

УДК 519.21

## ВПЛИВ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКРОСТРУКТУРИ НА МІЦНІСТЬ ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНОГО РОЗЧИНУ

**Большаков В. І.**, докт. техн. наук, проф.; **Волчук В. М.**, докт. техн. наук, проф.;  
**Котов М. А.**, канд. техн. наук, доц.; **Конопляник О. Ю.**, канд. техн. наук, доц.

*Державний вищий навчальний заклад*

*«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*

**Постановка проблеми.** Багатокomпонентний склад розчину сприяє тому, що структура його є багатофазною [1]. Слід також зазначити, що деякі ділянки його структури є неоднорідними. При кількісному описі елементів структури розчину дослідники часто стикаються з труднощами, зумовленими її неоднорідністю і будовою. Тому завдання моделювання фізико-механічних властивостей розчину на основі аналізу його структури є актуальним завданням матеріалознавства [2]. Однак існуючі емпіричні моделі структура-властивості не завжди дозволяють отримувати адекватні результати прогнозу з високим ступенем точності. Однією з причин невисокої точності моделей прогнозу фізико-механічних властивостей будівельних матеріалів є ще й складна геометрична конфігурація елементів їх структури [3–5].

**Мета дослідження.** Досліджувалася макроструктура цементно-піщаного розчину (рис. 1). В результаті кількісного аналізу структури дев'яти зразків встановлено, що вміст піску коливався в межах 65...78 %. Зміст цементу від 22 до 35 % (портландцемент М400), а великі і середні пори займали 4...10 %. Так само в розчин додана домішка в розмірі 1...3 % від маси цементу, яка підвищує зручність нанесення і водостійкість. Темні ділянки з переважанням сростков в'язучого на рисунку 1 позначені маркером 1. Світлі ділянки (маркер 2) відповідають ділянкам з переважанням піску, маркер 3 позначає пори.

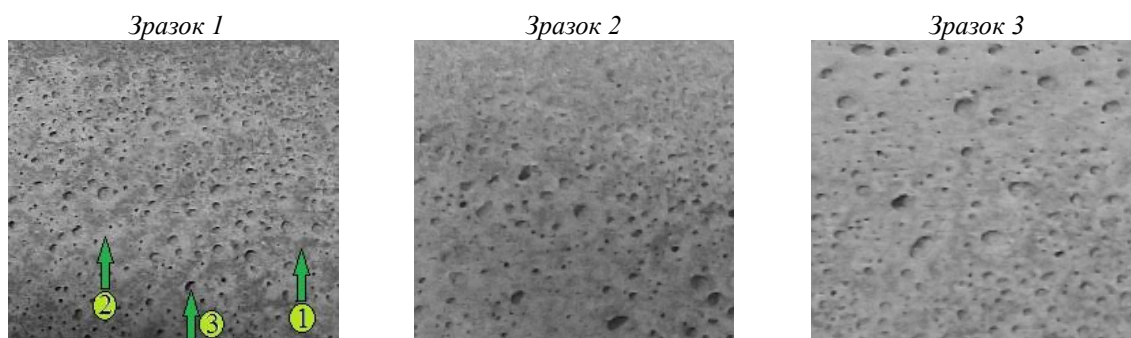


Рис 1. Макроструктура зразків розчину: 1 – ділянки структури сростков в'язучого; 2 – ділянки структури з піском; 3 – великі й середні пори

Спектр статистичних розмірностей Рені ідентифікованих елементів макроструктури обчислювався за допомогою програмного продукту, розробленого в середовищі Delphi. Алгоритм роботи програми описаний в [17] і базується на застосуванні формули [18]:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де  $\ln \sum_{i=1}^N p_i^q$  – узагальнена статистична сума ймовірностей  $p_i$  – попадання точки досліджуваного об'єкта в  $i$ -ю осередок квадратної сітки з розміром  $\delta$ .  $D_0$  – фрактальна

розмірність об'єкта;  $D_1$  – інформаційна розмірність при показнику ступеня  $q = 1$ ;  $D_2$  – кореляційна розмірність за  $q = 2$ ;  $D_{-}$  і  $D_{+}$  – розмірності найбільш темних і світлих ділянок неоднорідної структури відповідно.

**Результати дослідження.** На рисунку 2 наведені залежності і описують їх рівняння регресії. У всіх розглянутих випадках залежності апроксимуються лінійними моделями. Це свідчить про існування взаємозв'язку між розмірностним фактором структури розчину і критеріями його якості. Слід зазначити, що відносно високі серед розглянутих коефіцієнтів парної кореляції  $R^2 = 0.75$  і  $R^2 = 0.81$  мають моделі, які описують зв'язок між фрактальними розмірностями  $D_0$  ділянок з піском і пор (рис. 2 а). Gao, Yun, et al. в [16] підтверджують мультифрактальну природу пор. Вони відзначають, що на відміну від фрактального підходу застосування теорії мультифракталів дозволяє дати більш ємну характеристику порам в порівнянні з їх розподілом за розмірами і просторовим розташуванням завдяки спектру розмірностей. Також спостерігається кореляція  $R^2 = 0.77$  між статистичною розмірністю світлих ділянок структури з піском  $D_{100}$  (Рис. 2 б).

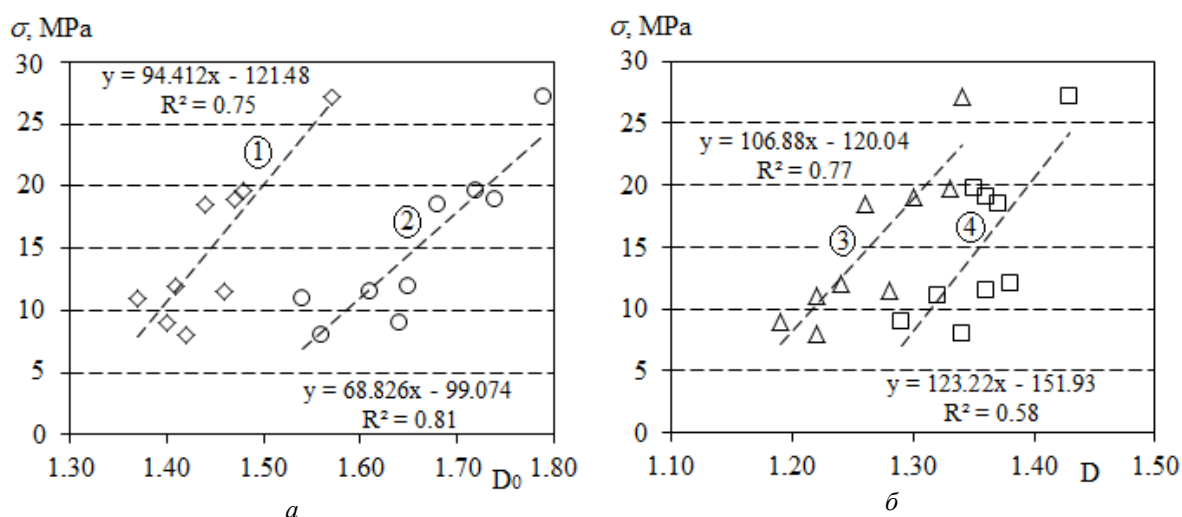


Рис 2. Співвідношення між показниками міцності на вигин і розмірностями елементів структури: 1 і 2 – розмірності  $D_0$  ділянок з піском і пор відповідно (а); 3 –  $D_{100}$  ділянок з піском і ділянок структури з переважанням сrostков в'язучого 4 –  $D_2$  (б);

**Висновки.** Розглянуто підхід оцінки міцності на вигин розчину на підставі мультифрактального аналізу його макроструктури. Визначалися розмірності  $D_{100}$ ,  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_{100}$  з мультифрактального спектра. Обчислення коефіцієнтів чутливості між розмірностями елементів структури розчину (з переважанням сrostков в'язучого, піском, порами) і показниками міцності на вигин дозволило провести ранжування розмірностей за ступенем їх впливу на міцність. Встановлено, що найбільші коефіцієнти чутливості 0,76 зафіксовані між фрактальними розмірностями пор і 0,59 для світлих ділянок структури з піском. Між статистичними розмірностями ділянок з переважанням сrostков в'язучого  $D_{100}$  і піском  $D_{100}$  також підтверджена чутливість на рівні значень 0,60 і 0,61 відповідно.

Пошук найбільш чутливих характеристик між якістю розчину і мультифрактальними розмірностями дозволяє отримувати моделі прогнозу з більш високим ступенем достовірності залежно від визначального параметра.

### Список використаних джерел

1. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. Special concrete: a practical guide. Moscow : Infra-Engineering, 2012.
2. Liu L., Wang X., Chen H., Wan C. Microstructure-based modelling of drying shrinkage and microcracking of cement paste at high relative humidity *Constr. Building Materials*. 2016. Vol. 126. Pp. 410–425.
3. Li D., Niu D., Fu Q., Luo D. Fractal characteristics of pore structure of hybrid Basalt – Polypropylene fibre-reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2020. Vol. 109. P. 103555.
4. Mahamud M., López Ó., Pis J.J., Pajares J.A. Textural characterization of coals using fractal analysis. *Fuel Process. Technol.* 2003. Vol. 81. Pp. 127–142.
5. Duan Q., An J., Mao H., Liang D., Li H., Wang S., Huang C. Review about the Application of Fractal Theory in the Research of Packaging Materials. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 860.
6. Zeng Q., Luo M., Pang X., Li L., Li K. Surface fractal dimension: an indicator to characterize the microstructure of cement-based porous materials. *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 282. Pp. 302–307.
7. Volchuk V. M., Kotov M. A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1926. P. 012023.
8. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *KEM*. 864 43-52. 2020.
9. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. *MSF*. 968 20-25. 2019.
10. Volchuk V. M. On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39 (7). Pp. 949–957.
11. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of one conditionally Ill-posed problem of extractive metallurgy. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40 (9). Pp. 1165–117.
12. Khamidulina D. D., Nekrasova S. A. Fractals in construction material science. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. 451 012026.
13. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. 1021 012053.
14. Fu Jun and Yu Yue. Experimental Study on Pore Characteristics and Fractal Dimension Calculation of Pore Structure of Aerated Concrete Block. *Adv. Civ. Eng.* 2019. Pp. 1–11.
15. Bozhokin S. V., Parshin D. A. Fractals and multifractals. Izhevsk : Regular and chaotic dynamics. 2001.
16. Gao Y., Jiang J., De Schutter G, Ye G., Sun W. Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Constr. Build. Mater.* 2014. Vol. 69. Pp. 253–261.
17. Bolshakov V. I., Volchuk V. M. Materials Science Aspects of Using of Wavelet-Multifractal Approach to an Evaluation of Structure and Properties of Low-Carbon Low-Alloyed Steels. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2011. Vol. 33 (3). Pp. 347–360.
18. Rényi A. Probability Theory (Amsterdam, Netherlands: North-Holland). 1970.
19. Lü Q., Qiu Q., Zheng J., Wang J., Zeng Q. Fractal dimension of concrete incorporating silica fume and its correlations to pore structure, strength and permeability. *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 228. P. 116986.
20. Li Y., Zhang H., Huang M., Yin H., Jiang K., Xiao K., Tang S. Influence of Different Alkali Sulfates on the Shrinkage, Hydration, Pore Structure, Fractal Dimension and Microstructure of Low-Heat Portland Cement, Medium-Heat Portland Cement and Ordinary Portland Cement. *Fractal and Fractional*. 2021. Vol. 5 (3). P. 79.