

Моделирование двухфазного потока в пористой среде с использованием двумерной сетевой модели

К. Шаббир, О. Извеков, А. Конюхов

Московский физико-технический институт

Моделирование двухфазного течения в пористых средах имеет множество применений в нефтедобыче, гидрологии, производстве электроэнергии и т.д. Классические континуальные модели двухфазного течения предполагают, что проницаемость является функцией насыщенности. Классические континуальные модели неспособны объяснить неравновесные эффекты [1], связанные с быстрым изменением насыщенности или с конечным временем установления равновесной конфигурации флюидов поровом пространстве. Продвинутое моделирование сплошных сред, такие как модель Кондаурова [2], рассматривают проницаемость как функцию неравновесного параметра в дополнение к насыщенности. Для лучшего понимания неравновесных эффектов в рамках континуального подхода, полезно рассмотреть процессы движения жидкостей в масштабе пор. Сетевые модели позволяют приближенно моделировать многофазное движение в системе пересекающихся капилляров. В настоящей работе представлена сетевая модель, которая похожа на сетевую модель [3].

Однако в нашей модели используются цилиндрические трубки вместо трубок формы песочных часов, что позволяет нам выводить точные уравнения расхода [4]. В нашей модели также используется новый метод распределения различных фаз в узлах сети, когда преимущественно заполняются более тонкие капилляры. Мы смоделировали процесс пропитки, когда смачивающая жидкость изначально располагалась во внешней области, а несмачивающая жидкость - во внутренней области, как показано на рис. 1а. Внутренняя область содержит трубки разных радиусов в диапазоне от 2 до 5 м. В процессе расчета вычислялась зависимость насыщенности смачивающей фазы и среднее капиллярное давление от времени во внутренней области.

Среднее капиллярное давление определяется как:

$$P_c = \frac{\sum p_i S_i}{\sum S_i}, \quad (1)$$

где $S_i = \pi r_i^2$ — площадь мениска, r_i — радиус трубки, p_i — капиллярное давление, такое, что:

$$p_i = \frac{2\sigma}{r_i}, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, r_i — радиус трубки.

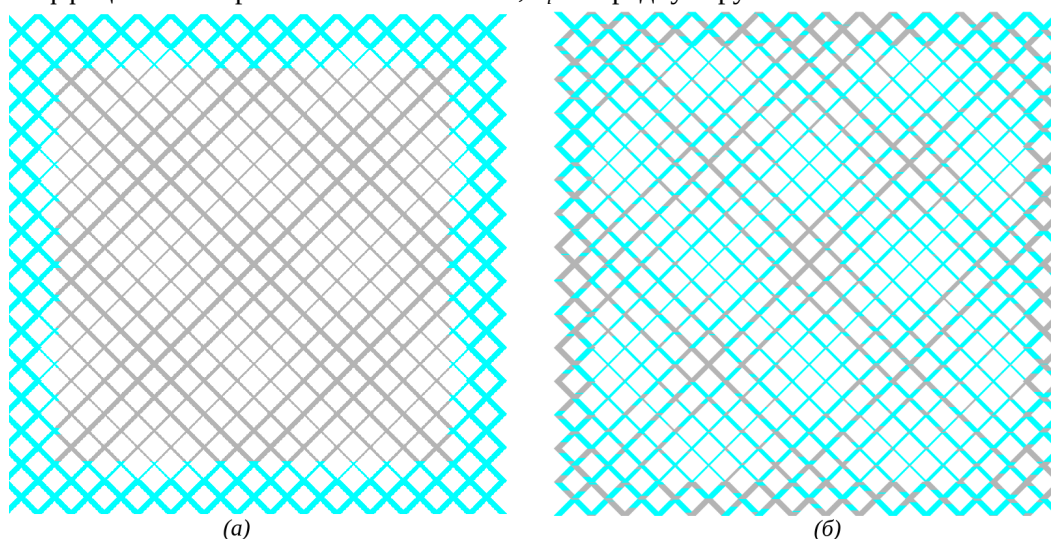


Рис. 1. Начальная конфигурация (а) жидкостей, при которой смачивающая жидкость расположена во внешней области. Поздняя стадия пропитки. Проникновение (б) смачивающей жидкости во внутренние области с меньшим радиусом трубок.

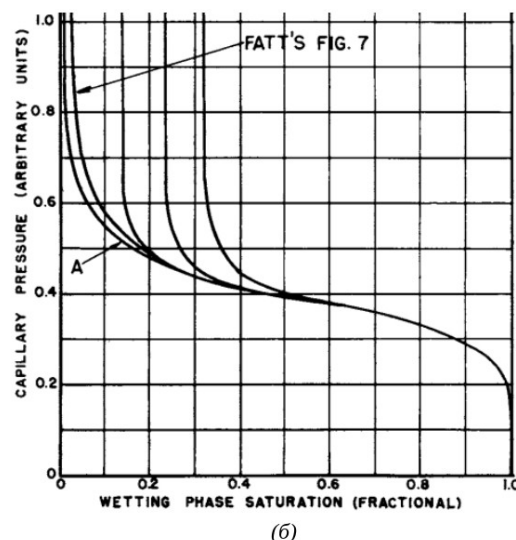
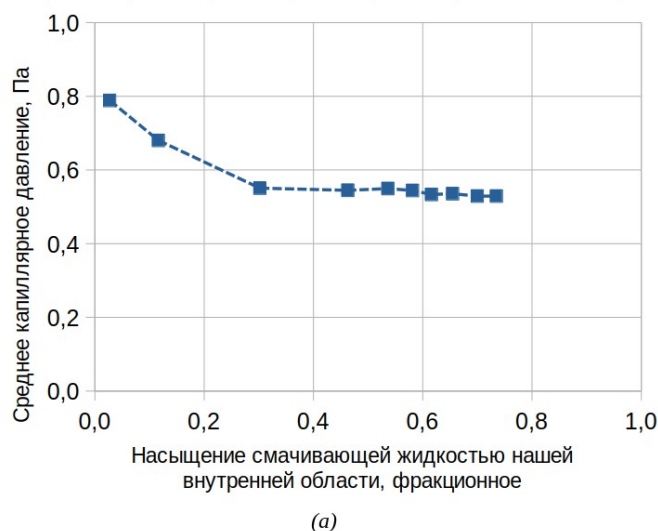


Рис. 2. Зависимости капиллярного давления от насыщенности смачивающей жидкости, результаты наших различных численных экспериментов (а), смоделировано (б) и экспериментально проверено [5].

Основные этапы расчета таковы: сначала мы определяем давление в каждом узле, решая систему линейных уравнений. Затем, исходя из известных давлений, мы вычисляем скорость потока. Наконец, мы выбираем подходящий временной шаг, распределяем жидкости в узлах и выполняем перемещение жидкостей в трубках. Новый метод заключается в том, что жидкости распределяются таким образом, что смачивающая жидкость сначала поступает в самые тонкие трубки. Наша сетевая модель показывает, что смачивающая жидкость со временем проникает в область более мелких пор (см. рис. 1б), при этом насыщенность стремится к равновесному значению. Кроме того, видно, что капиллярное давление увеличивается с уменьшением равновесной насыщенности.

В серии расчетов начальное насыщение смачивающей (голубой) жидкости в системе варьировалось, что приводило к различному конечному насыщению смачивающей жидкости во внутренней области. По мере уменьшения конечного насыщения среднее капиллярное давление увеличивается, поскольку мениски расположены в самых тонких трубках (рис. 2а). Полученная зависимость качественно аналогична капиллярной кривой А из классической литературы (рис. 2б) [5]. Конкретный вид капиллярной кривой существенно зависит от функции распределения капилляров по размерам.

Таким образом, сетевая модель с новым методом распределения жидкости в узлах в процессе расчета демонстрирует явления, постулированные в [2], то есть концентрирование смачивающей жидкости преимущественно в тонких капиллярах. Во-вторых, предложенное определение капиллярного давления в соответствии с уравнением (1) приводит к качественно правдоподобной кривой капиллярного давления.

Работа поддержана грантом РФФИ №23-21-00175.

Литература

1. Raoof A., Hassanizadeh S. A new method for generating pore-network models of porous media // Transp. Porous Media. 2010. V. 81. P. 391–407.
2. Кондауров В. И. Неравновесная модель пористой среды, насыщенной несмешивающимися жидкостями // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. №. 1. С. 121–142.
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. K. Shabbir. 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.
5. Fatt I. The network model of porous media III. Dynamic properties of networks with tube radius distribution // Petroleum Trans. AIME. 1956. V. 207. P. 164–181.