

Исследование функции плотности распределения эквивалентных гидравлических радиусов

Ю.А. Макаров, И.П. Терешкин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Аннотация: В статье рассмотрена возможность определения физико-механических свойств материалов с помощью исследования функции распределения пор по эквивалентным гидравлическим радиусам. Показано, что теоретические вероятности и наблюдаемые частоты появления соответствует допускаемому при расчетах критерию подобия.

Ключевые слова: Плотность распределения, эквивалентный гидравлический радиус, критерий подобия, статистическая вероятность, поровое пространство, мелкодисперсный наполнитель, дифференциальная пористость.

Поровое пространство строительных материалов является весьма сложным по своей форме и представляет собой систему хаотически расположенных пор размером от 0,01 до 100 мкм (а иногда и более) [1].

Характеристики пористости можно менять различными способами, например, регулируя температуру и влажность среды твердения, водоцементное отношение, вводя различные химические добавки и минеральные наполнители. Эти методы позволяют не только влиять на общую пористость, но и менять в широких пределах конфигурацию пор, показатели их размера, соотношение открытой и замкнутой пористости, преобладающее количество микро- или макропор.

Известно, что структура порового пространства оказывает определенное влияние на физико-механические свойства материалов [5-7, 9-12], например их прочность, водо- и газопроницаемость, морозостойкость, стойкость к коррозии, теплопроводность, долговечность и т.д.

Но для практического использования роли структуры в процессе формирования свойств материала, необходимо иметь количественную и качественную оценку этого влияния.

В настоящее время существуют методики, с помощью которых можно рассчитать большинство свойства материалов. Однако для такого расчета необходима функция, характеризующая распределение порового пространства по радиусу кривизны [6 с.110-133]. Такой функцией является плотность распределения эквивалентных гидравлических радиусов (ЭГР).

В целом, методики определения параметров пористости многочисленны и представлены они в основном методами физического и физико-химического анализа. Эти методы можно подразделить на две группы: методы, позволяющие дифференцировать поры по радиусам в зависимости от занимаемого ими объема, и методы, позволяющие определять значения общего объема пор.

Сложность определения функции плотности распределения ЭГР заключается в том, что для этого требуется получить параметры как раз дифференциальной пористости, т.к. практические исследования показывают определенную зависимость свойств материала по отношению именно к ним.

Для определения данной функции можно использовать косвенные методы. К ним относят сорбционный метод [4], методы, основанные на связи капиллярных сил с остаточной насыщенностью пористой среды [2] и другие [6 с.110-133]. Однако данные методики трудоемки и дают большое расхождение в результатах. Поэтому в настоящее время все чаще применяют прямые методы исследования [8], в частности, в данной работе применялся метод оптического сканирования.

Авторами статьи проведено исследование, связанное с проверкой правдоподобия гипотезы согласованности теоретических распределений пор по эквивалентным гидравлическим радиусам со статистическими.

В эксперименте изготавливались образцы цементно-песчаного раствора, часть вяжущего которых заменяли мелкодисперсным наполнителем – цеолитом – в количестве 17% по массе [6,7,10].

Параметры дифференциальной пористости получали следующим образом. При помощи алмазного шлифа делали плоский срез образца и очищали его поверхность от пыли струей сжатого воздуха, после чего срез помещали под сканер с высоким разрешением. Полученное изображение обрабатывали с помощью ЭВМ для выделения из общей картины пористой среды (рис.1). Затем путем наложения на преобразованное изображение сетки с малыми размерами ячеек при помощи ЭВМ подсчитывали площадь пор, производили их деление по площадям и далее по эквивалентным гидравлическим радиусам в заданном интервале величин.

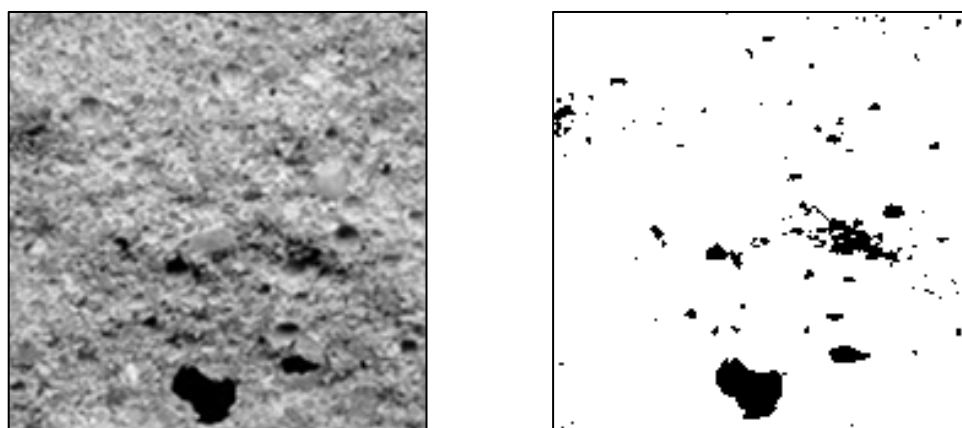


Рис. 1. Изображение микроструктуры образца, полученное сканированием шлифа (слева); то же, обработанное с помощью ЭВМ (справа)

Таким образом, данный метод качественно выявляет и количественно характеризует диапазон размеров пор и капилляров. Метод дает надежные и хорошо воспроизводимые результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Радиус пор, мкм	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120	121-130
Число пор в 1 см ²	113	88	225	78	66	34	44	44	9	26	0	13	0

Затем строили дифференциальные кривые распределения пористости по эквивалентным гидравлическим радиусам в нормальных и дважды логарифмических координатах (рис. 2).

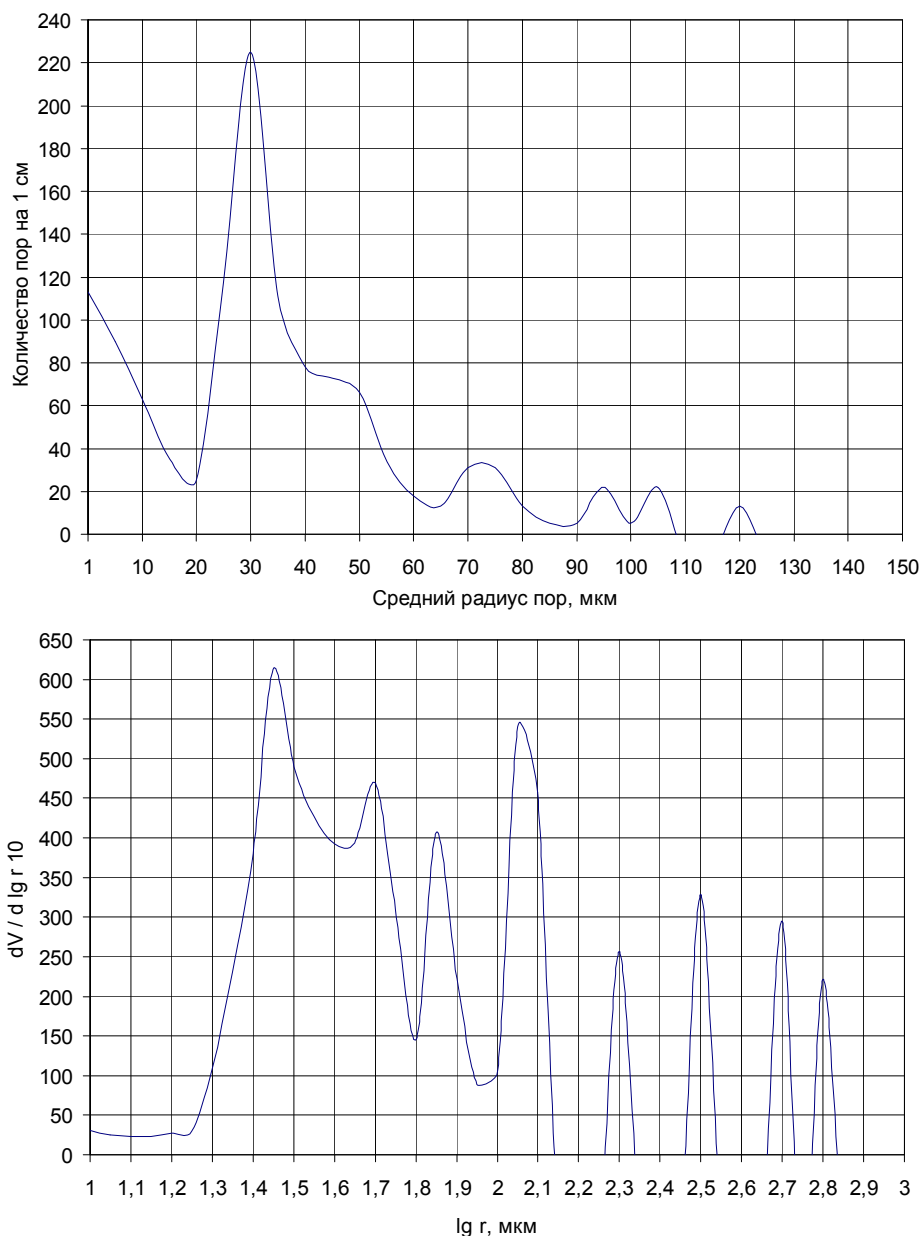


Рис.2. Дифференциальные кривые распределения пор по ЭГР в прямых (вверху) и дважды логарифмических (внизу) координатах

Функции распределения плотности, имеющие три максимума, получены в предположении, что выполняется логарифмически нормальный закон распределения [3]:

$$f(R) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log_2 R - \log_2 R_0)^2}{2\delta^2}} \quad (1)$$

где: δ - среднеквадратичное отклонение;

$\log_2 R_0$ - мода нормального закона распределения.

Функция распределения плотности с тремя максимумами имеет вид:

$$f(R) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi D_1}} e^{-\frac{(\ln R / \ln R_{01})^2}{D_1}} + \frac{A_2}{\sqrt{2\pi D_2}} e^{-\frac{(\ln R / \ln R_{02})^2}{D_2}} + \frac{A_3}{\sqrt{2\pi D_3}} e^{-\frac{(\ln R / \ln R_{03})^2}{D_3}} \quad (2)$$

где: D – дисперсии соответствующих кривых логарифмически нормального распределения.

Математическая обработка кривых дифференциальной пористости производилась по формулам:

$$\ln R_0 = \sum_i^n \ln R_i p_i \quad (3)$$

$$D = \delta^2 = \sum_i^n \ln \frac{R_i}{R_0} p_i \quad (4)$$

где: R_i – эквивалентный радиус наблюдаемых пор по кривым дифференциальной пористости;

p_i – статистическая вероятность события $R = R_i$.

$$p_i = \frac{m_i}{n} \quad (5)$$

где: m_i – количество событий, приходящихся на i -й разряд;

n – общее количество событий.

Вычисленные по формулам (3)–(5) статистические характеристики образцов исследуемого состава представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

R_i , мкм	0- 10	11- 20	21- 30	31- 40	41- 50	51- 60	61- 70	71- 80	81- 90	91- 100	101- 110	111- 120	121- 130
P_i	0,153	0,119	0,304	0,105	0,089	0,046	0,059	0,059	0,012	0,036	0	0,018	0

Таблица 3

Параметры									
ρ , г/см ³	R_{01} , мкм	R_{02} , мкм	R_{03} , мкм	A_1	A_2	A_3	D_1	D_2	D_3
1,91	5	25	65	0,30	0,59	0,11	1,638	0,642	0,998

Графики плотности распределения, полученные с использованием данных таблицы 3, приведены на рисунке 3. Точками на рисунках показаны статистические вероятности распределения.

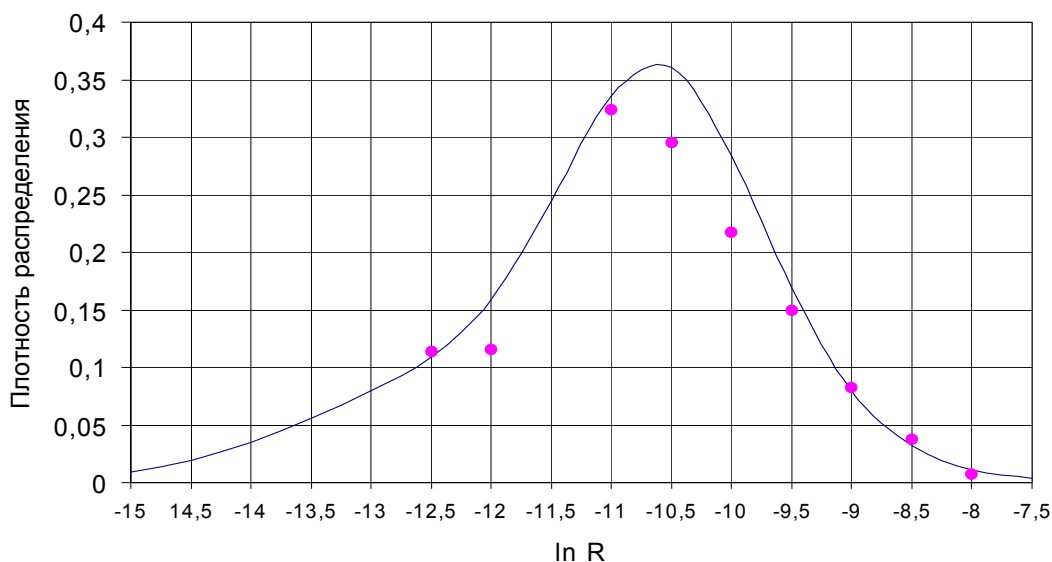


Рис.3. График функции плотности распределения ЭГР

Проведенное исследование показало, что результаты определения дифференциальной пористости методом прямого сканирования хорошо согласуются с результатами, полученными с использованием других методик [2,4,6]. Критерий Пирсона χ^2 , характеризующий меру расхождения между теоретическими вероятностями $f(R)$ и наблюдаемыми частотами появления p_i равен 5,6 для кривой плотности распределения, имеющей три максимума, что соответствует вероятности подобия 0,90.

Литература

1. Баженов Ю.М. Бетонополимеры. – М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
2. Вайнер М.И. О некоторых характерных чертах структуры однородных пористых сред // Известия АН СССР, Механика, 1965, №5, с.166-168.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.

4. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1970. – 407 с.
5. Кожникова Е.А. Оценка влияния водоцементного отношения на прочность бетона с активированным цементом // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_131_Kozhnikova.pdf_b538a3eaa3.pdf.
6. Макаров Ю.А. Химическое сопротивление бетонополимеров: дисс. ...канд.тех. наук: 05.23.05/Макаров Юрий Алексеевич. – Саранск, 2000.– 211 с.
7. Макаров Ю. А., Терешкин И. П. Применение цеолитсодержащих пород для изготовления растворов на минеральных вяжущих // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2013. №11(78). С. 102-105.
8. Микроанализ и растровая электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
9. Моргун В.Н., Пушенко О.В. О структуре фибропенобетонов.// Инженерный вестник Дона, 2012, №3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/955.
10. Терешкин И.П. Разработка вяжущих низкой водопотребности для стендовых технологий: дисс. ...канд.тех. наук: 05.23.05 / Терешкин Иван Петрович. – Саранск, 2001. – 244 с.
11. Mielens Richard C. History of chemical admixtures for concrete // Concr. Int. Des. and Constr. 1984. V.6. №4. pp. 40-53.
12. Dr. S.N. Ghosh Cement and concrete science & technology. New Delhi: NCB, 1991. – 34 p.

References

1. Bazhenov Y.M. Betonopolimery [Concrete Polymers]. М.: Stroyizdat, 1983. 472 p. (In Russ.)
-

2. Vajner M.I. O necotoryh harakternyh chertah strukturi odnorodnyh poristykh sred. Izvestiya AN SSSR, *Mechanica*, 1965, №5. P. 166-168. (In Russ.)
 3. Ventcel E.S. *Teoriya veroyatnostei [Probability Theory]*. M.: Fizmatgiz, 1962. 564 p. (In Russ.)
 4. Greg S., Sing K. *Adsorbtsiya, udelnaya poverhnost, poristost [Adsorption, Specific Surface, Porosity]*. M.: Mir, 1970. 407 p. (In Russ.)
 5. Kozhnikova E.A. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2017, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_131_Kozhnikova.pdf_b538a3eaa3.pdf. (In Russ.)
 6. Makarov Y.A. *Himicheskoe soprotivlenie betonopolimerov [Chemical Resistance of Concrete Polymers]: Diss. ...Cand. Sciences: 05.23.05. Makarov Yuri Alekseevich. Saransk, 2000. 211 p. (In Russ.)*
 7. Makarov Y.A., Tereshkin I.P. *Primenenie ceolitsoderzashykh porod dlya izgotovleniya rastvorov na mineralnykh vyazushykh. Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya. Tambov: Gramota, 2013. №11 (78). pp. 102-105. (In Russ.)*
 8. *Microanalysis i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya [Microanalysis and scanning electron microscopy]*. M.: Metallurgiya, 1985. 392 p. (In Russ.)
 9. Morgun V.N., Pushenko O.V. O structure fibropenobetonov. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/955.
 10. Tereshkin I.P. *Razrabotka vyazhushykh nizkoy vodopotrebnosti dlya stendovykh tehnologiy [Development of astringent low water requirements for bench technologies]: diss. ...Cand. Sciences: 05.23.05. Tereshkin Ivan Petrovich. Saransk, 2001. 244 p. (In Russ.)*
 11. Mielens Richard C. *History of chemical admixtures for concrete. Coner. Int. Des. and Constr.* 1984. V.6. №4. P. 40-53.
 12. Dr. S.N. Ghosh *Cement and concrete science & technology*. New Delhi: NCB, 1991. 34 p.
-