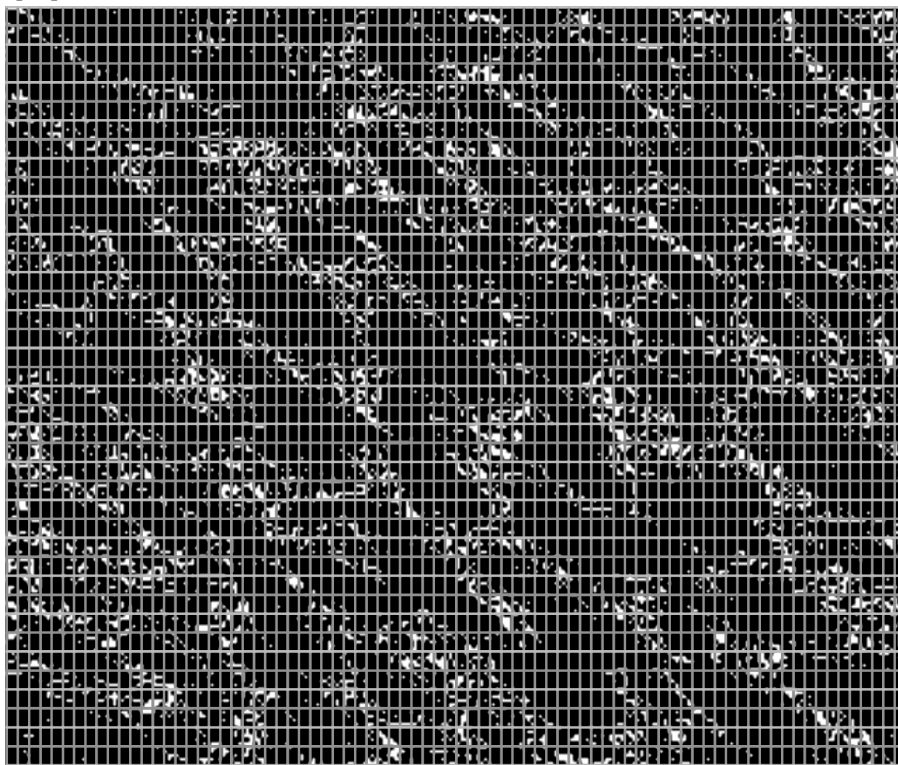


Рис. 7. Бинарное изображение макроструктуры ячеистого бетона, покрытое сеткой с квадратными ячейкам, внутри которых, согласно алгоритму «Box Counting», вычислялось количество попавших в i -ый квадрат граничных (материал – поры) точек

Fig. 7. Binary image of cellular concrete macrostructure, covered with a grid with square cells, inside which, according to the "Box Counting" algorithm, the number of boundary points (material - pores) that fell into the i -th square was calculated

Проведённый численный эксперимент в рамках программной реализации (рис. 8) включает в себя модули, обеспечивающие ввод и формирование матрицы изображения структуры ячеистого бетона в памяти компьютера. Здесь же выполняются процедуры обработки изображения, включающие квантование исходного изображения на заданное число уровней в целях распознавание границ «материал – поры» и вычисление фрактальной размерности структуры ячеистого бе-

тона данной пористости. Эта часть программного комплекса обеспечивает первичную реализацию численного эксперимента. Вторая часть программного комплекса выполняет численные эксперименты с модельными образцами ячеистого бетона различной пористости, а также исследования, связанные с формированием её связи с фрактальной размерностью и, в конечном счёте, с прочностными и теплотехническими свойствами.

$$D = \frac{\ln N}{\ln \left(\frac{1}{\delta} \right)}, \quad (9)$$

где δ – квадратная ячейка сетки размером $\delta \times \delta$, покрывающей бинарное изображение (рис. 7); N – число квадратных ячеек, в которые попали точки (с координатами $x_i, y_j, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, k$) изображения, принадлежащие границе «материал – поры». Значение N определялось с использованием алгоритма, представленного на рис. 8 [19, 24].

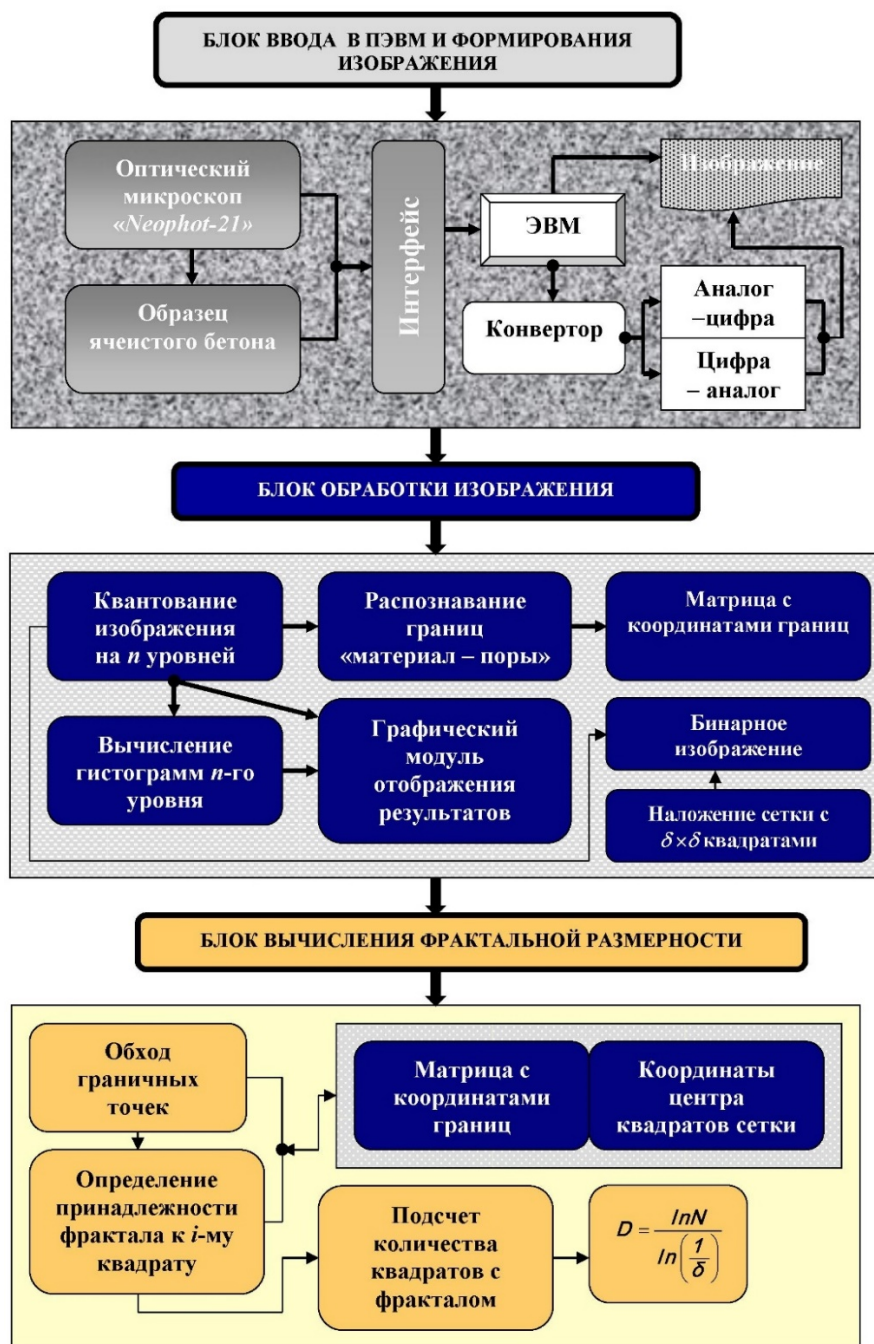


Рис. 8. Последовательность действий по вычислению фрактальной размерности структуры ячеистого бетона по его изображению

Fig. 8. The sequence of calculating the fractal dimension of the structure of aerated concrete from its image

5. Заключение

На основании предложенной методики имитационного моделирования произведена количественная оценка фрактальной размерности, описывающая механические, теплотехнические свойства пористых материалов, коррелирующая с такими важнейшими параметрами, как объёмная масса, прочность, пористость, теплопроводность. В результате получены отклики системы «матрица – компоненты – поры» на вариации

геометрии структуры и выполнен их анализ. На основе рационального сочетания вероятностного и детерминированного описания исследуемых структур ячеистого бетона получена связь структуры со свойствами композиционного материала.

Установлено что, анизотропия макроструктуры ячеистых бетонов уменьшает среднюю прочность ячеистого бетона в зависимости от угла наклона вектора преимущественной организации структуры к горизонтальной оси.

Список литературы

1. Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С., Мухаммадиев Н.Р. Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 2. С. 220-229.
2. Shaumarov S.S., Adilhodzhaev A.I. On Some Aspects of The Development of Methodological Foundations of Use in the Exterior Walling of Energy-Efficient Building Materials With A Predetermined Set of Properties // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Т. 6. № 3. С. 33-37.
3. Ji X., Chan S.Y.N., Feng N. Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials // Cement and Concrete Research. 1997. Т. 27. № 11. С. 1691-1699. [https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00157-9](https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00157-9).
4. Рыбьев И.А. Закономерности в структурно-механических свойствах асфальтового бетона // Труды ВЗИСИ. 1957. № 1. С. 3-18.
5. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging // NDT & E International. 2016. Т. 77. С. 11-18. <https://www.doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.09.004>.
6. Peng J., Wu Z., Zhao G. Fractal analysis of fracture in concrete // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1997. Т. 27. № 2. С. 135-140. [https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442\(97\)00015-3](https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442(97)00015-3).
7. Konkol J. A Fractal Model of Cracking of Cement Matrix Composites // Buildings. 2020. Т. 10. № 3. С. 52. <https://www.doi.org/10.3390/buildings10030052>.
8. Wang S., Guo Z. Random heterogeneous microstructure construction of composites via fractal geometry // Applied Mathematics and Mechanics. 2019. Т. 40. № 10. С. 1413-1428. <https://www.doi.org/10.1007/s10483-019-2522-5>.
9. Baglivo C., Congedo P. M. Design method of high performance precast external walls for warm climate by multi-objective optimization analysis // Energy. 2015. Т. 90. С. 1645-1661. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.132>.
10. Gao Y., Feng P., Jiang J. Analytical and numerical modeling of elastic moduli for cement based composites with solid mass fractal model // Construction and Building Materials. 2018. Т. 172. С. 330-339. <https://www.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.267>.
11. Хархардин А.Н. Теория прочности и структуры твёрдых пористых тел // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 4. С. 42-53.
12. Yang X., Wang F. Random-fractal-method-based generation of meso-model for concrete aggregates // Powder Technology. 2015. Т. 284. С. 63-77. <https://www.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.045>.
13. Song W., Wang D., Yao J., Li Y., Sun H., Yang Y., Zhang L. Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability // Fuel. 2019. Т. 241. С. 522-532. <https://www.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.062>.
14. Ebrahimi S., Tavakoli M.B., Setoudeh F. Iris Recognition System Based on Fractal Dimensions Using Improved Box Counting // Journal of Information Science and Engineering. 2019. Т. 35. С. 275-290.
15. Prigarin S. M., Hahn K., Winkler G. Comparative analysis of two numerical methods to measure Hausdorff dimension of the fractional Brownian motion // Numerical Analysis and Applications. 2008. Т. 1. № 2. С. 163-178. <https://www.doi.org/10.1134/S1995423908020079>.
16. Коренькова С.Ф., Якушин И.В., Зимица В.Г. Фрактальное моделирование свойств шламовых отходов // Башкирский химический журнал. 2007. Т. 14. № 4. С. 114-119.
17. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Жарин Д.Е. Основы формирования структуры композиционных материалов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. 112 с.
18. Глуховский В.Д., Кривенко П.В., Старчук В. Н. и др. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях. Киев: Вища школа, 1981. 223 с.
19. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Begmatov N. I. Methodological approach to estimation of the structure of load bearing insulation materials of buildings and constructions of railway transport // Vestnik of the Railway Research Institute. 2019. Т. 78. № 3. С. 162-168. <https://www.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-162-168>.
20. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Оборонгиз, 1952. 557 с.
21. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.
22. Копьёв И.М. О. А.С. Разрушение металлов, армированных волокнами. М.: Наука, 1977. 240 с.
23. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона: ГОСТ 24452-80. М.: Стандартинформ, 2005. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24452-80>. 14 с.
24. Falconer K. J. The Geometry of Fractal Sets. New York, Melbourne: Cambridge University Press, 2010. 162 с. <https://www.doi.org/10.1017/CBO9780511623738>.

References

1. Adylkhodzhaev A.I., Shaumarov S.S., Mukhammadiyev N.R. *Analytical and experimental study of the structural organization of heat-insulating construction materials for railway buildings and structures* // Proceedings of Petersburg Transport University. 2019, vol. 16, no. 2, pp. 220–229. (In Russ.).
2. Shaumarov S.S. Adilhodzhaev A.I. *On Some Aspects of The Development of Methodological Foundations of Use in the Exterior Walling of Energy-Efficient Building Materials With A Predetermined Set of Properties* // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 33–37.
3. Ji X., Chan S.Y.N., Feng N. *Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials* // Cement and Concrete Research. 1997, vol. 27, no. 11, pp. 1691–1699. [https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00157-9](https://www.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00157-9).
4. Rybyev I.A. *Patterns in the structural-mechanical properties of asphalt concrete* // VZISI materials. 1957, no. 1, pp. 3–18. (In Russ.).
5. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. *Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging* // NDT & E International. 2016, vol. 77, pp. 11–18. <https://www.doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.09.004>.
6. Peng J., Wu Z., Zhao G. *Fractal analysis of fracture in concrete* // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1997, vol. 27, no. 2, pp. 135–140. [https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442\(97\)00015-3](https://www.doi.org/10.1016/S0167-8442(97)00015-3).
7. Konkol J. *A Fractal Model of Cracking of Cement Matrix Composites* // Buildings. 2020, vol. 10, no. 3, p. 52. <https://www.doi.org/10.3390/buildings10030052>.
8. Wang S., Guo Z. *Random heterogeneous microstructure construction of composites via fractal geometry* // Applied Mathematics and Mechanics. 2019, vol. 40, no. 10, pp. 1413–1428. <https://www.doi.org/10.1007/s10483-019-2522-5>.
9. Baglivo C., Congedo P. M. *Design method of high performance precast external walls for warm climate by multi-objective optimization analysis* // Energy. 2015, vol. 90, pp. 1645–1661. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.132>.
10. Gao Y., Feng P., Jiang J. *Analytical and numerical modeling of elastic moduli for cement based composites with solid mass fractal model* // Construction and Building Materials. 2018, vol. 172, pp. 330–339. <https://www.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.267>.
11. Harhardin A.N. *Theory of strength and structure of solid porous bodies* // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2003, no. 4, pp. 42–53. (In Russ.).
12. Yang X., Wang F. *Random-fractal-method-based generation of meso-model for concrete aggregates* // Powder Technology. 2015, vol. 284, pp. 63–77. <https://www.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.045>.
13. Song W., Wang D., Yao J., Li Y., Sun H., Yang Y., Zhang L. *Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability* // Fuel. 2019, vol. 241, pp. 522–532. <https://www.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.062>.
14. Ebrahimi S., Tavakoli M.B., Setoudeh F. *Iris Recognition System Based on Fractal Dimensions Using Improved Box Counting* // Journal of Information Science and Engineering. 2019, vol. 35, pp. 275–290.
15. Prigarin S. M., Hahn K., Winkler G. *Comparative analysis of two numerical methods to measure Hausdorff dimension of the fractional Brownian motion* // Numerical Analysis and Applications. 2008, vol. 1, no. 2, pp. 163–178. <https://www.doi.org/10.1134/S1995423908020079>.
16. Korenkova S.F., Yakushin I.V., Zimina V.G. *Fractal modelling of slime waste products properties* // Bashkir chemistry journal. 2007, vol. 14, no. 4, pp. 114–119. (In Russ.).
17. Bobrysheva A.N., Yerofeyeva V.T., Zharina D.Ye. *Fundamentals of the formation of the structure of composite materials*. Saransk: Izd. Mordovskogo Uiversiteta. 2012. 112 p.
18. Glukhovskiy V.D., Krivenko P.V., Starchuk V.N. et al. *Slag-alkaline concretes on fine-grained aggregates*. Kiyev: Vishcha shkola. 1981. 223 p.
19. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Begmatov N. I. *Methodological approach to estimation of the structure of load bearing insulation materials of buildings and constructions of railway transport* // Vestnik of the Railway Research Institute. 2019, vol. 78, no. 3, pp. 162–168. <https://www.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-162-168>. (In Russ.).
20. Fridman Ja.B. *Mechanical properties of metals*. Moscow: Oborongiz. 1952. 557 p. (In Russ.).
21. Belyaev N.M. *Strength of materials*. Moscow: Nauka. 1976. 608 p. (In Russ.).
22. Kop'jov I.M., Ovchinskij A.S. *Destruction of fiber-reinforced metals*. Moscow: Nauka. 1977. 240 p. (In Russ.).
23. State Standart. *Concretes. Methods of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination*, 2005, GOST 24452-80. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24452-80>.
24. Falconer K. J. *The Geometry of Fractal Sets*. New York, Melbourne: Cambridge University Press. 2010. 162 p. <https://www.doi.org/10.1017/CBO9780511623738>.