

Методологический подход к оценке структуры конструкционно-теплоизоляционных материалов зданий и сооружений железнодорожного транспорта

А. И. АДИЛХОДЖАЕВ¹, С. С. ШАУМАРОВ¹, Е. В. ЩИПАЧЕВА¹, Н. И. БЕГМАТОВ²

¹ Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ), Ташкент, 100067, Узбекистан

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Разработан новый метод исследования особенностей структуры конструкционно-теплоизоляционных материалов для наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений железнодорожного транспорта.

Выполнен численный эксперимент, в котором идеальная структура ячеистого бетона моделировалась с учетом условий, близких к реальным образцам. Полученные данные были проанализированы на основе построенных гистограмм для заданного процента пор во всем рассматриваемом диапазоне (от 10 до 90 %). Результаты модельных расчетов аппроксимированы кривыми Гаусса (нормальный закон распределения вероятностей) и Коши — Лоренца.

Таким образом, новый методологический подход к оценке структуры ячеистого бетона, основанный на использовании современных информационных технологий, достаточно точен в определении и по своей практической реализации гораздо проще классических методов исследований.

Ключевые слова: здания и сооружения железнодорожного транспорта; конструктивно-теплоизоляционный материал; ячеистый бетон; макроструктура; моделирование; оптимизация; фрактальная размерность

Введение. Повышение энергоэффективности и энергосбережения зданий и сооружений — приоритетное направление энергетической политики Узбекистана. В связи с этим изготовление в промышленном масштабе недорогих энергоэффективных и экологически чистых конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов является одной из актуальных проблем строительной науки [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Успешная реализация таких задач в области гражданского строительства настоятельно требует разработки нового методологического подхода к созданию строительных материалов для наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений железнодорожного транспорта с заданными комплексами свойств. Для разработки методики моделирования был выбран материал, имеющий развитую пористую структуру — ячеистый бетон, представленный различными видами пор: капиллярными, крупными, условно-замкнутыми, ге-

левыми. При реализации данной задачи введено предположение, что ячеистый бетон представляется как квазиоднородная среда с совокупностью множества упакованных частиц и целостными физическими характеристиками [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Определяющими элементами такой матрицы являются параметры макроструктуры ячеистых бетонов, характеризующие связь макроструктуры с их прочностными и теплотехническими свойствами [16, 17, 18, 19].

Впервые теоретическое обоснование связи между макроструктурой ячеистых бетонов и их прочностью было предложено Г. И. Логиновым и А. П. Филиным [20, 21]. Исследователи на основании математических моделей, характеризующих наполняемость единицы объема шарообразными телами, вывели достаточно строгие закономерности, описывающие идеальную структуру ячеистого бетона.

Из вышесказанного следует, что решение задачи оптимизации макроструктуры ячеистых бетонов с целью повышения их технических и эксплуатационных свойств теоретическим путем, с одной стороны, представляет чрезвычайно сложную задачу из-за ее многофункциональности, с другой стороны, решение задачи такого плана экспериментальным методом весьма длительно и трудоемко. Более того, эксперимент, основанный на каком-то технологическом приеме, не гарантирует позитивного результата при переработке даже большого объема конкретного материала, взятого в достаточно широком диапазоне. Поэтому для решения поставленной задачи наиболее целесообразно использовать подход, основанный на математическом моделировании, которое позволяет на базе разработанной физико-математической модели, подвергнутой алгоритмизации и реализованной в виде программного продукта, путем численных расчетов получить искомые оптимальные параметры материала.

Алгоритм построения изображения ячеистого бетона на заданной структуре и ее фрактальной размерности. Пусть $m \times n$ — заданная матрица (основание) образца

ячеистого бетона, где m — ширина, n — высота матрицы соответственно. Упакуем эту площадь порами сферической формы (окружность на плоскости), используя два типа упаковки — гексагональную и кубическую. Эти два типа упаковки выбраны, вообще говоря, из очевидных предпосылок, так как наибольшее значение пористости при сферической форме пор достигается в условиях геометрически правильной их укладки (упаковки), к которой относится кубическая и гексагональная.

Далее обозначим матрицу и составляющие бетона черным цветом, а поры — белым. Тогда описание структуры ячеистого бетона в терминах формирования его изображения выразится в виде пикселей (минимальный элемент растрового изображения) черного и белого цвета — бинарное изображение. Таким образом, минимальной единицей радиуса пор является пиксель, однозначно определенный метрической системой единиц в долях сантиметра. В результате, задав тип укладки путем построения системы многоугольников заданного типа, разместим поры (пиксели белого цвета) в вершинах этого многоугольника. Тогда алгоритм распознавания на изображении границы «материал — поры» сводится к простой процедуре определения уровня яркости: черный (000) — материал, белый (255) — поры. В этом и состоит главная цель примененного в работе метода квантования изображения на i -е количество уровней, из которых последний, бинарный уровень, по сути, автоматически определяет границу пористости в образце. Теперь остается только подсчитать процент, занимаемый белыми пикселями от общей площади изображения, и мы получаем степень пористости образца. На основании разработанного метода возможна и обратная постановка задачи: задавая процент пористости материала получить наиболее оптимальное расположение пор (тип упаковки), отвечающее требуемым параметрам прочности и теплопроводности ячеистого бетона. Имея конкретный вид изображения ячеистого бетона, полученного в результате моделирования, иначе — конкретный вид упаковки пор определенных размеров, отвечающей требуемым (заданным) параметрам, далее можно ставить технологическую задачу его получения. Здесь необходимо заметить следующее: описанный метод в данной статье ориентирован на плоское изображение, т. е. рассматривается объемная проекция образца на плоскость. Поскольку мы при построении оптической модели изображения ячеистого бетона оперируем с отображенными на плоскости окружностями с заданными радиусами, то искажения относительно его объемного изображения при подсчете пористости модельного «плоского» изображения по очевидным причинам имеют место. Однако применение метода к реальным образцам показали, что величина погрешностей не превышает 3 %.

Более того, на наш взгляд, нет принципиальных трудностей в применении предлагаемого метода к объемной реализации, например рассмотрению стереографических или голографических изображений.

Далее по формуле (1) подсчитываем D — параметр фрактальной размерности структуры ячеистого бетона при помощи модифицированного алгоритма Пеано методом *Box Counting* [22]. Согласно этому методу вычисления фрактальной размерности D определяется выражением

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

где δ — квадратная ячейка сетки размером $\delta \times \delta$, покрывающей бинарное изображение; N — число квадратных ячеек, в которые попали точки (с координатами $x_i, y_j, i = 1, m, j = 1$) изображения, располагающиеся на границе «материал — поры».

Далее строится в двойной логарифмической шкале зависимость D от количества квадратов, покрывающих фрактал. Как будет показано ниже, эта зависимость хорошо аппроксимируется прямой (линейная регрессия)

$$Y = kx + b. \quad (2)$$

По наклону k линии определяется фрактальная размерность

$$D = -k. \quad (3)$$

Точность данного метода тестировалась по кривой Коха [23], теоретическая фрактальная размерность которой $D = 1,262$. Для этой кривой в нашем тестовом варианте на основании описанного выше метода размерность составила $D = 1,250$. Таким образом, ошибка используемого алгоритма *Box Counting* не превышает 1 %.

Численные модельные экспериментальные исследования макроструктуры ячеистого бетона. Были выполнены численные эксперименты, направленные на выявление особенностей связи фрактальной структуры как функции от типа укладки ячеистого бетона с его пористостью, а следовательно, с прочностными и теплотехническими свойствами. Размеры пор при моделировании структуры ячеистого бетона в соответствии с [24] задавались в диапазоне радиусов пор от 0,2 до 2 мм с шагом 0,2 мм. Таким образом, рассматривался диапазон пористости в пределах от 10 до 90 %. Варьирование величины процента пористости осуществлялось путем изменения расстояния между порами фиксированного радиуса, представляющими узлы гексагональной и кубической решеток.

Таблица 1

Результаты расчета фрактальной размерности ячеистого бетона с различными радиусами пор с гексагональной упаковкой

Table 1

Calculation results of the fractal dimension of cellular concrete with different pore radii with hexagonal packaging

$S(R_n)$, %	R_n , мм	$\log \frac{1}{2R_n}$	$\log S(R_n)$	D
10	0,2	0,998	1,000	1,874
20	0,4	0,698	1,301	1,540
30	0,6	0,521	1,477	1,355
40	0,8	0,396	1,602	1,235
50	1,0	0,299	1,699	1,150
60	1,2	0,219	1,778	1,105
70	1,4	0,153	1,845	1,065
80	1,6	0,094	1,903	1,020
85	1,8	0,044	1,929	0,995
90	2,0	0,0060	1,954	0,965

Примечание: R_n — радиус пор; $S(R_n)$ — площадь, занятая порами

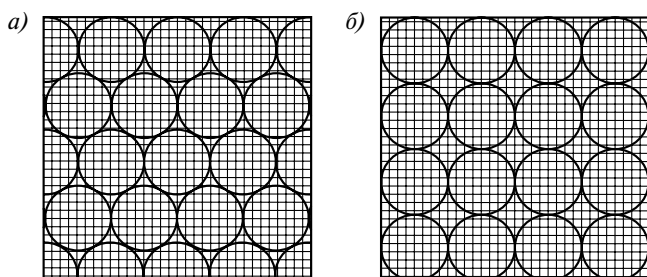


Рис. 1. Модельное представление ячеистого бетона с идеальной максимально плотной упаковкой гексагональной (а) и кубической (б) типов с квадратной сеткой для реализации алгоритма — подсчета фрактальной размерности

Fig. 1. Model representation of cellular concrete with an ideal maximum dense packing of hexagonal (a) and cubic (b) types with a square grid for the implementation of the algorithm for calculating the fractal dimension

Таблица 2

Связь пористости ячеистого бетона с различными типами укладки с его фрактальной размерностью

Table 2

Connection of porosity of cellular concrete with various types of laying with its fractal dimension

Пористость P , %	Фрактальная размерность D при различных типах укладки		
	Гексагональная	Кубическая	«Случайная»
10	1,283	1,321	1,546
20	1,525	1,407	1,587
30	1,775	1,497	1,632
40	1,817	1,511	1,659
50	1,833	1,523	1,671
60	1,847	1,541	1,682
70	1,852	1,582	1,694
80	1,638	1,525	1,546
85	1,541	1,461	1,482
90	1,431	1,432	1,383

На рис. 1 приведено смоделированное (в рамках разработанного программного комплекса) изображение ячеистого бетона с идеальной гексагональной и кубической упаковками с наложенной на него сеткой с квадратами, по которым в соответствии с алгоритмом определялась фрактальная размерность модельных образцов. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Связь пористости ячеистого бетона с различными типами укладки (упаковки) с его фрактальной размерностью представлена в табл. 2.

На рис. 2, где приведена зависимость фрактальной размерности поровой структуры ячеистого бетона от величины пористости для гексагональной и кубической укладки (упаковки), видно наличие трех участков: с увеличением пористости в интервале $\approx 10-30\%$ фрактальная размерность линейно возрастает; в интервале $\approx 30-70\%$ линейный рост фрактальной размерности незначителен; в интервале $\approx 70-90\%$ фрактальная размерность линейно уменьшается. При этом темпы роста и уменьшения фрактальной размерности структуры ячеистого бетона для рассматриваемых типов укладки различны. Так, для гексагонального типа укладки:

- на интервале $10-30\%$ заметный рост аппроксимируется прямой

$$D = 0,02498 P + 1,0156;$$

- на интервале $30-70\%$ незначительный рост аппроксимируется прямой

$$D = 0,00114 P + 1,777;$$

- на интервале $70-90\%$ линейное уменьшение аппроксимируется прямой

$$D = -0,02236 P + 3,444.$$

Для кубического типа укладки имеем:

- на интервале $10-30\%$ заметный рост аппроксимируется прямой

$$D = 0,0893 P + 1,2277;$$

- на интервале $30-70\%$ незначительный рост аппроксимируется прямой

$$D = 0,00195 P + 1,454;$$

- на интервале $70-90\%$ линейное уменьшение аппроксимируется прямой

$$D = -0,00786 P + 2,128.$$

Как видно из представленных результатов, изменения фрактальной размерности, описываемые прямыми линиями на соответствующих интервалах, для гексагональной и кубической упаковок неравнозначны: коэффициент наклона прямой k , характеризующий скорость возрастания (убывания) функции, для гек-

сагональной упаковки имеет по модулю большие значения, чем при кубической. Эти два вида идеальной структуры ячеистого бетона можно рассматривать как предельные виды упаковок с точки зрения верхнего и нижнего пределов скорости изменения фрактальной размерности структуры пористого материала.

Достаточно нетривиальное изменение фрактальной размерности структуры ячеистого бетона, связанное с характером изменения поровой структуры, прямо указывает на особенности организации самой структуры ячеистого бетона, а именно:

- в первом интервале ($\approx 10-30\%$) происходит слияние изолированных сферических пор и образование поровых кластеров с разветвленными границами, что вызывает рост фрактальной размерности;
- во втором интервале ($\approx 30-70\%$) при увеличении порового пространства, где фрактальная размерность изменяется (увеличивается) незначительно ($k \approx 10^{-4}$), геометрическая конфигурация границ пор не изменяется, а меняется только их протяженность;
- в третьем интервале ($\approx 70-90\%$), в котором фрактальная размерность убывает, сформировались очень крупные поры с геометрически гладкими границами, что и определяет уменьшение фрактальной размерности.

Нам представляется, что такое поведение фрактальной размерности связано с известными в пористых материалах порогами перколяции [25, 26].

Таким образом, на основании разработанного метода анализа поверхности пористой структуры ячеистого бетона оказалось возможным, помимо выявленной собственно ее фрактальной природы, получить корреляцию с известными особенностями в поведении пористых материалов. Однако это возможно только на смоделированных образцах с идеальной структурой, которая в практической производственной работе технологически получена быть не может. Поэтому следует ожидать, что реальные образцы при применении соответствующих технологий лишь в той или иной степени могут приближаться к смоделированным и по своим фрактальным характеристикам занимать промежуточное положение. В связи с этим был выполнен численный эксперимент, в котором структура ячеистого бетона моделировалась с учетом условий, близких к реальным образцам. Для этого с помощью генератора случайных чисел для заданных диапазонов размеров сферических пор и процента пористости моделировалась структура ячеистого бетона. Полученные данные анализировались на основе построенных гистограмм для содержания пор во всем рассматриваемом диапазоне (от 10 до 90 %). Результаты модельных расчетов аппроксимировались кривыми Гаусса (нормальный закон распределения вероятностей) и Коши — Лоренца [27].

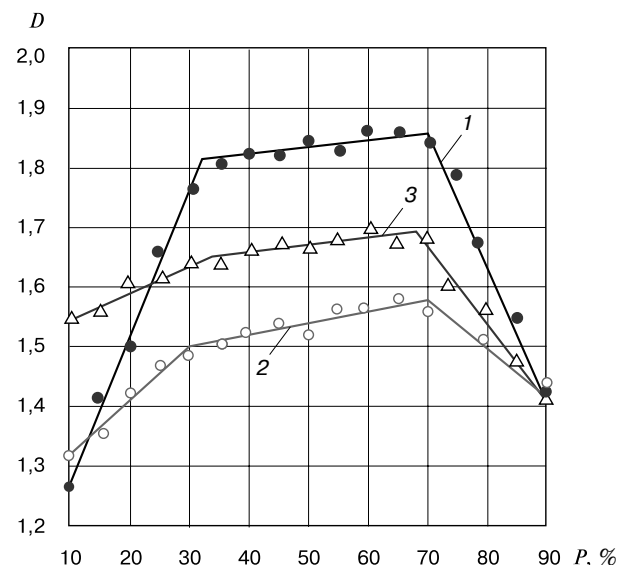


Рис. 2. Зависимость между фрактальной размерностью D и пористостью P (%) в ячеистом бетоне с гексагональной (1), кубической (2) и «случайной» (с помощью генератора случайных чисел) укладками (3) с заданным процентом пористости

Fig. 2. Relationship between the fractal dimension D and the porosity P (%) in cellular concrete with hexagonal (1), cubic (2) and “random” (using a random number generator) types of laying (3) with a given percentage of porosity

$\Delta \bullet \circ$ calculated values; — linear approximation

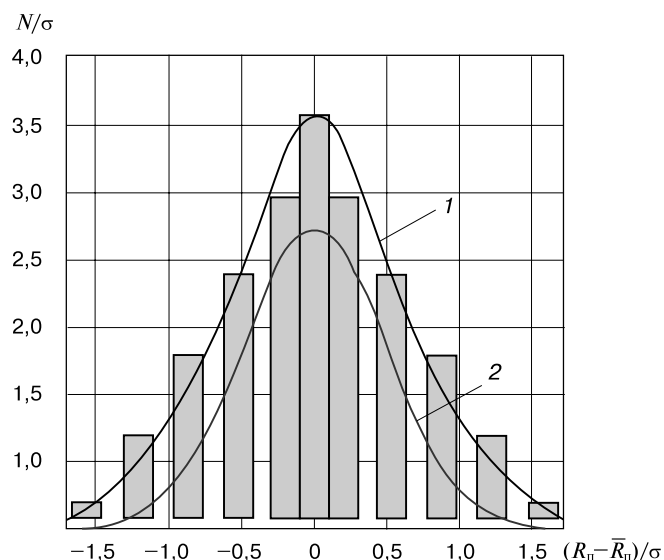


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности пор по размерам, нормированном на величину стандартного отклонения, и ее аппроксимация функциями Коши — Лоренца (1) и Гаусса (2). Примечание: N — процентное количество пор данного радиуса из заданного диапазона; σ — стандартное отклонение

Fig. 3. Histogram of the density distribution of pores in size, normalized to the standard deviation, and its approximation by the Cauchy — Lorentz functions (1) and Gauss (2).

Note: N — percentage number of pores of a given radius from the specified range; σ — standard deviation

На рис. 3 приведена гистограмма модельного расчета структуры ячеистого бетона с использованием генератора случайных чисел для порового пространства 50 %

в диапазоне размеров пор с радиусом от 0,2 до 2 мм, аппроксимированная функцией Гаусса

$$G(\Delta R_n, \sigma) \cong \exp\left[-(\Delta R_n)^2 / \sigma^2\right], \quad (4)$$

где σ — стандартное отклонение, и функцией Коши — Лоренца

$$P(\Delta R_n, \bar{R}_n, b) = \frac{1}{\pi} \frac{b}{(R_n - \bar{R}_n)^2 + b^2}, \quad (5)$$

где R_n — радиус пор; $\bar{R}_n$ — среднее значение из заданного диапазона; b — масштабный параметр полуширины на полувысоте. Следует отметить, что функция Коши — Лоренца, в отличие от функции Гаусса, описывает функцию распределения с большей точностью (рис. 3) [28].

Результаты расчетов фрактальной размерности для смоделированной «случайным» образом структуры ячеистого бетона приведены на рис. 2 (кривая 3). Как и следовало ожидать, положение этой фрактальной кривой, или прямых на трех участках, занимает некоторое промежуточное положение между фрактальными кривыми с идеальной гексагональной и кубической укладками. Важно, что диапазоны изменчивости практически совпадают с рассчитанными по модели с идеальной укладкой. Поэтому полученные выводы на основе анализа фрактальной структуры ячеистого бетона с теоретически идеальной упаковкой в полной мере можно отнести и к образцу, приближающемуся по своей структурной организации к реальному, т. е. технологически обеспеченному.

Заключение. В результате проведенных исследований целесообразно отметить следующее:

1. Получена зависимость фрактальной размерности поровой структуры ячеистого бетона от величины пористости для гексагональной и кубической укладок частиц бетонов.
2. Обоснована возможность применения нового методологического подхода к оценке структуры ячеистого бетона, основанного на использовании современных информационных технологий.
3. Предлагаемый методологический подход возможно использовать при создании теплоизоляционно-конструкционного строительного материала для наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 3. С. 312–320.

2. Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С. К исследованию вопроса повышения энергоэффективности зданий на железнодорожном транспорте // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2018. Т. 8. № 1. С. 4–11.

3. Шаумаров С.С. Моделирование процесса формирования температурного поля наружного ограждения зданий на железнодорожном транспорте // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. С. 338–346.

4. Computational microstructure characterization and reconstruction: Review of the state of the art techniques / R. Bostanabad, Yi. Zhang, X. Li [et al.] // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 95. P. 1–41.

5. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging / A. Abina, U. Puc, A. Jegli, A. Zidan ek // NDT & E International. 2016. Vol. 77. P. 11–18.

6. Шаумаров С.С., Шипачева Е.В., Пирматов Р.Х. Перспективы дальнейшей эксплуатации панельных жилых зданий // Перспективы развития строительных технологий: материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф. Днепр, 2018. С. 165–169.

7. Shaumarov S.S., Adilkhodzhaev A.I., Karimova F.F. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings // International conference “Science and practice: a new level of integration in the modern world” (London, 27 April 2018): [proc. of conf.]. London, 2018. P. 365–368.

8. Shaumarov S.S., Adilkhodzhaev A.I., Kandakhov S.I. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings // International conference “Student science: research works” (San Francisco, 30 March 2018): [proc. of conf.]. Part II. San Francisco: B & M Publishing, 2018. P. 103–106.

9. Adilkhodzhaev A.I., Shaumarov S.S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated // X International scientific conference “Transport Problems-2018” (Katowice, 27–29 June 2018): [proc. of conf.]. Katowice: Silesian University of Technology, 2018. P. 13–18.

10. Shaumarov S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport // VIII International conference “Transport Problems-2016” (Katowice, 29 June – 1 July 2016): [proc. of conf.]. Katowice: Silesian University of Technology, 2016. P. 522–532.

11. Kim H.K., Jeon J.H., Lee H.K. Workability and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 29. P. 193–200.

12. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete / D. Bouvard, J. Chaix, R. Dendievel [et al.] // Cement and Concrete Research. 2007. Vol. 37. Issue 12. P. 1666–1673.

13. Complex approach at thermalization external walls of residential buildings / A. I. Adilkhodzhaev, S. S. Shaumarov, E. V. Shchipacheva, S. I. Kandakhov // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2019. Vol. 6. Issue 1. P. 71–77.

14. Modeling of machine structure composite construction materials / A. I. Adilkhodzhaev, S. S. Shaumarov, E. V. Shchipacheva, S. I. Kandakhov // European Journal of Research (Vienna, Austria). 2019. Vol. 2. P. 75–84.

15. Шаумаров С.С. К проблеме термообновления объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2019. № 1 (20). С. 78–89.

16. Прогнозирование эффективности введения минеральных наполнителей в цементные композиты / А. И. Адилходжаев [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-01-105-112>.

17. Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С. Об оптимизации макроструктуры конструктивно-теплоизоляционных строительных материалов // Вестник ТашИИТ. 2018. № 4. С. 3–9.

18. Адилходжаев А. И., Шаумаров С. С. К вопросу моделирования структуры конструктивно-теплоизоляционных материалов для энергоэффективных гражданских зданий // Вестник ТашИИТ. 2019. № 1. С. 4–10.

19. Шаумаров С. С. О методе оценки теплозащитных свойств наружных стен эксплуатируемых зданий на железнодорожном транспорте // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. № 2 (15). С. 18–25.

20. Кривицкий М. Я., Левин Н. И., Макаричев В. В. Ячеистые бетоны: технология, свойства и конструкции. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.

21. Меркин А. П., Филин А. П., Земцов Д. Г. Формирование макроструктуры ячеистых бетонов // Строительные материалы. 1963. № 12. С. 9–21.

22. Falconer K. J. The geometry of fractal sets. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 190 p.

23. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. New York: W. H. Freeman and Company, 1983. 240 p.

24. Королев А. С., Волошин Е. А., Трофимов Б. Я. Оптимизация состава и структуры конструктивно-теплоизоляционного ячеистого бетона // Строительные материалы. 2004. № 3. С. 30–32.

25. Sahimi M. Application of percolation theory. London: Taylor & Francis, 1994. 320 p.

26. Фракталы и перколяция в пористой среде / Э. Гийон [и др.] // Успехи физических наук. 1991. Т. 161. № 10. С. 121–128.

27. Spiegel M. R. Theory and problems of probability and statistics. New York: McGraw-Hill, 1992. 114 p.

28. Budaev V. P., Khimchenko L. N. Fractal growth of deposited films in tokamaks // Physica A. 2007. Vol. 382. P. 359–377.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

АДИЛХОДЖАЕВ Анвар Ишанович,

д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям, ТашИИТ

ШАУМАРОВ Саид Санатович,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Строительство зданий и промышленных сооружений», ТашИИТ

ЩИПАЧЕВА Елена Владимировна,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Строительство зданий и промышленных сооружений», ТашИИТ

БЕГМАТОВ Нодир Исмоилович,

аспирант, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 11.02.2019 г., принята к публикации 24.04.2019 г.

Methodological approach to estimation of the structure of load bearing insulation materials of buildings and constructions of railway transport

A. I. ADILKHODZHAEV¹, S. S. SHAUMAROV¹, E. V. SHCHIPACHEVA¹, N. I. BEGMATOV²

¹Tashkent Institute of Railway Engineers (TashIIT), Tashkent, 100067, Uzbekistan

²Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article considers the question of the development of a new methodological approach to the creation of a heat-insulating constructional building material for external enclosing structures of buildings and constructions of railway transport. As the strength of cellular concrete is directly proportional to the average density, and the thermal properties are inversely proportional, solution to the problem of optimizing macrostructure of material in order to simultaneously improve its strength and thermal properties is much more complicated. In addition, when optimizing the properties of cellular concrete, it is necessary to vary the components that form it. Thus, optimization, ultimately, is reduced to solving a multifunctional problem with variable multicomponent parameters. Solving the problem of optimizing macrostructure of cellular concrete on the basis of an experiment using the "trial and error" method is very expensive. Moreover, even an experiment based on some technological approach does not guarantee a positive result for the values of average density taken in a reasonably wide range. Given that the thermal properties of cellular concrete are closely related not only to its average density and, consequently, to average porosity, but also to the pore size distribution and structure features in general, the method of estimating pore structure of the material in a simple and accessible way is of particular interest. A numerical experiment was performed in which the structure of cellular concrete was modeled to conditions close to real samples. To do this, using a random number generator for a given range of sizes of spherical pores and a given percentage of porosity, the structure of cellular concrete was modeled. The modeling results were analyzed on the basis of the constructed histograms for a given percentage of pores in the entire considered range (from 10 to 90 %). Results of model calculations were approximated by Gauss curves (normal law of probability distribution) and Cauchy – Lorentz curves. Thus, the new methodological

approach to estimating structure of cellular concrete, based on the use of the modern approach from the standpoint of information technology, is quite accurate in defining and in its practical implementation much simpler than classical research methods.

Keywords: railway buildings and structures; load bearing insulation material; cellular concrete; macrostructure; modeling; optimization; fractal dimension

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-162-168>

REFERENCES

1. Adilkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M., Shaumarov S. S. *Teoreticheskie aspekty strukturno-imitatsionnogo modelirovaniya makrostrukturnykh kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov* [Theoretical aspects of the structural-imitation modeling of the macrostructure of composite building materials]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018, no. 3, pp. 312–320.

2. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S. *K issledovaniyu voprosa povysheniya energoeffektivnosti zdaniy na zheleznodorozhnom transporte* [To study the issue of improving the energy efficiency of buildings in railway transport]. Modern Problems of Russian Transport Complex, 2018, Vol. 8, no. 1, pp. 4–11.

3. Shaumarov S. S. *Modelirovanie protsessa formirovaniya temperaturnogo polya naruzhnogo ograzhdeniya zdaniy na zheleznodorozhnom transporte* [Modeling the process of forming the temperature field of the external fencing of buildings on the railway transport]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific and Technical Gazette of Bryansk State University], 2018, no. 3, pp. 338–346.

4. Bostanabad R., Zhang Yi., Li X., Kearney T., Brinson C., Apple W. D., Liu Kam W. *Computational microstructure characteriza-*

tion and reconstruction. Review of the state of the art techniques. Progress in Materials Science, 2018, Vol. 95, pp. 1–41.

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.

6. Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Pirmatov R. Kh. *Perspektivy dal'neyshey ekspluatatsii panel'nykh zhilykh zdaniy* [Prospects for the further operation of panel residential buildings]. Perspektivy razvitiya stroitel'nykh tekhnologiy. Materialy 12-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference "Prospects for the development of building technologies"]. Dnepr, 2018, pp. 165–169.

7. Shaumarov S. S., Adilkhodzhaev A. I., Karimova F. F. *On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings*. International conference "Science and practice: a new level of integration in the modern world". London, 2018, pp. 365–368.

8. Shaumarov S. S., Adilkhodzhaev A. I., Kandakharov S. I. *On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings*. International conference "Student science: research works" (San Francisco, March 30, 2018), Part II. San Francisco, B & M Publishing, 2018, pp. 103–106.

9. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S. *The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated*. X International Scientific Conference "Transport Problems-2018" (Katowice, June 27–29, 2018). Katowice, Silesian University of Technology Publ., 2018, pp. 13–18.

10. Shaumarov S. S. *On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport*. VIII International Conference "Transport Problems-2016" (Katowice, June 29–July 1, 2016). Katowice, Silesian University of Technology Publ., 2016, pp. 522–532.

11. Kim H. K., Jeon J. H., Lee H. K. *Workability and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air*. Construction and Building Materials, 2012, Vol. 29, pp. 193–200.

12. Bouvard D., Chaix J. M., Dendievel R., Fazekas A., Létang J. M., Peix G., Quenard D. *Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete*. Cement and Concrete Research, 2007, Vol. 37, Issue 12, pp. 1666–1673.

13. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Kandakharov S. I. *Complex approach at thermalization external walls of residential buildings*. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, India, 2019, Vol. 6, Iss. 1, pp. 71–77.

14. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shchipacheva E. V., Kandakharov S. I. *Modeling of machine structure composite construction materials*. European Journal of Research (Vienna, Austria), 2019, Vol. 2, pp. 75–84.

15. Shaumarov S. S. *K probleme termoobnovleniya ob"ektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta* [To the problem of thermal renewal of railway transport infrastructure objects]. Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk [Crede Experto: transport, society, education, language], 2019, no. 1 (20), pp. 78–89.

16. Adilkhodzhaev A. I., Makhamataliev I. M., Tsoi V. M., Shaumarov S. S. *Prognostirovanie effektivnosti vvedeniya mineral'nykh napolniteley v tsementnye kompozity* [Performance forecasting for mineral fillers in cement composites]. Nauchno-tekhnicheskiy

vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2019, no. 1, pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-01-105-112>.

17. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S. *Ob optimizatsii makrostruktury konstruktivno-teploizolyatsionnykh stroitel'nykh materialov* [On the optimization of the macrostructure of structurally insulating building materials]. Vestnik TashIIT, 2018, no. 4, pp. 3–9.

18. Adilkhodzhaev A. I., Shaumarov S. S. *K voprosu modelirovaniya struktury konstruktivno-teploizolyatsionnykh materialov dlya energoэффективnykh grazhdanskikh zdaniy* [To the question of modeling the structure of structurally insulating materials for energy-efficient civilian buildings]. Vestnik TashIIT, 2019, no. 1, pp. 4–10.

19. Shaumarov S. S. *O metode otsenki teplozashchitnykh svoystv naruzhnykh sten ekspluatiruemykh zdaniy na zheleznodorozhnom transporte* [On the method of assessing the heat-shielding properties of the exterior walls of buildings in use in railway transport]. Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona, 2018, no. 2 (15), pp. 18–25.

20. Krivitskiy M. Ya., Levin N. I., Makarichev V. V. *Yacheistye betony: tekhnologiya, svoystva i konstruksii* [Cellular concretes: Technology, properties and structures]. Moscow, Stroizdat Publ., 1972, 136 p.

21. Merkin A. P., Filin A. P., Zemtsov D. G. *Formirovanie makrostruktury yacheistyykh betonov* [Formation of the macrostructure of cellular concrete]. Stroitel'nye materialy, 1963, no. 12, pp. 9–21.

22. Falconer K. J. *The geometry of fractal sets*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985, 190 p.

23. Mandelbrot B. B. *The fractal geometry of nature*. New York, W. H. Freeman and Company, 1983, 240 p.

24. Korolev A. S., Voloshin E. A., Trofimov B. Ya. *Optimizatsiya sostava i struktury konstruksionno-teploizolyatsionnogo yacheistogo betona* [Optimization of the composition and structure of load bearing insulation cellular concrete]. Stroitel'nye materialy, 2004, no. 3, pp. 30–32.

25. Sahimi M. *Application of percolation theory*. London, Taylor & Francis, 1994, 320 p.

26. Giyon E., Mitescu K., Yulen Zh.-P., Ru S. *Fractals and percolation in a porous medium*. Advances in Physical Sciences, 1991, Vol. 161, no. 10, pp. 121–128.

27. Spiegel M. R. *Theory and the probability of statistics*. New York, McGraw-Hill, 1992, 114 p.

28. Budaev V. P., Khimchenko L. N. *Fractal growth of deposited films in tokamaks*. Physica A, 2007, Vol. 382, pp. 359–377.

ABOUT THE AUTHORS

Anvar I. ADILKHODZHAEV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-rector for scientific work and innovation, TashIIT

Said S. SHAUMAROV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Construction of buildings and structures", TashIIT

Elena V. SHCHIPACHEVA,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Construction of buildings and structures", TashIIT

Nodir I. BEGMATOV,

Post-graduate, JSC "VNIIZhT"

Received 11.02.2019

Accepted 24.04.2019

■ E-mail: eminf@shoumarovss@gmail.com (S. S. Shaumarov)