

## РАСЧЕТ ПРОНИЦАЕМОСТИ 3D МОДЕЛИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ СЛУЧАЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

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

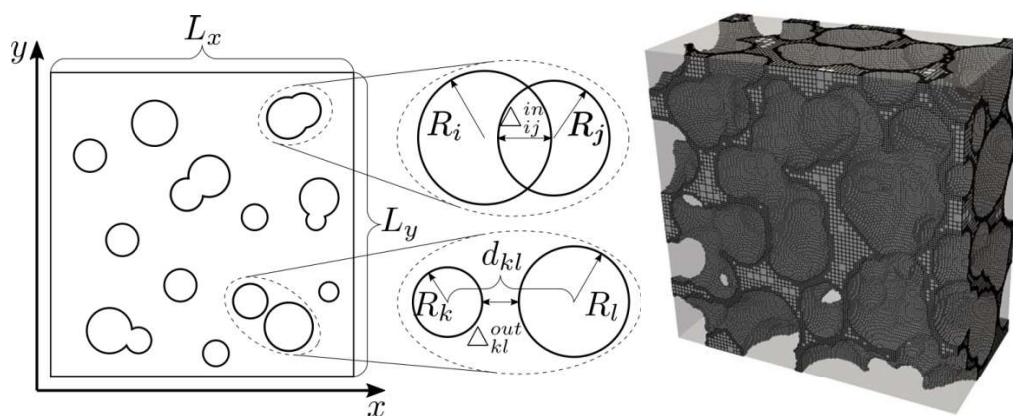
*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, а/я 1507, г.Тюмень, Россия*

При описании течения флюидов в пористой среде широкое распространение получили методы вычислительной гидродинамики, которые сводятся к интегрированию уравнений Навье–Стокса в поровом пространстве. Моделирование микронеоднородностей пористых сред с помощью случайно расположенных элементов позволяет воспроизвести основные измеряемые свойства пористых сред: пористость, проницаемость, гранулометрический состав. В [1] был предложен, а в [2] развит алгоритм построения двумерной модели пористой среды со случайными микронеоднородностями скелета в виде пересекающихся дисков. В данной работе рассмотрен трехмерный случай.

Обобщая указанный алгоритм на трехмерный случай, построен скелет пористой среды путем случайного расположения шаров в расчетной области в форме прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $L_x \times L_y \times L_z$ . Алгоритм построения скелета пористой среды включает в себя два безразмерных параметра модели:  $\delta_{in}$  и  $\delta_{out}$ , характеризующих значения минимального перекрытия пересекающихся шаров и минимального зазора между непоресекающимися шарами. Радиусы шаров принимают значения от  $R_{min}$  до  $R_{max}$ . Алгоритм случайно располагает  $i$ -й шар с соблюдением следующих условий:

$$\begin{cases} (R_i + R_j) - \delta_{ij} = \Delta_{ij}^{in} \geq \Delta_{ij}^{in} \geq 0, \\ \delta_{ij} - (R_i + R_j) = \Delta_{ij}^{out} \geq \Delta_{ij}^{out} \geq 0, \end{cases} \quad j \in [1, i-1].$$

Первое уравнение соответствует условию для пересекающихся шаров, второе — для непоресекающихся шаров.  $j$  — индекс, пробегающий номера всех ранее добавленных в расчетную область шаров. Геометрия порового пространства и расчетные сетки создаются в открытом пакете Salome. Процесс формирования пористой структуры проиллюстрирован на рисунке, где слева схематично показано расположение шаров в некотором сечении для фиксированного момента времени. Справа показана структура с расчетной сеткой. Процесс прекращается при достижении пористостью заданного значения  $m$ .



Расположение шаров в сечении расчетной области (слева) и структура с расчетной сеткой (справа)

В рассмотренной области было проведено гидродинамическое моделирование в пакете OpenFOAM. Система уравнений стационарного течения вязкой несжимаемой жидкости имела вид:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \otimes \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \Delta \vec{u} + \nu \Delta \vec{u}.$$

На поверхности скелета принималось граничное условие прилипания; на боковых, верхней и нижней гранях расчетной области – условие симметрии; между передней и задней гранями задавался перепад давления  $\Delta p$ .

По результатам расчетов определен объемный расход через переднюю грань. На основе уравнения Дарси

$$\frac{Q_z}{S_z} = \frac{k_z}{\mu} \frac{\Delta p}{L_z}, \quad S_z = L_x L_y$$

найдена проницаемость среды при заданных значениях модельных параметров и пористости

$$k_z = \frac{\mu L_x L_y Q_z}{L_z \Delta p}$$

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин А. С., Игошин Д. Е., Трапезников Д. В. Численный расчет проницаемости в двумерной пористой среде со скелетом из случайно расположенных пересекающихся дисков // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 4. С. 54–68.
2. Gubaidullin A. A., Gubkin A. S., Igoshin D. E. and Ignatev P. A. Permeability of model porous medium formed by random discs // AIP Conference Proceedings 1939 (2018), 020035.