

## Моделирование двухфазного течения в пористых средах с использованием трехмерной сетевой модели

**Б. Вамси, К. Шаббир, О. Извеков**

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Моделирование двухфазного течения в пористых средах имеет важное значение для оптимизации добычи пласта в нефтехимии и решения других экологических проблем. Континуальные модели, такие как закон Дарси, широко используются, но не способны объяснить неравновесные явления. Сетевые модели - это неkontинуальные модели, которые используются для лучшего понимания неравновесных явлений [1]. Мы модифицировали 2D (двумерную) сетевую модель [2] и смоделировали фильтрацию в 3D.

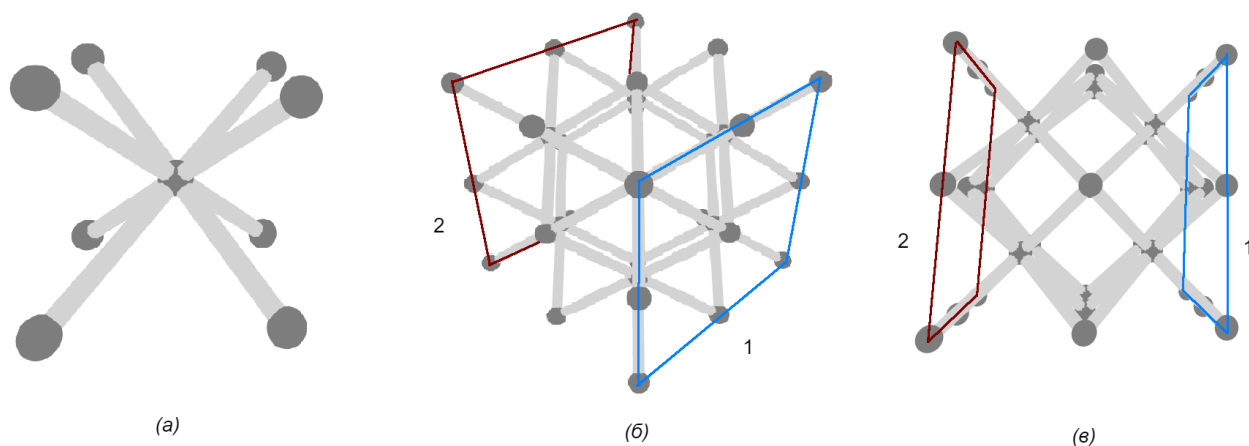


Рис. 1. Каждый узел нашей 3D-модели соединен с 8 другими узлами трубками (а). Изометрический вид (б). Вид модели сверху (в). 1 (синяя) передняя грань с высоким давлением, 2 (красная) задняя грань с низким давлением.

В нашей сетевой модели капиллярное пространство представлено трубками постоянного радиуса, а поры узлами. В узлах и трубках могут присутствовать жидкости двух типов, смачивающие и несмачивающие. В работе [3] в двумерной модели трубки наклонены под углом  $45^\circ$  по отношению к градиенту давления, поскольку это приводит к лучшему перемешиванию жидкостей, в нашей работе мы использовали тот же принцип. Мы использовали объемно-центрированную кубическую структуру (см. рис. 1а). Это приводит, во-первых, к тому, что все трубки имеют одинаковую длину. Во-вторых, все трубки расположены под равным углом к градиенту давления (см. рис. 1б), что обеспечивает лучшее перемешивание. В-третьих, 3D-модель геометрически неразличима по осям,  $x$ ,  $y$  и  $z$  (см. рис. 1в), что позволит нам в будущем моделировать другие сложные явления, и наши результаты будут одинаковыми по трем осям.

Моделируется двухфазная фильтрация в кубе, на передней грани поддерживается постоянное высокое давление (см. рис. 1б), а на задней грани постоянное низкое давление, остальные 4 грани непроницаемы. Первоначально трубки содержат несмачивающую жидкость, смачивающая жидкость вводится под высоким давлением через узлы передней грани, несмачивающая жидкость удаляется из узлов, расположенных на задней грани расчетного куба. Радиус каждой трубки был примерно одинаков, мы добавили небольшие случайные отклонения, такие что  $\Delta R/R \approx 0,1$ .

В нашей модели в трубках может быть максимум 2 мениска. Скорость потока в трубке, содержащей мениски, определяется модифицированной формой уравнения Пуазейля [4]:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu l} \left( \Delta P + \frac{2s\sigma}{R} \right) \quad (1)$$

где  $Q$  — скорость потока,  $R$  — радиус трубки,  $l$  — длина,  $\Delta P$  — разность давлений между двумя узлами,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $s$  — функция, которая может принимать значения  $\{-1, 0, 1\}$  в зависимости от количества имеющихся менисков и их ориентации.  $M$  — параметр средней вязкости:

$$M = \sum \mu_i \frac{l_i}{l}, \quad (2)$$

здесь  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости.

Составляется система линейных уравнений с давлением в качестве переменных, используя уравнение (1) для каждого узла. По вычисленным давлениям определяются расходы в каждой из трубок. Мы использовали новый метод [2] для распределения жидкости в узлах, который заключается в том, что когда смачивающая и несмачивающая жидкость поступают в узел одновременно, смачивающая жидкость распределяется первой по трубкам в порядке возрастания их радиусов. Расчет шел до тех пор, пока насыщение смачивающей жидкостью внутренней области не оставалось постоянным в течение нескольких шагов.

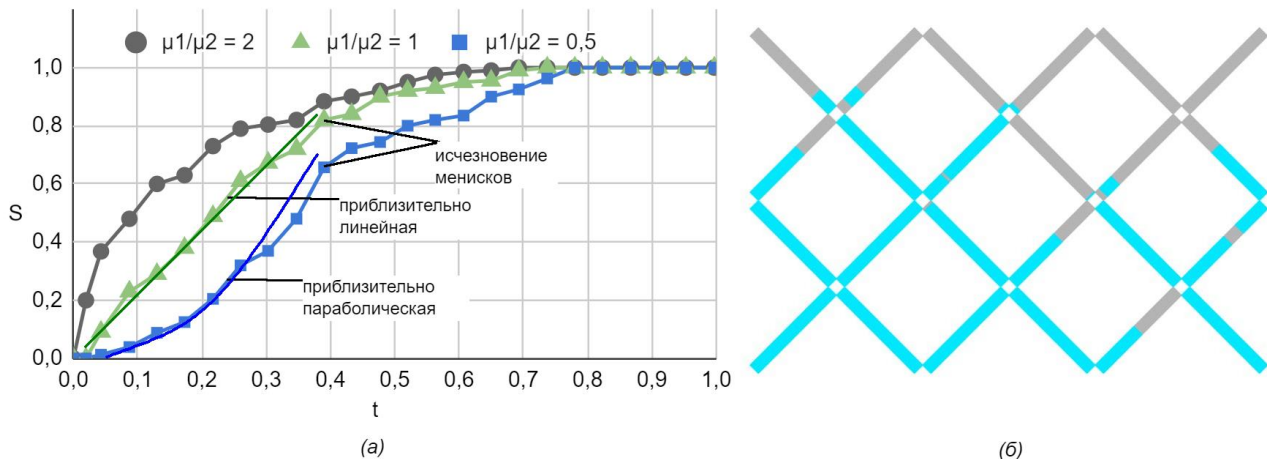


Рис. 2. Насыщение смачивающей жидкости в системе  $S$  в зависимости от времени  $t$  без учета размеров (а). Визуализация менисков на 3D-модели сверху (б).

Мы рассчитали насыщенность  $S(t)$  смачивающей жидкости в зависимости от времени для различных соотношений вязкости. По горизонтальной оси отложено время, нормированное на полное время расчета (см. рис. 2а). Когда вязкости жидкостей равны  $\mu_1/\mu_2 = 1$ , на начальном этапе вытеснения значение  $S$  линейно. Оно перестает быть линейным, когда часть менисков покидает систему через заднюю поверхность, устраняя эффект капиллярного давления. Когда мы закачиваем менее вязкую жидкость  $\mu_1/\mu_2 = 0.5$ , скорость потока изначально низкая и увеличивается по мере уменьшения среднего параметра вязкости  $M$ , что увеличивает скорость потока. При закачке более вязкой жидкости наблюдается обратное явление.

Мы приходим к выводу, что новый метод распределения жидкостей в узлах, предложенный в [2], корректно работает в 3D-модели. Также в [2] для решения набора линейных уравнений использовалось исключение Гаусса, и это серьезно ограничивало размер сетевой модели. Здесь мы использовали итерационные методы Якоби и получили более плавные графики, это связано с тем, что в 3D-модели было больше соединений в узлах и дополнительное измерение, куда могла попасть смачивающая жидкость.

Работа была поддержана грантом РФФИ №23-21-00175.

## Литература

1. Sinha S. [et al.]. Effective rheology of two-phase flow in three-dimensional porous media: experiment and simulation // Transp. Porous Media. 2017. V. 119. P. 77–94.
2. Shabbir K. Simulation of Two-Phase Flow in Porous Media using a Two-Dimensional Network Model // Труды 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 2023. Т. 78. С. 205–206.
3. Aker E. [et al.]. A two-dimensional network simulator for two-phase flow in porous media // Transp. Porous Media. 1998. V. 32. P. 163–186.
4. Washburn E. The dynamics of capillary flow // Physical review. 1921. V.17(3). P. 273.