

РАСЧЕТ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ РОМБОЭДРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

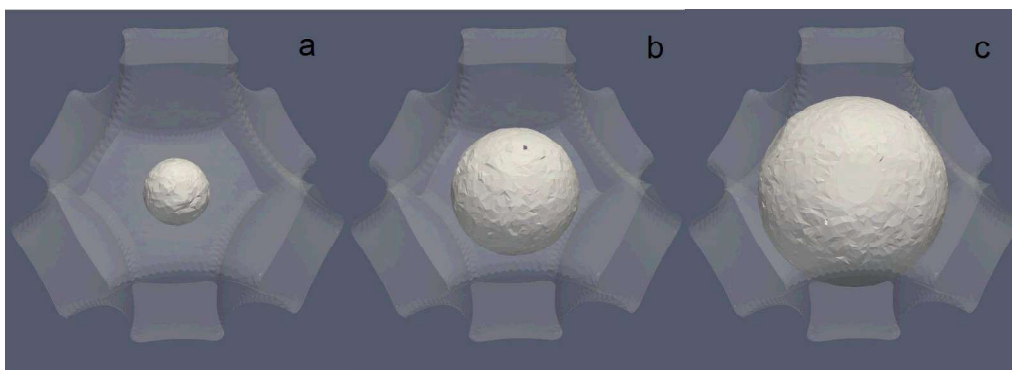
Д.Е. Игошин, А.С. Губкин, А.А. Губайдуллин

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, а/я 1507, г.Тюмень, Россия*

Моделирование пористых сред на основе периодических структур обладает рядом преимуществ по сравнению с другими подходами: достаточно рассчитать течение флюидов в масштабе одной поры, чтобы перенести осредненные характеристики этого течения на всю среду. Разумеется, элемент периодической структуры, должен обладать такой же пористостью, что и моделируемая среда и отражать ее структурные свойства (характерные размеры зерен, пор и горловин). В [1] описана периодическая пористая среда со скелетом из шаровых сегментов на основе ромбоэдрической системы решетки. Рассмотренная среда имеет три модельных параметра: ребро ромбоэдра L , острый угол θ на каждой грани, представляющей собой ромб (может меняться в диапазоне от 60° до 90°) и степень пересечения сфер α , определяющая форму шаровых сегментов (может меняться в диапазоне от 0 до $1-\cos(\theta/2)$). К рассмотренной структуре применен описанный в [2] обобщенный подход Козени для перехода от фиктивного грунта к идеальному грунту и получена оценка проницаемости с учетом извилистости каналов моделируемой среды. Вычисление проницаемости по результатам моделирования течения флюида в рассмотренной структуре проведено в [3]. Практически важной проблемой является определение относительных фазовых проницаемостей в указанной среде. Воспользуемся подходом, предложенным в [4] и развитым в [5], суть которого заключается в осреднении по времени объемных расходов фаз.

Рассмотрим двухфазное течение в пористой среде периодической структуры на основе ромбоэдрической системы решетки. На рисунке приведены начальные положения капель различного размера несмачивающей фазы (нефти в воде) в ромбоэдрической структуре со следующими параметрами $L=1\text{ мм}$, $\theta=90^\circ$, $\alpha=0,1$.

Гидродинамическое моделирование проведено методом VoF (Volume of Fluid) в открытом пакете OpenFOAM. Система уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости с каплями другой несмешивающейся с ней вязкой несжимаемой жидкости имеет вид [6]:



Начальные положения капель $r=100$ мкм (а), $r=200$ мкм (b), $r=300$ мкм (с), нефти в структуре. $L=1\text{ мм}$, $\theta=90^\circ$, $\alpha=0,1$.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u} = 0, \quad \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u} \otimes \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{u} + \vec{S}_{st}, \quad \vec{S}_{st} = \sigma_{st} k \vec{\nabla} \gamma, \quad k = \vec{\nabla} \cdot \vec{n},$$

$$\vec{n} = \frac{\vec{\nabla} \gamma}{|\vec{\nabla} \gamma|}, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \gamma = 0, \quad \rho = \gamma \rho_1 + (1 - \gamma) \rho_2, \quad \mu = \gamma \mu_1 + (1 - \gamma) \mu_2, \quad \rho_1, \rho_2 = const,$$

где γ — маркерная функция, принимающая значения от 0 до 1, причем 0 соответствует несущей фазе (воде), 1 — капле (нефти). При моделировании принимались граничные условия прилипания на стенках канала, периодические граничные условия на горловинах и заданный перепад давления Δp между верхней и нижней гранями.

После того, как двухфазное течение становилось квазипериодическим, в каждый момент времени рассчитывались объемные расходы обеих фаз через горловины, лежащие на нижней грани ромбоэдра:

$$Q_i = \iint_{S_i} \gamma_i u_n ds, \quad i = 1, 2.$$

Далее, найденные расходы осреднялись за время Δt , равное целому числу периодов такого движения

$$\langle Q_i \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} Q_i dt, \quad \Delta t = t_2 - t_1.$$

Сопоставляя указанные объемные расходы с расходами в случае однофазного течения Q_{0i} , находились относительные фазовые проницаемости при различных начальных объемных содержаниях фаз

$$k_i = \frac{\langle Q_i \rangle}{Q_{0i}}.$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-15119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Игошин Д.Е., Хромова Н.А.** Фильтрационно-емкостные свойства периодической пористой среды ромбоэдрической структуры со скелетом из шаровых сегментов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 3. С.107–127.
2. **Gubaidullin A.A., Igoshin D.E. and Ignatev P.A.** Calculation of the permeability of a porous medium of a periodic rhombohedral structure based on the generalized Kozeny method // AIP Conference Proceedings 1939 (2018), 020033.
3. **Igoshin D.E., Gubkin A.S., Ignatev P.A and Gubaidullin A.A** Permeability calculation in periodic porous medium based on rhombohedral structure // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012002.
4. **Игошин Д.Е.** Течение двухфазной жидкости в модельной пористой среде, образованной осесимметричными каналами переменного сечения // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Т. 4. № 4. С. 169-180.
5. **Gubkin A.S., Igoshin D.E., and Filimonova L.N.** Calculation of two-phase flow in micro-channels of variable section with account of compressibility of one phase // AIP Conference Proceedings 2125 (2019), 030111.
6. **Hirt C.W., Nichols B.D.** Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. V. 39. No. 1. P. 201–225.