

03.5

Карта режимов течения вода–нефть в прямом микроканале© М.И. Пряжников^{1,2}, А.В. Минаков^{1,2}, А.И. Пряжников¹, А.С. Якимов¹¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: mpryazhnikov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 21 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 13 октября 2021 г.

Принято к публикации 15 октября 2021 г.

Изучены режимы течения воды и сырой нефти в микроканале Y-типа в широком диапазоне расходов. Выявлены четыре различных типа режимов течения вода–нефть: снарядный, капельный, параллельный и хаотический. Определены диапазоны существования этих режимов течения. Установлены зависимости длины снарядов и капель воды в нефти от различных параметров. Построены карты соответствующих режимов течения вода–нефть.

Ключевые слова: Y-микроканал, течение жидкость–жидкость, несмешивающиеся жидкости, карта режимов течения.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51973.19030

Течения несмешивающихся жидкостей имеют широкое распространение в природе и технике. Особенно важна роль исследования режимов течения несмешивающихся жидкостей имеет в задачах вытеснения нефти при заводнении пласта. Известно, что многие методы увеличения нефтеотдачи основаны на управлении режимами течения нефти и вытесняющих жидкостей. Увеличение нефтеотдачи из микропористой среды зависит от структуры течения в поровом пространстве. В свою очередь структура потока, возникающая в микропористой среде, зависит от нескольких параметров: геометрии (характерного размера и типа соединений микроканалов пористой среды), физических свойств нефти и вытесняющей жидкости для улучшения нефтеотдачи.

Несмотря на сравнительно большое число работ [1,2], посвященных изучению течений нефти в микропористых средах, систематических данных об имеющихся режимах течения в них все еще недостаточно. Число факторов, влияющих на режимы течения при нефтеотдаче, столь велико, что необходимо их дальнейшее изучение. В связи с этим целью настоящей работы является систематическое изучение режимов течений воды и нефти в прямом микроканале, имитирующем пору. Для этих целей использовалась микрофлюидная технология, которая в последнее время широко применяется для изучения течений при вытеснении нефти из пористой среды [3,4].

Исследование проведено на микрофлюидном чипе с микроканалом Y-типа (рис. 1, а). Чип был изготовлен из полиметилметакрилата методом фрезерования и термоспекания. Ширина w и высота h микроканала составляли 500 и 200 μm , длина — 20 mm, длина и ширина входных участков — 5 mm и 250 μm (см. схему на рис. 1, б). В работе использовались дистиллированная вода и легкая маловязкая нефть ($825 \pm 3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $8.5 \pm 0.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$). Межфазное натяжение, измеренное тензиометром, на

границе вода–нефть составляло $22.5 \pm 0.1 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ [5]. Равновесное значение краевого угла смачивания было равно $124 \pm 2^\circ$. Нефть и вода закачивались в микрофлюидный чип с помощью шприцевых насосов, позволяющих задавать расход с относительной погрешностью 0.5%. Микроканал располагался горизонтально на предметном столике микроскопа. Входы микроканала соединялись со шприцами (Hamilton) трубками из полипропилена с внутренним диаметром 1.2 mm. Задавался объемный расход жидкостей Q . Картина течения жидкостей фиксировалась высокоскоростной камерой. Для описания режимов течения использовались традиционные параметры. Число Рейнольдса отвечает за отношение сил инерции к вязкостным силам: $Re = \frac{\rho U D}{\mu}$, где ρ — плотность жидкости, U — характерная скорость, D — гидравлический диаметр канала, равный 286 μm , μ — динамическая вязкость жидкости. Число Вебера характеризует баланс между силами инерции и поверхностного натяжения: $We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma}$, σ — поверхностное натяжение. Капиллярное число устанавливает отношение между силами вязкости и поверхностного натяжения: $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$. Еще одним критерием подобия является число Онезорге, равное отношению вязкостных сил к силам поверхностного натяжения: $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}}$. Эксперименты проводились в широком диапазоне расходов жидкостей и чисел подобия. Диапазоны критериев подобия представлены в таблице.

В результате исследования были установлены четыре различных типа режимов течения вода–нефть в Y-микроканале: снарядный, капельный, параллельный и хаотический. Типичные изображения этих режимов показаны на рис. 2. Снарядный режим течения наблюдается при малых расходах воды и нефти. Во всех экспериментах в этом режиме формируются снаряды воды. Нефть является несущей средой, так как она лучше

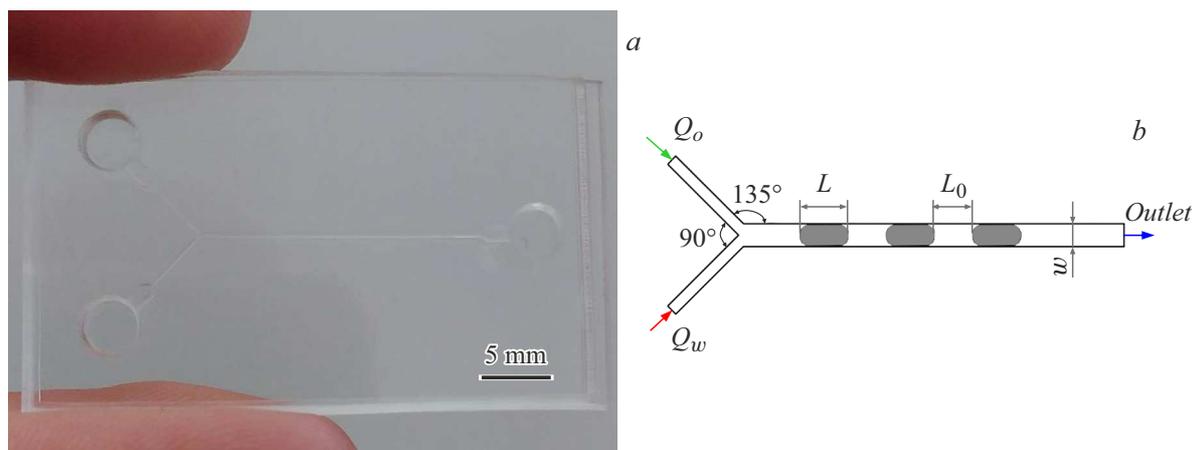


Рис. 1. Фотография микрофлюидного чипа с микроканалом Y-типа (a) и его схема (b).

Диапазоны экспериментальных параметров

Параметр	Вода	Сырая нефть
Q , ml/h	$2.5 \cdot 10^{-2} < Q_w < 6.6 \cdot 10^2$	$10^{-1} < Q_o < 55$
Re	$2.2 \cdot 10^{-2} < Re_w < 5.8 \cdot 10^2$	$7.7 \cdot 10^{-3} < Re_o < 4.2$
We	$6.1 \cdot 10^{-8} < We_w < 43$	$9.5 \cdot 10^{-8} < We_o < 2.8 \cdot 10^{-2}$
Oh	$1.12 \cdot 10^{-2}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$
Ca	$2.8 \cdot 10^{-6} < Ca_w < 7.3 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-4} < Ca_o < 5.7 \cdot 10^{-2}$

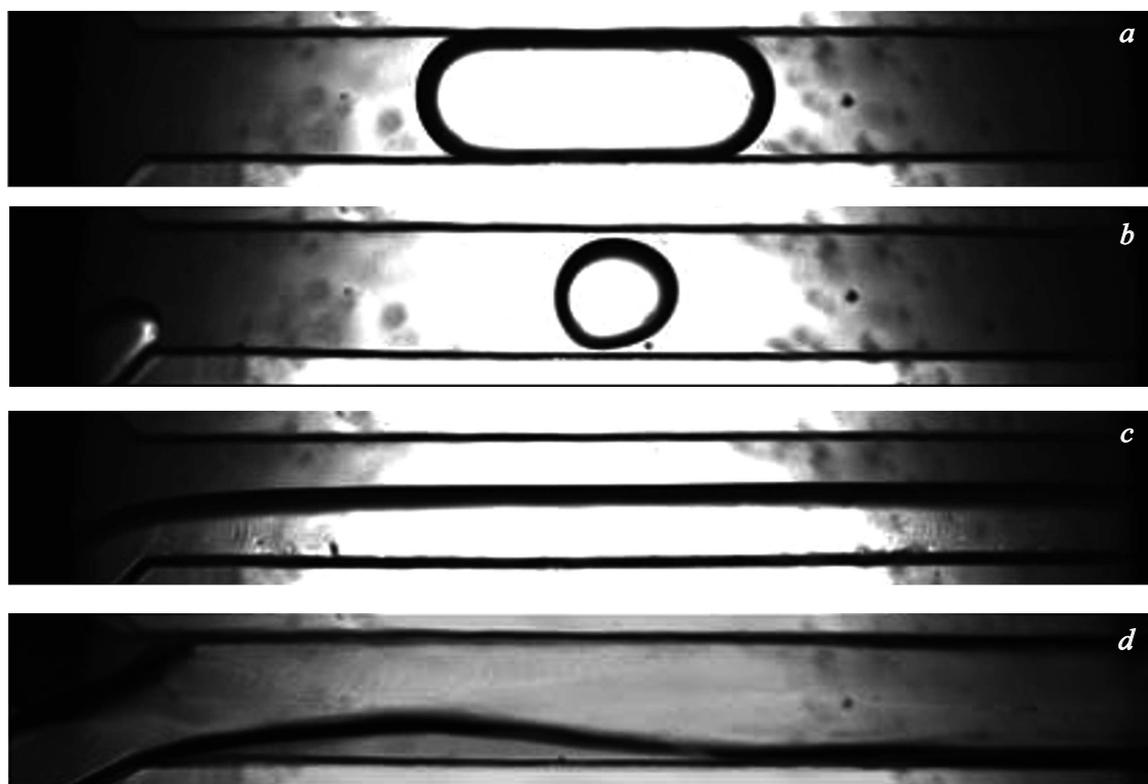


Рис. 2. Наблюдаемые режимы течения: a — снарядный, b — капельный, c — параллельный, d — хаотический.

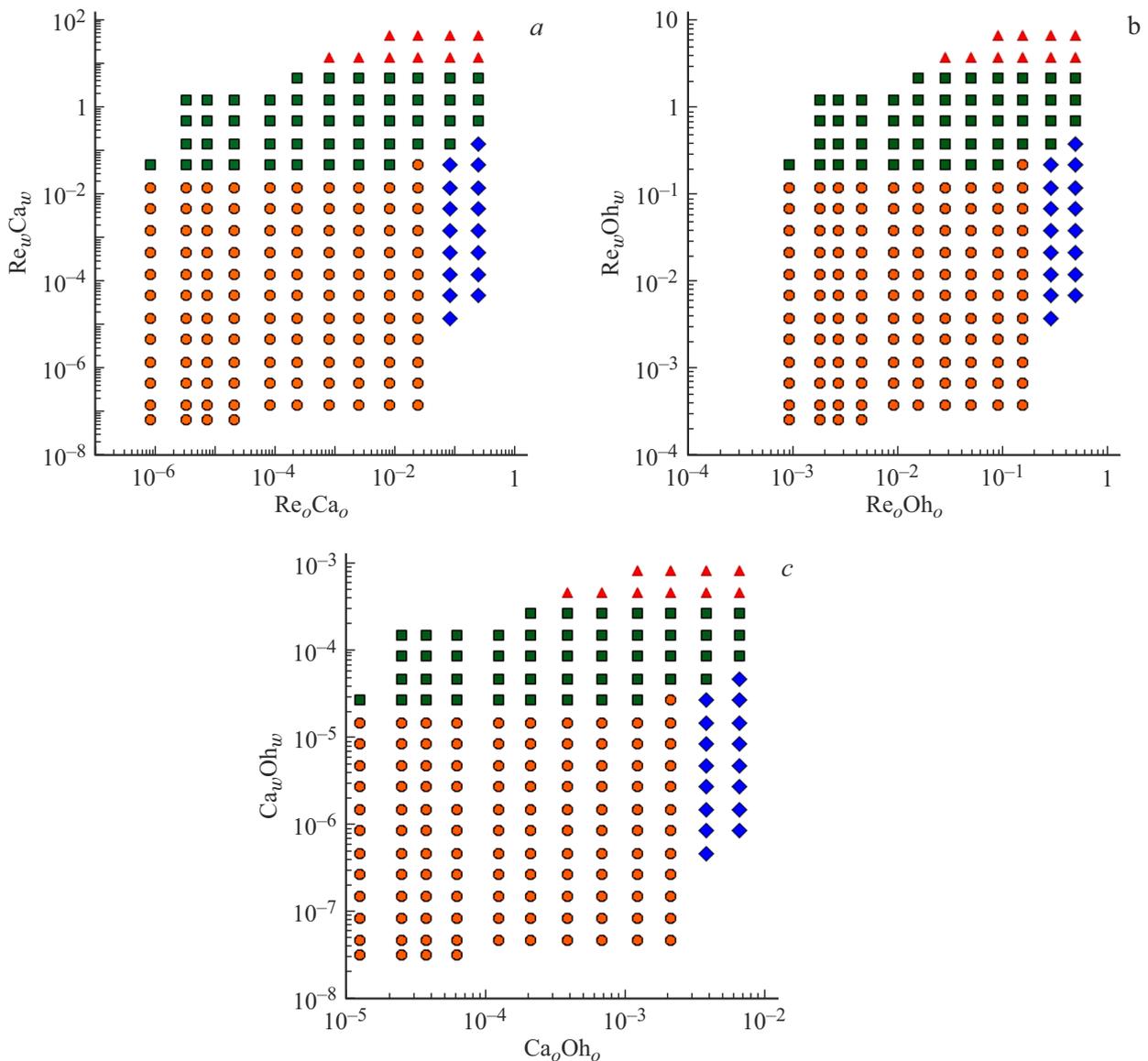


Рис. 3. Карта режимов течения вода–нефть в координатах комбинированных чисел $ReCa$ (а), $ReOh$ (b) и $CaOh$ (c). Квадрат — параллельный режим, кружок — снарядный режим, ромб — капельный режим, треугольник — хаотический режим.

смачивает стенки канала. Вода выступает в качестве дисперсной фазы. Разделение дисперсной фазы на снаряды определяется межфазным натяжением. Снаряд воды занимает почти все поперечное сечение микроканала с очень тонкой пленкой нефти между снарядом воды и стенкой микроканала. При постоянном расходе воды (дисперсной фазы) наблюдалось уменьшение длины снаряда при увеличении расхода нефти. Такая же тенденция имела место при постоянном расходе нефти, но при уменьшении расхода воды.

В результате анализа экспериментальных данных была получена следующая корреляция, описывающая длину снарядов L :

$$\frac{L}{D} = \varepsilon + k \left(\frac{Q_d}{Q_c} \right)^\alpha \left(\frac{1}{Ca_c} \right)^\beta, \quad (1)$$

где $\varepsilon = 1.72$, $k = 1.45$, $\alpha = 0.525$, $\beta = 0.138$ — параметры корреляции, определенные методом наименьших квадратов; индекс d соответствует дисперсной фазе, индекс c — несущей фазе.

Дальнейшее увеличение расхода нефти приводило к переходу в капельный режим течения. В этом режиме размер капель воды меньше размера микроканала (рис. 2, b). Он реализуется при высоких расходах нефти и низких расходах воды. Дробление воды на капли связано с большим влиянием сил инерции, которые возникают при высоких расходах нефти. Для капельного режима, так же как и для снарядного режима течения, безразмерная длина капля хорошо описывается корреляцией (1). Параметры корреляции (1) для капельного режима течения следующие: $\varepsilon = 1.17$, $k = 0.0926$, $\alpha = 0.412$, $\beta = 0.936$.

При более высоких расходах воды и нефти сила инерции преобладает над силой межфазного натяжения, и жидкости текут параллельно друг другу без образования снарядов или капель. Реализуется так называемый параллельный режим течения, представленный на рис. 2, с. Эксперименты показывают, что положение границы раздела между нефтью и водой внутри микроканала смещается по мере изменения расходов воды и нефти.

При дальнейшем увеличении расхода воды происходит переход от параллельного режима течения к хаотическому (рис. 2, d), который реализуется при очень высоких расходах воды и нефти. При больших скоростях нефти и воды в результате действия центробежных сил формируется неоднородное течение. В этом режиме потоки воды и нефти переворачиваются в канале смешения, а затем текут в параллельном режиме вдоль противоположных стенок. Аналогичное поведение наблюдалось при однофазном течении жидкости в микроканале *T*-типа. Систематические исследования однофазного течения в *T*-микроканале при высоких числах Рейнольдса можно найти в [6]. В результате развития вторичного течения Дина образуется пара симметричных подковообразных вихрей, которые затухают в микроканале, причем каждый из этих вихрей находится внутри одной и той же жидкости (вода или нефть). Начиная с числа Рейнольдса, равного примерно 145, пара подковообразных вихрей разворачивается под углом 30° к центральной продольной плоскости микроканала, что приводит к затуханию одного из вихрей и усилению другого. Подобная ситуация наблюдается и в данном случае. Потоки нефти и воды в канале смешения также переворачиваются.

В работе проведено экспериментальное исследование течения вода–нефть в микроканале *Y*-типа. Получена карта режимов течения жидкостей. Установлено четыре различных типа режимов течения: параллельный, капельный, снарядный и хаотический. Построена карта режимов течения вода–нефть в координатах комбинированных чисел Рейнольдса, Онезорге и капиллярного числа (рис. 3). В настоящий момент нет единого мнения о том, относительно каких параметров следует строить карты режимов течений для двухфазных потоков в микроканалах. Во многих (обычно более ранних) работах для характеристики режимов течения использовались скорости или расходы фаз [7,8]. Также распространено использование для классификации режимов числа Рейнольдса [8]. В работе [9] карта режимов течения построена относительно числа Вебера. Часто для описания режимов течения используются комбинации чисел в различных степенях. В настоящей работе для описания режимов течения воспользуемся комбинированными числами: Рейнольдса и капиллярного числа (рис. 3, a), Рейнольдса и Онезорге (рис. 3, b), капиллярного числа и числа Онезорге (рис. 3, c). Эти параметры наиболее удобны для использования в задачах увеличения нефтеотдачи.

Таким образом, с помощью микрофлюидного эксперимента изучены режимы течения вода–нефть в прямом микроканале, имитирующем пору. Определены диапазоны существования этих режимов течения. Установлены зависимости длины снарядов и капель воды в нефти от соотношения расходов воды и нефти, а также от капиллярного числа, рассчитанного по несущей фазе. Построены карты соответствующих режимов течения вода–нефть. Эти данные будут полезны при разработке методов увеличения нефтеотдачи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования (Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук).

Финансирование работы

Исследование проведено в рамках государственного задания Сибирскому федеральному университету (номер FSRZ-2020-0012).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Perazzo, G. Tomaiuolo, V. Preziosi, S. Guido, *Adv. Coll. Interface Sci.*, **256**, 305 (2018). DOI: 10.1016/j.cis.2018.03.002
- [2] J. Foroozesh, S. Kumar, *J. Mol. Liq.*, **316**, 113876 (2020). DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113876
- [3] M. Saadat, J. Yang, M. Dudek, G. Øye, P.A. Tsai, *J. Pet. Sci. Eng.*, **203**, 108647 (2021). DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108647
- [4] X. Zhao, Y. Feng, G. Liao, W. Liu, *J. Coll. Interface Sci.*, **578**, 629 (2020). DOI: 10.1016/j.jcis.2020.06.019
- [5] А.В. Минаков, М.И. Пряжников, Я.Н. Сулемана, В.Д. Мешкова, *Письма в ЖТФ*, **46** (24), 30 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.24.50425.18520 [A.V. Minakov, M.I. Pryazhnikov, Y.N. Suleymana, V.D. Meshkova, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (12), 1238 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020120238].
- [6] A.S. Lobasov, A.V. Minakov, *Chem. Eng. Process. — Process Intensif.*, **124**, 11 (2018). DOI: 10.1016/j.cep.2017.11.004
- [7] I. Mudawar, *J. Electron. Packag. Trans. ASME*, **133** (4), 041002 (2011). DOI: 10.1115/1.4005300
- [8] H. Foroughi, M. Kawaji, *Int. J. Multiphase Flow.*, **37** (9), 1147 (2011). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.06.004
- [9] Y. Zhao, G. Chen, Q. Yuan, *AIChE J.*, **52** (12), 4052 (2006). DOI: 10.1002/aic.11029