

5. Нукунов Д., Пунанова С.А., Агафонова З.Г. Металлы в нефтях, их концентрация и методы извлечения. М.: ГЕОС, 2001. 77 с.
6. Шустер В.Л., Пунанова С.А. Нетрадиционные трудноизвлекаемые ресурсы нефти и газа: проблемы освоения и экологии // Экспозиция Нефть Газ, 2018. № 3 (63). С. 14–18.
7. Пунанова С.А., Нукунов Д., Мухаметшин Р.З. К вопросу о металлоносных нефтях и возможности извлечения из них ванадия // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 2013. № 10. С. 55–59.
8. Мухаметшин Р.З., Нукунов Д., Пунанова С.А. Первоочередные объекты нетрадиционного углеводородного сырья на территории Татарстана и Казахстана // Геоинформатика. 2014. № 2 (50). С. 36–42.
9. Нукунов Д. Комплексное освоение трудноизвлекаемых запасов углеводородов: методы извлечения ванадия из нефтей Казахстана // Трудноизвлекаемые и нетрадиционные запасы углеводородов: опыт и прогнозы: Материалы Междунар. научн.-практич. конфер. Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2014. С. 304–307.
10. Нусупбекова Д.А., Нурмамбетов К.Э., Нурмамбетова Д.Э., Нукунов Д. Способ извлечения металлов из высоковязких нефтей. Пат. № 23169 от 20.09.2010. Республика Казахстан.
11. Нукунов Д., Рахматолла А.Ш. и др. Подвесная центрифуга непрерывного действия. Пат. № 1692 от 30.06.2016 г.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ ЛЕГКОЙ НЕФТИ ИЗ ЦИФРОВОГО КЕРНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СМАЧИВАНИЯ

Д.И. Петрова, Т.Р. Закиров, М.Г. Храмченков

*Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, DaIPetrova@kpfu.ru*

Введение

Двухфазное течение жидкостей в пористой среде имеет важное значение во многих инженерных и промышленных дисциплинах, таких как разработка нефтяных и газовых месторождений, повышение нефтеотдачи, подземная механика флюидов и многие другие [1]. Различные сочетания между межфазным натяжением, скоростью течения, углом смачивания, соотношением вязкостей между нагнетаемой и вытесненной жидкостью, а также неоднородностью и анизотропией пористой структуры способствуют различным механизмам вытеснения, таким как капиллярные пальцы (CF), вязкие пальцы (VF) и течение со стабильным фронтом (CD) [2].

Целью данной работы является исследование влияния краевого угла смачивания на распределение флюидов в цифровой модели керна с неоднородной пористой структурой. Основным инструментом исследования является численное моделирование. Вычислительные эксперименты проводятся при динамических режимах течения, т.е. различных числах капиллярности.

В данной работе угол смачивания $\theta < 90^\circ$ соответствует дренированию, а $\theta > 90^\circ$ – пропитке. Таким образом, переход от дренирования к пропитке происходит с увеличением краевого угла смачивания.

1. Методы исследования

1.1. Математическая модель

В данной работе для исследования двухфазного течения жидкости в масштабе поровых каналов используются решеточные уравнения Больцмана с применением MRT оператора столкновений и модель градиента цветового поля, позволяющая моделировать явления на границе раздела фаз. Ввиду ограниченности объемов рукописи, а также широкой освещенности используемых в работе математических моделей, читатель может подробно ознакомиться с ними с помощью литературных источников [3].

1.2. Параметры вычислительных экспериментов

Цифровая модель порового пространства была сгенерирована с использованием метода Монте-Карло, подробно описанного в [4]. Поровое пространство цифровой модели, показанное на рис. 1, является изотропным и состоящим из гранул разного размера, форма которых близка к округлой. Размер области течения составляет 900 ячеек по оси ОХ и 450 ячеек по оси ОУ. Шаг сетки равен 5 мкм. Пористость образца 0,65, абсолютная проницаемость 65,2 мкм².

Для численного описания неоднородности пористой структуры используется коэффициент беспорядочности,

вычисляемый по следующей формуле:
$$H = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(\varphi_i^\alpha - \varphi)^2}{N-1}}$$
 [5] (φ – пористость образца, φ_i^α – локальная пористость, вычисленная в i -ой ячейке, N – количество ячеек для измерения локальной пористости).

Неоднородность рассматриваемой цифровой модели составляет 0,086, что, согласно [4], указывает на среднюю гетерогенность порового пространства.

В начальный момент времени область течения целиком заполнена вытесняемой жидкостью, например,

нефтью. Входная и выходная границы области течения соприкасаются со слоями толщиной 10 и 5 ячеек, соответственно, полностью заполненными нагнетаемой и вытесняемой жидкостями, соответственно (рис. 1). Нагнетаемая жидкость подается на входную границу области при известной и постоянной скорости $u_x = u_0$. На выходной границе устанавливается постоянное давление. Отбор обеих жидкостей проводится через выходную границу.касательная ко входной и выходной границам компонента скорости u_y равна нулю. Внешние границы считаются непроницаемыми.

Вычислительные эксперименты проводятся при контактных углах смачивания θ , варьирующихся в пределах от 30° до 150° . Увеличение угла смачивания обозначает переход между дренированием и пропиткой. Соотношение вязкостей между нагнетаемой и вытесняемой жидкостями составляет $1/10$, что, к примеру, соответствует вытеснению легкой нефти водой. Динамические условия течения создаются различными соотношениями между скоростью течения u_0 и межфазным натяжением σ . Значение $\log_{10} Ca$ варьируется в пределах от -5.5 до -2.9 , что соответствует режимам течения как с преобладанием капиллярных, так и вязких сил.

2. Результаты исследования

Перед представлением основных результатов, число капиллярности должно быть поставлено в соответствие соотношению между капиллярными и вязкими силами, оцененными при различных углах смачивания (рис. 2). На данном графике ΔP_{visc} было измерено при отсутствии капиллярных эффектов, т.е. когда межфазное натяжение равно 0 (черные кривые). ΔP_{cap} , которое включает в себя действие капиллярных сил, измерено как разница между общим детектируемым давлением $\Delta P_{detected}$ и действием вязких сил трения по следующей формуле:

$$\Delta P_{cap} = \Delta P_{detected} - \Delta P_{visc}$$

Как видно по кривым на рис. 2, по мере увеличения возрастает соотношение между вязкой силой трения и капиллярным сопротивлением, что, конечно, ожидается в соответствии с определением числа Ca . Кроме того, с увеличением краевого угла смачивания, определяющего переход от дренирования к пропитке, обнаруживается уменьшение среднего перепада давления, что подтверждается экспериментами [6]. Чувствительность давления к изменениям краевого угла смачивания более выражена при малых числах капиллярности, когда капиллярные силы являются доминирующими.

Как показано на рис. 2а для $\log_{10} Ca = -5.4$, соотношение $\Delta P_{visc} / \Delta P_{cap} (\theta = 30^\circ) \approx 1 / 15$ т.е. вязкие силы пренебрежимо малы. Данный режим течения может считаться квазистационарным. Для $-5 < \log_{10} Ca < -4.6$ (рис. 2b и 2c), капиллярные силы продолжают доминировать, однако доля вязких сил увеличивается: $\Delta P_{visc} / \Delta P_{cap} (\theta = 30^\circ) \approx [1 / 4 \div 1 / 2]$. Дальнейшее увеличение числа капиллярности способствует превалированию вязких сил трения (рис. 2 d).

На рис.3 показано распределение жидкостей в момент времени, предшествующий прорыву. Как известно [7, 8], механика вытеснения при различных углах смачивания зависит от трех механизмов – «касания и перекрытия», «взрывы» и вязкая диссипация. В данной работе выделено четыре переходных зоны между режимами CD, CF и VF.

1. При пренебрежении вязкими силами $\Delta P_{visc} \ll \Delta P_{cap}$ ($\log_{10} Ca \leq -5$). В данном режиме, в зависимости

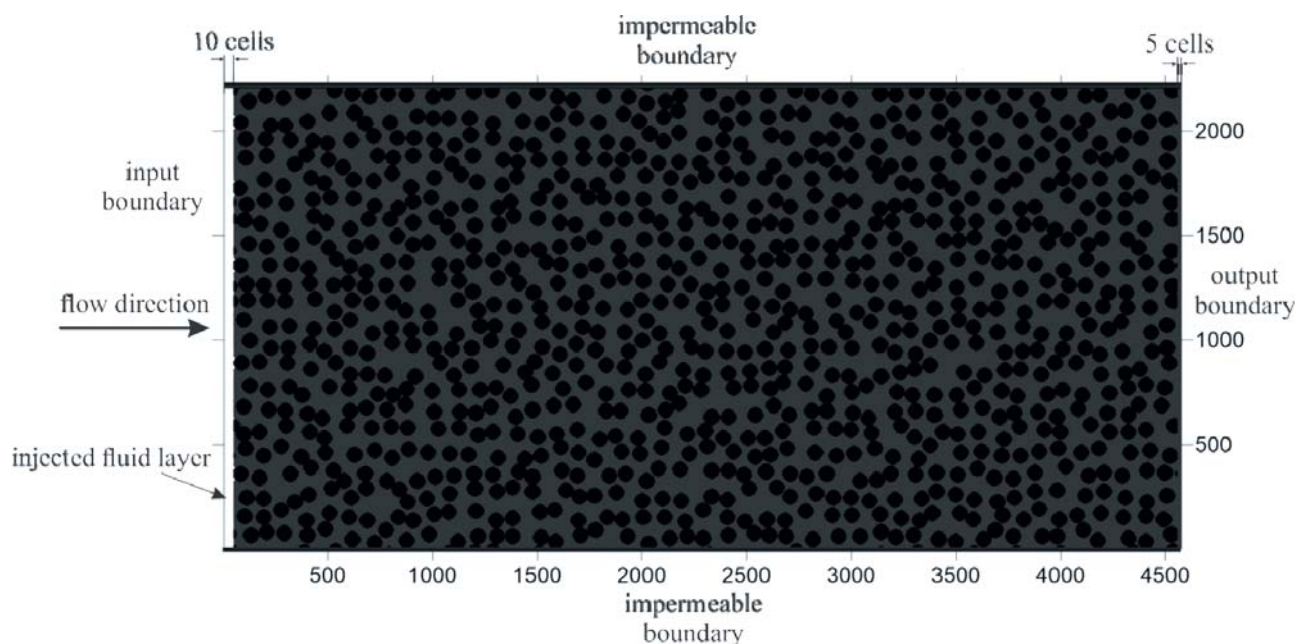


Рис. 1. Цифровая модель пористой структуры. Черным цветом обозначены твердые частицы, серым – поровое пространство, занятое вытесняемой жидкостью в начальный момент времени.

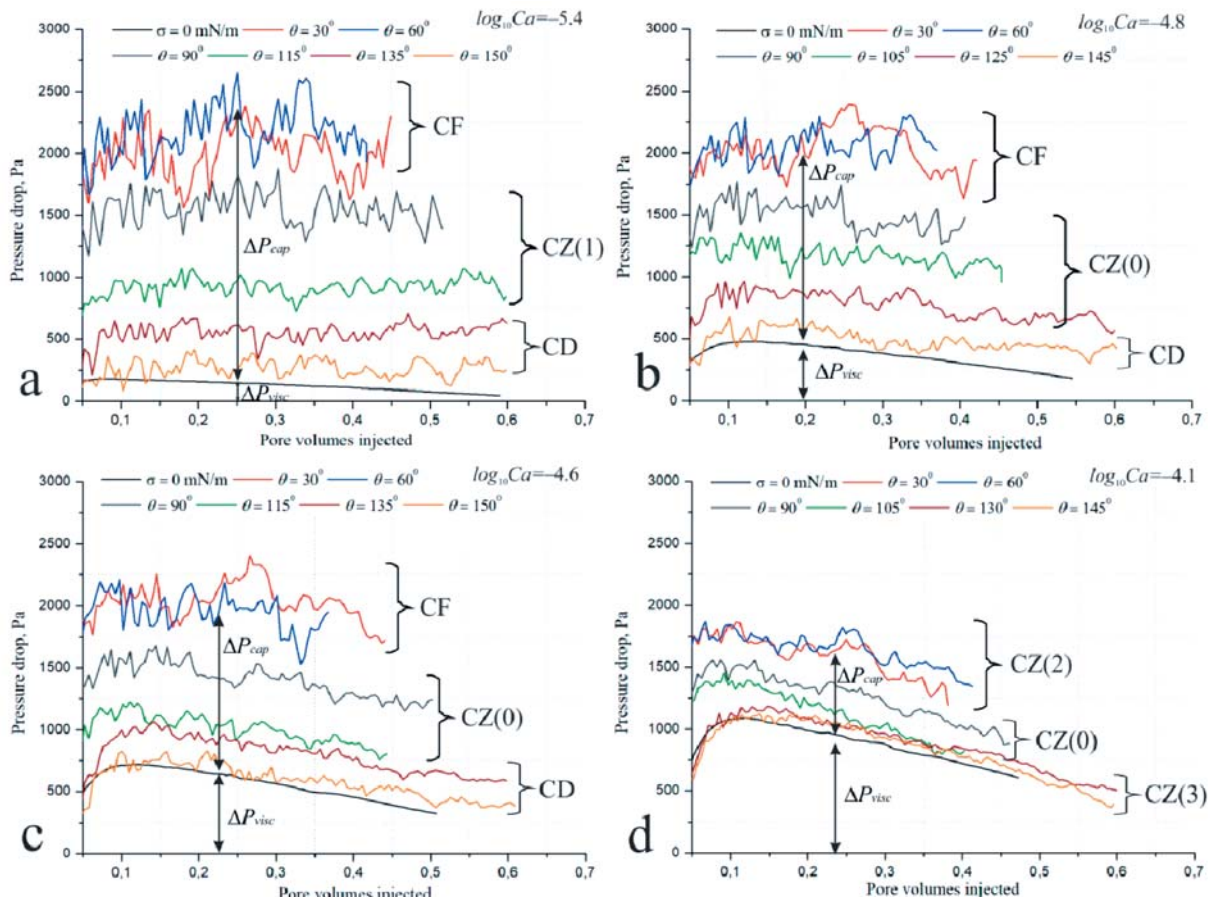


Рис. 2. Динамика перепада давления при различных углах смачивания и числах капиллярности.

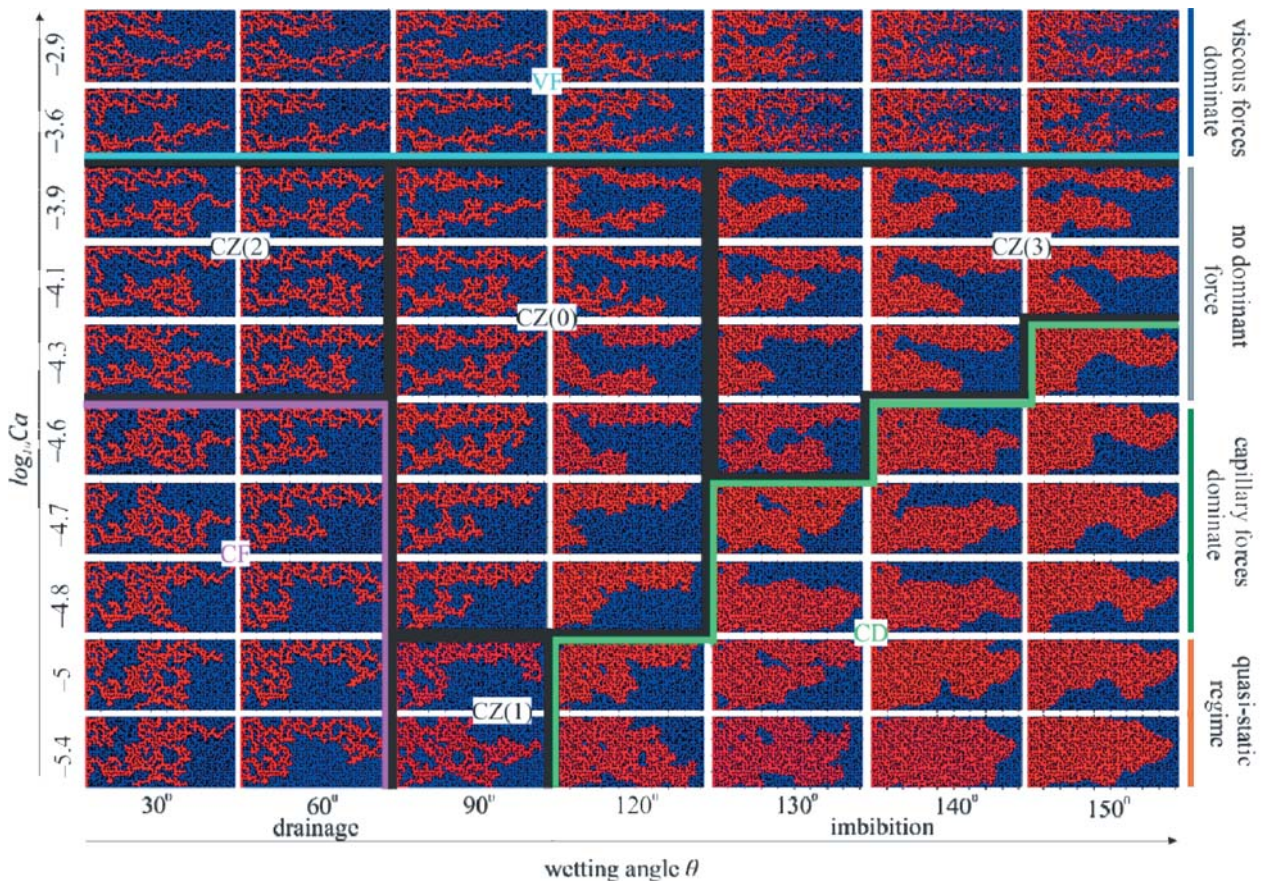


Рис. 3. Распределение жидкостей в цифровом ядре при различных числах капиллярности и краевых углах смачивания.

от угла смачивания, обнаружены CF и CD (рис. 3). Переход между CF и CD происходит при отсутствии доминирования стабилизирующих фронт «касаний и перекрытий» и дестабилизирующих «взрывов». Данный режим обозначен как CZ (1) на рис. 3.

2. При $\theta < 70^\circ$ «касаний и перекрытий» практически отсутствуют. В данном случае режим течения определяется балансом между дестабилизирующими фронт вязкими силами диссипации и капиллярным давлением «взрывов». Если один из механизмов доминирует, наблюдаются VF или CF. Переход между VF или CF обозначен как CZ (2) на рис. 3.

3. При $\theta > 120^\circ$, доля явлений «взрыва» является незначительной. В зависимости от соотношения между капиллярными и вязкими силами, механика вытеснения соответствует VF или CD. Переход между VF и CD обозначен как CZ (3) на рис. 3.

4. В диапазоне $-4,7 < \log_{10} Ca < -3,9$, величина вязких и капиллярных сил одного порядка. Для $70^\circ < \theta < 120^\circ$ частоты «касаний и перекрытий», «взрывов» и вязкой диссипации являются величинами одного порядка. При данных параметрах мы имеем дело с наиболее сложной переходной зоной (CZ(0) на рис. 3), в которой все дестабилизирующие и стабилизирующие фронт явления соревнуются друг с другом.

Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ №20-35-80003, а также счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 075-00216-20-05 от 04.06.2020 (часть II, раздел I)).

Выводы

В данной работе представлены численные результаты исследования влияния краевого эффекта смачивания на распределение жидкостей в цифровой модели зерна с неоднородной пористой структурой. Представлена фазовая диаграмма распределения жидкостей в координатах число капиллярности – угол смачивания. В зависимости от баланса между стабилизирующими и дестабилизирующими межфазный фронт эффектами было выделено четыре переходных режима течения.

Литература

1. Bakhshian, S., Hosseini, S. A., Shokri, N., 2019. Pore-scale characteristics of multiphase flow in heterogeneous porous media using the lattice Boltzmann method. *Scientific Reports*, 9(1), 3377. DOI: 10.1038/s41598-019-39741-x.
2. Trojer, M., Szulczewski, M. L., Juanes, R., 2015. Stabilizing fluid-fluid displacements in porous media through wettability alteration. *Physical Review Applied*, 3(5), 054008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.3.054008>.
3. Huang, H., Huang, J.-J., Lu, X.-Y., 2014. Study of immiscible displacements in porous media using a color-gradient-based multiphase lattice Boltzmann method. *Computers & Fluids*, 93, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.01.025>.
4. Zakirov, T. R., Khranchenkov, M. G., 2020b. Prediction of permeability and tortuosity in heterogeneous porous media using a disorder parameter. *Chemical Engineering Science*, 227, 115893. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115893>.
5. Laubie, H., Monfared, S., Radjan, F., Pellenq, R., Ulm, F.-J., 2017. Disorder-induced stiffness degradation of highly disordered porous materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 106, 207–228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2017.05.008>.
6. Primkulov, B. K., Pahlavan, A. A., Fu, X. J., Zhao, B.Z., MacMinn, C.W., Juanes, R., 2019. Signatures of fluid–fluid displacement in porous media: Wettability, patterns and pressures. *Journal of Fluid Mechanics*, 875, R4. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.554>.
7. Cieplak, M., Robbins, M.O., 1988. Dynamical transition in quasi–static fluid invasion in porous–media. *Physical Review Letters*, 60(20), 2042–2045. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.2042>.
8. Cieplak, M., Robbins, M.O., 1990. Influence of contact–angle on quasi–static fluid invasion of porous–media. *Physical Review B*, 41(16), 11508–11521. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.11508>.