

© Д. Е. ИГОШИН,¹ О. А. НИКОНОВА²

¹Тюменский филиал Института теоретической
и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

^{1,2}Тюменский государственный университет
igoshinde@gmail.com

УДК 531/534

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ С РАЗВЕТВЛЯЮЩИМИСЯ КАНАЛАМИ

THE PERMEABILITY OF THE POROUS MEDIUM WITH A PERIODIC STRUCTURE BRANCHING CHANNELS

Предложена модель пористой среды с разветвляющимися каналами, образованная регулярными структурами. Рассмотрены структуры двух типов: кубическая объемноцентрированная (ОЦ) и кубическая гранецентрированная (ГЦ). Скелет такой среды образован примыкающими друг к другу шаровыми сегментами, содержащими в себе центр сферы. Степень пересечения сфер является модельным параметром, определяющим пористость и просветность среды. Проницаемость определяется двумя параметрами: степенью пересечения сфер и стороной куба. Поровое пространство получено путем вычитания объема скелета из общего объема. Найдены аналитические зависимости пористости и просветности от степени пересечения сфер. Показано, что с помощью рассмотренных структур можно моделировать пористые среды в широком диапазоне пористости: (0,6 ÷ 32,0)% — для ОЦ структуры и (3,6 ÷ 26,0)% — для ГЦ структуры. Минимальное значение соответствует замкнутым порам. Установлено, что при фиксированном значении степени пересечения сфер в ОЦ структуре имеются сечения трех типов, а в ГЦ — четырех. Сечение с минимальной просветностью представляет собой набор каналов, по форме близких к треугольной: четыре для ОЦ структуры и восемь для ГЦ. На этой основе предложена аналитическая оценка снизу для проницаемости рассмотренных сред.

The mathematical model of the porous medium with branching channels formed by regular structures is presented. Two types of the structures are considered: body-centered cubic (BC) and face-centered cubic (FC). The skeleton of such medium is formed by spherical segments. These segments adjoin to each other and each segment contains a sphere center. The extent of the spheres intersection is a model parameter that determines the porosity and clearance of the medium. Permeability is defined by two parameters: the extent of the spheres intersection and the side of the cube. The pore space is obtained by subtracting the skeleton volume from the total volume. Analytical porosity and clearance dependences of the extent of the spheres intersection were obtained. It is shown, that using considered porous structures, porous

medium can be modeled in a wide range of the porosity: $(0,6\div 32,0)\%$ for the BC structure and $(3,6\div 26,0)\%$ for the FC structure. The minimum value corresponds to the closed pores. It has been revealed that at fixed extent of the spheres intersection in the BC structure there are three types of sections and in the FC — four. The section with minimum clearance is the set of channels with the shape close to triangular; four sections for the BC structure and eight sections for the FC structure. On this basis, the lowest analytical estimation for the permeability of considered mediums has been obtained

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Пористая среда, скелет, зерно, регулярная упаковка, пористость, просветность, проницаемость.

KEY WORDS. Porous medium, solid matrix, grain, systematic packing, porosity, luminal, permeability.

Пористые среды характеризуются несколькими параметрами: проницаемость, пористость, насыщенность флюидом. Проницаемость горных пород может принимать широкий диапазон значений: от 10^{-12} м² до 10^{-16} м², что объясняется размерами пор и разнообразием их структуры [1]. Существуют подходы в моделировании пористой среды, которые можно реализовать регулярными упаковками сфер [2; 3], случайными полями [4] или каналами с сужением [5]. Реальные пористые среды имеют сложную систему разветвляющихся каналов, что принципиально отличает их от моделей идеального грунта. Структура такой среды оказывает решающее влияние на характер течения многофазных жидкостей в ней, поскольку способствует слиянию и дроблению капель.

Геометрия задачи. В [6] была рассмотрена пористая среда, образованная каналами регулярной структуры. Количество каналов в таких структурах остается постоянным вдоль их длины. Систему разветвляющихся каналов можно получить, рассмотрев объемноцентрированную (ОЦ) и гранецентрированную (ГЦ) структуры, используя аналогичный подход.

Шаровой сегмент назовем большим, если он содержит центр сферы и малым, если нет. Пусть в объеме V фиктивного грунта скелет образован $N_{сф}$ одинаковыми частицами в форме больших шаровых сегментов, примыкающих друг к другу плоскими поверхностями, при этом общее число отсеченных малых сегментов — $N_{сз}$. Степень пересечения сфер зададим безразмерным параметром

$$\alpha = \Delta/r, \quad (1)$$

где Δ — высота малого шарового сегмента, r — радиус сферы (рис. 1а). Расстояние между центрами ближайших сфер, расположенных в узлах ячейки, примем постоянным и равным $2r_0$, где r_0 — радиус, соответствующий случаю касания сфер ($\alpha = 0$). Из рис. 1а видно, что $r = r_0 + \Delta$, откуда

$$r = r_0/(1 - \Delta). \quad (2)$$

Из рис. 1б и 1в для ОЦ и ГЦ структур соответственно имеем:

$$r_0 = L\sqrt{3}/4, \quad r_0 = L\sqrt{2}/4. \quad (3)$$

На рис. 1 темно-серым цветом показан скелет, светло-серым — поровое пространство. Отметим, что в ОЦ структуре при $r = r_K = L/2$ сферы, расположенные в вершинах ячейки, касаются (рис. 1г), при этом $\alpha_{K=1} = \sqrt{3}/2$. При $r > r_K$ сферы при вершинах куба пересекаются, образуя дополнительные малые сегменты высотой $\Delta_2 = r\alpha_2$, $\alpha_2 = 1 - 2(1 - \alpha)/\sqrt{3}$.

С увеличением степени пересечения сфер α объем пор уменьшается, вместе с этим уменьшается площадь поперечного сечения перемычек между порами. Рассмотрим предельный случай, когда поры становятся замкнутыми. Из рис. 1д и 1е найдем предельные значения $\alpha = \alpha_*$. Применяя формулу радиуса окружности, описанной около треугольника $R = abc/(4S)$, к рассмотренным структурам, с учетом (2) и (3) имеем:

$$\begin{aligned} \text{ОЦ: } r_* &= 3L/(4\sqrt{2}) = r_0\sqrt{3}/2, \text{ откуда } \alpha_* = 1 - \sqrt{2/3}; \\ \text{ГЦ: } r_* &= L/\sqrt{6} = 2r_0/\sqrt{3}, \text{ откуда } \alpha_* = 1 - \sqrt{3}/2. \end{aligned} \quad (4)$$

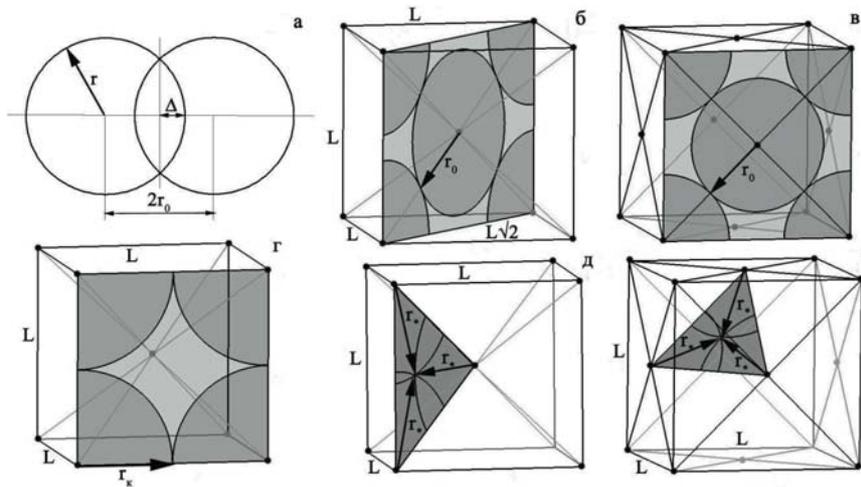


Рис. 1. Регулярные кубические структуры. Основные параметры

На рис. 2 показаны поровые объемы ОЦ структуры (рис. 2а для $\alpha < \alpha_K$, рис. 2б для $\alpha < \alpha_K$) и ГЦ структуры (рис. 2в), а также положения характерных сечений.

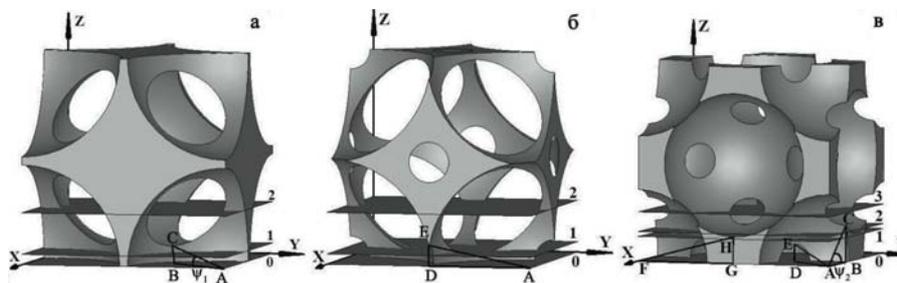


Рис. 2. Поровое пространство в ячейке

Сечения в рассмотренных структурах отдельно показаны на рис. 3 и 4. Серый цвет соответствует порам. Рис. 3а, 3б и 3в соответствуют сечениям 0, 1 и 2 на рис. 2а, рис. 3г соответствует сечению 1 на рис. 2б (случай $\alpha < \alpha_K$). Рис. 4а, 4б, 4в, 4г соответствуют сечениям 0–3 на рис. 2в. Сечение 0 лежит в основании куба. Из рис. 3 видно, что ОЦ структура характеризуется тремя видами сечений, а ГЦ структура — четырьмя. Поровые каналы в сечении близки по форме к квадратным (рис. 3а), которые переходят в близкие по форме к равнобедренным треугольникам (рис. 3б и 3г — по 4 треугольника), а затем — опять в квадратные (рис. 3в — 2 полных квадрата). Из рис. 4 видно, что поровые каналы в сечении близки по форме к квадратным (рис. 4а, 4б — 2 полных квадрата), которые переходят в близкие по форме к равнобедренным треугольникам (рис. 3в — 8 треугольников) а затем — опять в квадратные (рис. 3г — 4 квадрата). Такие структуры будут способствовать возникновению дополнительного гидравлического сопротивления при протекании флюида, а также дроблению и слиянию капель при протекании через них двухфазных жидкостей.

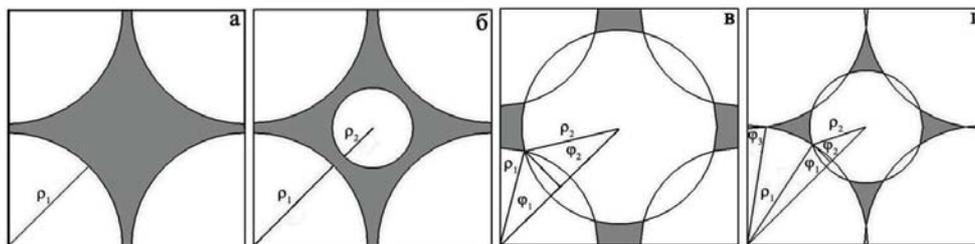


Рис. 3. Типы сечений в объемноцентрированной структуре

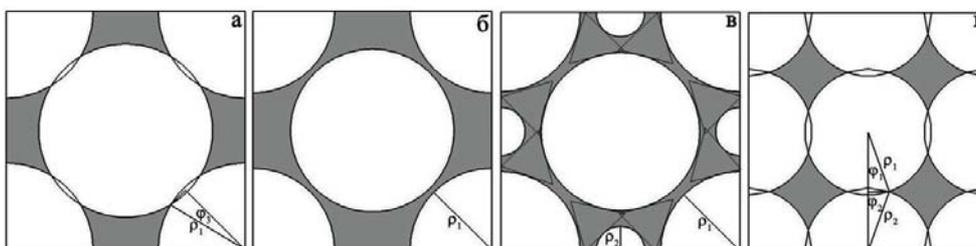


Рис. 4. Типы сечений в гранецентрированной структуре

Основные параметры рассмотренных структур: объем ячейки V , количество полных сфер, приходящихся на ячейку N_{cf} , количество отсекаемых малых сегментов N_{cs} , предельное значение степени пересечения сфер α_* , площадь поперечного сечения S , количество окружностей в сечении $N_{ok,i}$ и количество возникающих при этом круговых сегментов $N_{cs,j}$ — найдены из рис. 1-3 и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные геометрические параметры

Структура	V	N_{cf}	N_{cz}	α_k	S	$N_{ok,i}$ $i = \overline{1,2}$	$N_{cz,j}$ $j = \overline{1,4}$
ОЦ	L^3	2	16	$1 - \sqrt{3}/2 \approx 0,13397$	L^2	1	4
			16, 12	$1 - \sqrt{2/3} \approx 0,1835$			
ГЦ	L^3	4	48	$1 - \sqrt{3}/2 \approx 0,13397$	L^2	2	8

Пористость. По определению пористость

$$m = V_n/V = 1 - V_c/V, \tag{5}$$

где V, V_n, V_c — объемы пористого пространства, пор и скелета соответственно. Объем скелета составляют большие сегменты, т. е. сферы за вычетом объема их пересечений в виде малых шаровых сегментов:

$$V_c = N_{cf} \cdot V_{cf} - N_{cz} \cdot V_{cz}, V_{cf} = 4\pi r^3/3, V_{cz} = \pi \Delta^2(r - \Delta/3), \tag{6}$$

где V_{cf}, V_{cz} — объем сферы и сегментов в ячейке; N_{cf}, N_{cz} — количество сфер и сегментов в ячейке.

Объем ячейки пористой среды, количество сфер и сегментов зависят от типа структуры и приведены в таблице 1. Подставляя эти значения в (5) и (6), с учетом (1-3) получим выражения для пористости, приведенные в таблице 2. Также приведены значения при $\alpha = 0$ и $\alpha = \alpha_*$. Отметим, что в ОЦ структуре при $\alpha < \alpha_k$ пористость определяется выражением m_1 , а при $\alpha > \alpha_k$ — выражением m_2 , поскольку при $\alpha > \alpha_k$ объем скелета меньше за счет дополнительных шаровых сегментов.

Таблица 2

Пористость

Структура	Аналитическое выражение	$m(0)$	$m(\alpha_*)$
ОЦ	$m_1 = 1 - \frac{\pi\sqrt{3}(1 - 2\alpha^2(3 - \alpha))}{8(1 - \alpha)^3}$	$1 - \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 0,3198$	$1 - \pi \left(\frac{3\sqrt{3}}{4} - 1 \right) \approx 0,0605$
	$m_2 = m_1 + \frac{3\pi\sqrt{3}\alpha_2^2(3 - \alpha_2)}{16(1 - \alpha)^3}$		$1 - \frac{\pi}{16} (14\sqrt{3} + 19 - 27\sqrt{2}) \approx 0,0055$
ГЦ	$1 - \frac{\pi(1 - 3\alpha^2(3 - \alpha))}{3\sqrt{2}(1 - \alpha)^3}$	$1 - \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,259$	$1 - \frac{\pi}{\sqrt{2}} \left(3 - \frac{40}{9\sqrt{3}} \right) \approx 0,0359$

Просветность. Отношение площади пор к общей площади сечения называется просветностью (поверхностной пористостью):

$$n = S_{II}/S = 1 - S_c/S, \quad (7)$$

где S , S_c , S_{II} — площади ячейки, скелета и пор соответственно. Площадь скелета в ячейке составляют окружности за вычетом площади их пересечений в виде круговых сегментов:

$$S_c = \sum_{i=1}^2 S_{ок,i} N_{ок,i} - \sum_{j=1}^4 S_{сг,j} N_{сг,j},$$

$$S_{ок,i} = \pi(\rho_i L/2)^2, \quad S_{сг,j} = (\rho_i L/2)^2 f(\varphi_j), \quad f(\varphi_j) = \varphi_j - 0,5 \sin(2\varphi_j). \quad (8)$$

Из рис. 2 определим безразмерные координаты особых точек, разделяющих поровое пространство на области с различными типами сечений, определяющими просветность. Для ОЦ структуры $z_1 = 2r/L$, $z_2 = BC$ из $\triangle ABC$ (рис. 2а), $z_3 = DE$ из $\triangle ADE$ (рис. 2б). Для ГЦ структуры координаты $z_1 = DE$ из $\triangle ADE$, $z_2 = GH$ из $\triangle FGH$, $z_3 = BC$ из $\triangle ABC$ (рис. 2в). Безразмерные радиусы окружностей ρ_i , возникающих в сечениях, и углы φ_j в круговых сегментах найдем из рис. 3 для ОЦ структуры, из рис. 4 — для ГЦ структуры. Обезразмеривание проведено на $L/2$ (половина стороны куба).

Объемноцентрированная структура. Координаты особых точек:

$$z_1 = \begin{cases} 1 - (\sqrt{3}/2)/(1 - \alpha), & \alpha < \alpha_K, \\ 0, & \alpha \geq \alpha_K; \end{cases}$$

$$z_2 = (\sqrt{3}/2)/(1 - \alpha) \sin \psi_1; \quad (9)$$

$$z_3 = \begin{cases} \sqrt{(3/4)/(1 - \alpha)^2 - 1}, & \alpha \geq \alpha_K, \\ 0, & \alpha < \alpha_K. \end{cases}$$

Безразмерные радиусы окружностей в сечениях:

$$\rho_1 = \begin{cases} \sqrt{(3/4)/(1 - \alpha)^2 - z^2}, & 0 \leq z < 1 - z_1, \\ 0, & 1 - z_1 \leq z \leq 1; \end{cases} \quad (10)$$

$$\rho_2 = \begin{cases} \sqrt{(3/4)/(1 - \alpha)^2 - (1 - z)^2}, & z_1 \leq z \leq 1, \\ 0, & 0 \leq z \leq z_1. \end{cases}$$

Косинусы углов, опирающихся на круговые сегменты в сечениях:

$$\cos \varphi_1 = \begin{cases} \frac{2 + \rho_1^2 - \rho_2^2}{2\sqrt{2}\rho_1}, & z_2 \leq z \leq 1 - z_2, \\ 0, & (z < z_2)(z > 1 - z_2); \end{cases} \quad \cos \varphi_2 = \begin{cases} \frac{2 + \rho_2^2 - \rho_1^2}{2\sqrt{2}\rho_2}, & z_2 < z \leq 1 - z_2, \\ 0, & (z < z_2)(z > 1 - z_2); \end{cases}$$

$$\cos \varphi_3 = \begin{cases} 1/\rho_1, & (\alpha_K \leq \alpha, \quad 0 \leq z < z_3), \\ 0, & (\alpha_K \leq \alpha, \quad z_3 \leq z \leq 1)(\alpha < \alpha_K); \end{cases} \quad (11)$$

$$\cos \varphi_4 = \begin{cases} 1/\rho_2, & (\alpha_K \leq \alpha, \quad 1 - z_3 < z \leq 1), \\ 0, & (\alpha_K \leq \alpha, \quad 0 \leq z \leq 1 - z_3)(\alpha < \alpha_K). \end{cases}$$

Гранецентрированная структура. Координаты особых точек:

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{1/(1-\alpha)^2 - 1/\sqrt{2}}; \\ z_2 &= 1 - (1/\sqrt{2})/(1-\alpha); \\ z_3 &= (1/\sqrt{2})/(1-\alpha) \sin \psi_2. \end{aligned} \tag{12}$$

Безразмерные радиусы окружностей в сечениях:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \begin{cases} \sqrt{0.5/(1-\alpha)^2 - z^2}, & z < 1 - z_2, \\ 0, & z \geq 1 - z_2; \end{cases} \\ \rho_2 &= \begin{cases} \sqrt{0.5/(1-\alpha)^2 - (1-z)^2}, & z > z_2, \\ 0, & z \leq z_2. \end{cases} \end{aligned} \tag{13}$$

Косинусы углов, опирающихся на круговые сегменты в сечениях:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \begin{cases} \frac{1 + \rho_1^2 - \rho_2^2}{2\rho_1}, & z_3 < z < 1 - z_3, \\ 0, & (z \leq z_3)(1 - z_3 \leq z); \end{cases} \quad \cos \varphi_2 = \begin{cases} \frac{1 + \rho_2^2 - \rho_1^2}{2\rho_2}, & z_3 < z < 1 - z_3, \\ 0, & (z \leq z_3)(1 - z_3 \leq z); \end{cases} \\ \cos \varphi_3 &= \begin{cases} 1 - \alpha, & 0 \leq z < z_1, \\ 0, & z_1 \leq z \leq 1; \end{cases} \quad \cos \varphi_4 = \begin{cases} 1 - \alpha, & 1 - z_1 < z \leq 1, \\ 0, & 0 \leq z \leq 1 - z_1. \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

Подставляя выражения (9-11) для ОЦ структуры и (12-14) для ГЦ структуры в (8), а затем (8) в (7), получим аналитическое выражение для просветности, приведенное в таблице 3.

Таблица 3

Просветность

Структура	Аналитическое выражение
ОЦ	$1 - \left(\rho_1^2 \left(\frac{\pi}{4} - f(\varphi_1) - f(\varphi_3) \right) + \rho_2^2 \left(\frac{\pi}{4} - f(\varphi_2) - f(\varphi_4) \right) \right)$
ГЦ	$1 - 2 \left(\rho_1^2 \left(\frac{\pi}{4} - f(\varphi_1) - f(\varphi_3) \right) + \rho_2^2 \left(\frac{\pi}{4} - f(\varphi_2) - f(\varphi_4) \right) \right)$

На рис. 5 приведены зависимости просветности от безразмерных параметров α и z в виде изолиний для рассмотренных структур. Из рисунка видно, что функция просветности симметрична относительно $z = 0,5$, при котором $\rho_1 = \rho_2$ (сечения на рис. 3в, и рис. 4г). При $\alpha < 0,1$ для ОЦ структуры и $\alpha < 0,05$ для ГЦ структуры сечение с минимальной просветностью имеет координату $z = 0,5$. При больших значениях параметра α координаты сечений с наименьшей просветностью расположены симметрично относительно $z = 0,5$ (показаны пунктиром).

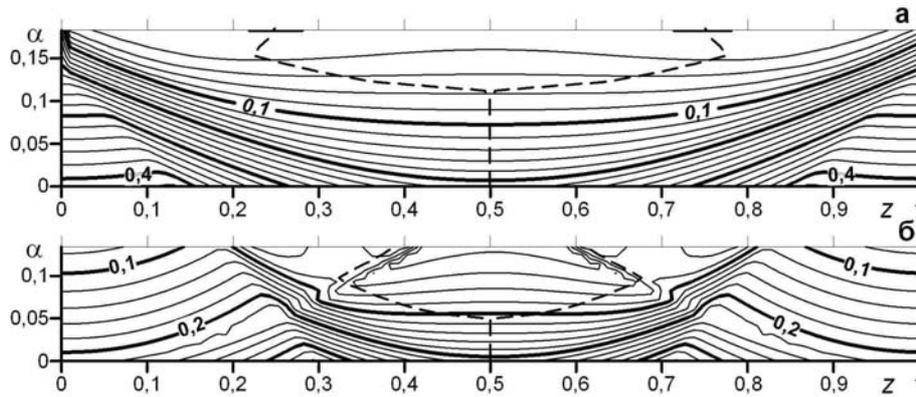


Рис. 5. Зависимость просветности от α и z в виде изолиний ОЦ (а) и ГЦ (б) структур

Проницаемость. Уравнение Дарси описывает фильтрацию в пористой среде:

$$u = \bar{v}m = \frac{k \Delta P}{\mu L}, \quad (15)$$

где u — скорость фильтрации; \bar{v} — средняя физическая скорость; k — проницаемость; μ — динамическая вязкость; ΔP — перепад давления; L — длина проницаемого участка.

В [7] показано, что при ламинарном течении в капилляре, сечение которого представляет собой равносторонний треугольник, средняя физическая скорость по сечению характеризуется выражением:

$$\bar{v} = \frac{a^2 \Delta P}{80 \mu L}, \quad (16)$$

где a — сторона треугольника.

Рассмотрим систему таких капилляров, суммарная площадь сечений которых равна минимальной площади просвета в рассмотренных структурах. Запишем условие эквивалентности:

$$n_{min}L^2 = N_{\Delta}a^2 \sqrt{3}/4, \quad (17)$$

где N_{Δ} — количество треугольных каналов, приходящихся на сечение площадью L^2 . Для ОЦ структуры $N_{\Delta} = 4$, для ГЦ структуры $N_{\Delta} = 8$. Положив в (15) $m = n_{min}$, с учетом (16) и (17) имеем для проницаемости среды:

$$k = \frac{L^2 n_{min}^2}{80 N_{\Delta}}. \quad (18)$$

На рис. 6 приведены зависимости пористости, минимальной просветности и проницаемости от безразмерного параметра α , а также проницаемости от пористости. При расчете проницаемости было принято $L = 10^{-5}$ м. Из рисунка

видно, что с увеличением α пористость, минимальная просветность и проницаемость уменьшаются монотонно, причем для ГЦ структуры пористость и проницаемость меньше, чем для ОЦ структуры на всем интервале рассматриваемых значений α . Вертикальные оси на рис. 6в и 6г логарифмические, что иллюстрирует резкое снижение проницаемости при больших значениях α (при минимальных значениях пористости). Подобное свойство модельных сред, образованных регулярными структурами и описанными в [6], подтверждается численным моделированием в [8]. Кроме того, эксперименты на песчаниках с низкой пористостью [9] и на сильно спеченных стеклянных гранулах [10] показывают резкое падение проницаемости вблизи значения пористости в несколько процентов. Это объясняется тем, что с увеличением α поры все слабее сообщаются друг с другом, а при $\alpha = \alpha_*$ становятся замкнутыми.

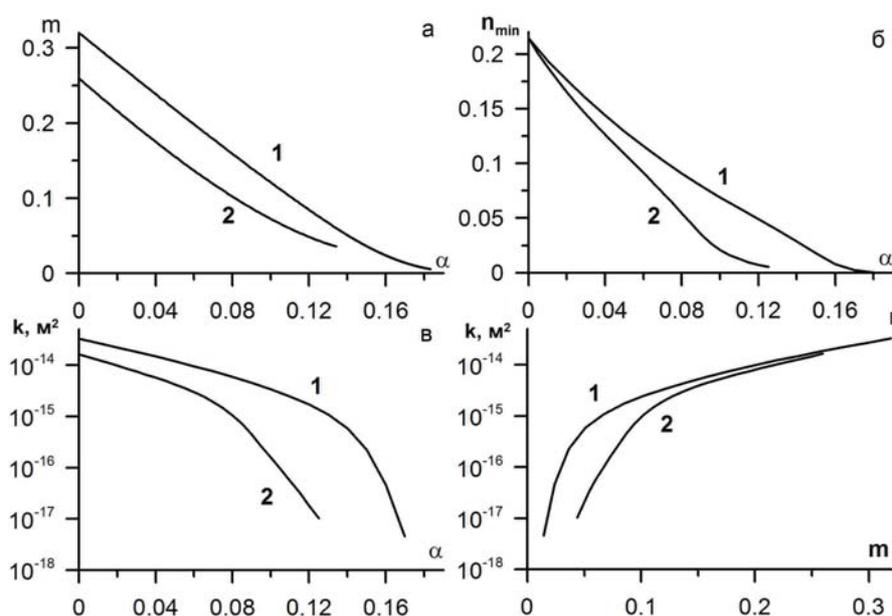


Рис. 6. Зависимость пористости (а), минимальной просветности (б) и проницаемости (в) от безразмерного параметра α и проницаемости от пористости (г) Линия 1 соответствует ОЦ структуре, линия 2 — ГЦ структуре

Выводы. Предложена модель пористой среды, образованной регулярными кубическими структурами с разветвляющимися каналами. Получены аналитические зависимости пористости и просветности от безразмерного модельного параметра α . Показано, что с помощью рассмотренных структур можно моделировать пористые среды в широком диапазоне пористости: $(0,6 \div 32,0)\%$ — для объемноцентрированной структуры и $(3,6 \div 26,0)\%$ — для гранецентрированной структуры. Получена аналитическая оценка для проницаемости, качественно согласующаяся с результатами экспериментов и численного моделирования, описанными в литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. Л.: Недра, 1985. 240 с.
2. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1947. С.11-24.
3. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. С. 29-33.
4. Швидлер М. И. Статистическая гидродинамика пористых сред. М.: Недра, 1985. 288 с.
5. Губайдуллин А. А., Максимов А. Ю. Моделирование динамики капли нефти в капилляре с сужением // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 7. С. 71-77.
6. Игошин Д. Е., Никонова О. А., Мостовой П. Я. Моделирование пористой среды регулярными упаковками пересекающихся сфер // Вестник Тюменского государственного университета. 2014. № 7. С. 34-42.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с., ил. (Классики отечественной науки).
8. Игошин Д. Е., Сабуров Р. С. Численное исследование зависимости проницаемости от пористости среды, образованной каналами регулярной структуры // Вестник Тюменского государственного университета: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. № 1. С. 84-90.
9. Bourbie T., Coussy O., Zinsner B. Acoistique des Milieux Poreux. Paris: Technip, 1986. Ch. 1.
10. Wong P. Z., Koplik J., Tomanic J. P. Phys. Rev. Ser. B. 1984. Vol. 30. P. 6606.
11. Guoyn E., Oger L, Fiona T. J. J. Phys. Ser. D. 1987. Vol. 20. P. 1637.

REFERENCES

1. Romm, E. S. Structural models of porous medium of earth materials. Saint-Petersburg: Nedra, 1985. 240 p.
2. Leybenzon, L. S. Nature flows through porous medium. Moscow, 1947. Pp.11-24.
3. Heyfets, L. I., Neymark, A. V. Multiphase processes in porous medium. Moscow: Himiya, 1982. Pp. 29-33.
4. Shvidler, M. I. Statistical hydromechanics of porous medium. Moscow: Nedra, 1985. 288 p.
5. Gubaydullin, A. A., Maximov, A. V. Modeling the oil droplet dynamics in the capillary with a constriction // Bulletin of the Tyumen State University. 2013. № 7. Pp.71-77.
6. Igoshin, D. E., Nikonova, O. A., Mostovoy, P. Y. Simulation of the porous medium regular packages intersecting spheres // Bulletin of the Tyumen State University. 2014. № 7. Pp. 34-42.
7. Loytsyanskiy, L. G. Fluid mechanics // Textbook for high schools. M.: Dropha, 2003. 803 Pp.
8. Igoshin, D. E., Saburov, R. S. Numerical research of permeability dependence of porosity in media formed by regular structure channels// Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, Gas, Energy. № 1(1). T. 1. 2015. Pp. 84-90.

9. Bourbie, T., Coussy, O., Zinszner, B. Acoistique des Milieux Poreux. Paris: Technip, 1986. Ch. 1.
10. Wong, P. Z., Koplik, J., Tomanic, J. P. Phys. Rev. Ser. B. 1984. Vol. 30. P. 6606.
11. Guoyn, E., Oger, L., Fiona, T. J. J. Phys. Ser. D. 1987. Vol. 20. P. 1637.

Авторы публикации

Игошин Дмитрий Евгеньевич — научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, доцент кафедры Механики многофазных систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, кандидат Физико-математических наук

Никонова Ольга Александровна — магистрант Физико-технического института Тюменского государственного университета

Authors of the publication

Dmitry E. Igoshin — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Tyumen Branch of the Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of Multiphase systems mechanics, Institute of Physics and Technical Science, Tyumen State University

Olga A. Nikonova — Master's degree student, Institute of Physics and Technical Science, Tyumen State University