

УДК 532.546

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ТОНКИХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

В. В. Кадет, П. С. Корюзлов

Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, 117485 Москва  
E-mail: korjuzlov.pavel@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных исследований течения двух несмешивающихся жидкостей в тонком щелевом канале под действием внешнего электрического поля. Проведено сравнение результатов численных расчетов и экспериментов по определению зависимости положения границы раздела фаз от времени. Показано, что используемая модель качественно адекватно описывает электроосмотическое течение в тонких щелевых каналах шириной не менее 20 мкм.

**Ключевые слова:** электроосмотическое течение, двойной электрический слой, тонкие щелевые каналы.

Использование технологий электровоздействия в различных отраслях добывающей промышленности (подземное выщелачивание металлов, нефтедобыча, водообеспечение) требует детального исследования течения жидкостей-электролитов в пористых средах. При этом следует учитывать, что при уменьшении размеров поровых каналов до масштаба микропор (порядка 10 мкм) на течение жидкости существенное влияние начинает оказывать межфазное взаимодействие. Результаты ряда экспериментальных исследований течения в микроканалах позволяют сделать вывод о том, что двойной электрический слой оказывает значительное влияние на распределение поля скоростей и эффективную вязкость жидкости. С целью изучения электроосмотического течения в микроканалах проведена серия экспериментов с использованием высокоскоростной фотосъемки [2]. Аналогичные исследования, позволившие получить визуальное представление об электроосмотическом течении в микроканалах, выполнены для случая пересечения каналов [3] и для случая цилиндрического канала с неоднородно распределенным поверхностным зарядом в области двойного электрического слоя [4]. В результате экспериментов по изучению течения разбавленных растворов электролитов в прямоугольных микроканалах [5] выявлены значения коэффициента гидравлического сопротивления, аномально высокие по сравнению со значениями, получаемыми для каналов большого радиуса, в которых электрокинетические эффекты пренебрежимо малы. Эти данные послужили основой для теоретического моделирования однофазного электроосмотического течения в пористой среде [6]. В работах [7–9] предложены модели двухфазного электроосмотического течения. Однако соответствующие экспериментальные исследования, в частности для случая течения в тонком щелевом канале, до последнего времени не проводились.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по определению положения границы раздела фаз при течении двух несмешивающихся жидкостей в тонком щелевом канале и проведено их сравнение с результатами расчетов в рамках модели [1], обобщенной на случай двухфазного течения.

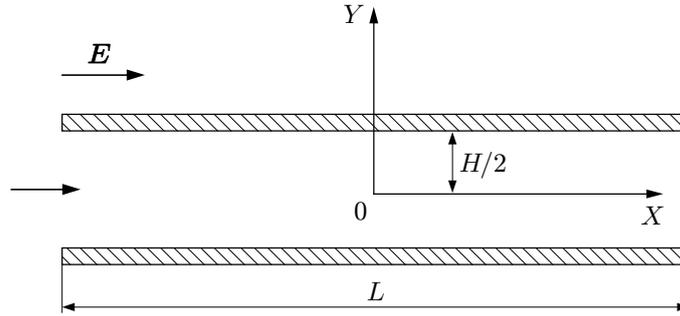


Рис. 1. Схема расположения щелевого канала:

стрелки — направление течения и направление вектора напряженности электрического поля

Рассмотрим щелевой канал длиной  $L$  и шириной  $H$ , наполненный жидкостями с различными электрокинетическими свойствами (рис. 1).

С использованием результатов [1] выполним расчет зависимости скорости движения границы раздела фаз от времени при двухфазном вытеснении жидкости в тонком щелевом канале под действием внешнего электрического поля. В этом случае уравнение движения можно записать в виде

$$\frac{d^2 U_i}{dy^2} = \frac{1}{\mu_i} \left( \frac{dp}{dx} - \rho_i F_{xi}(y) \right), \quad (1)$$

где индекс  $i \equiv l, r$  соответствует жидкости справа и слева от мениска. При этом течение полагается неразрывным, а жидкость несжимаемой.

Взаимодействие каждой жидкости с поверхностью характеризуется дзета-потенциалом, распределение которого можно вычислить с использованием уравнения

$$\frac{d^2 \Psi}{d\bar{y}^2} = \text{sh } \Psi(\bar{y}),$$

где  $\bar{y} = \kappa y$ ;  $1/\kappa$  — толщина диффузной части двойного электрического слоя, или параметр Дебая — Хюккеля.

Уравнение (1) проинтегрируем дважды по всей толщине раскрытия канала и с использованием условия неразрывности потока приравняем полученные выражения для скоростей справа и слева от границы раздела фаз. В результате получаем

$$x_f = \frac{x_f(A - B) + BL}{\mu_r L + x_f(\mu_l - \mu_r)}, \quad (2)$$

где

$$A = 4 \int_0^H \int_0^H \rho_l F_{xl}(y) dy dy; \quad B = 4 \int_0^H \int_0^H \rho_r F_{xr}(y) dy dy;$$

$x_f$  — положение границы раздела фаз;  $\mu_l, \mu_r$  — вязкости жидкостей слева и справа от границы раздела соответственно;  $\rho_l, \rho_r$  — плотности жидкостей;  $F_{xl}(y), F_{xr}(y)$  — действующие на объемные заряды массовые силы, которые могут быть определены из уравнения Пуассона — Больцмана [10].

Для верификации результатов расчетов с использованием соотношения (2) проведен цикл экспериментов по определению зависимости положения границы раздела фаз от времени. Схема использовавшейся экспериментальной установки приведена на рис. 2. Установка представляет собой разборный гидродинамический канал, между двумя торцевыми частями которого помещается щелевой канал  $L$ , состоящий из налагаемых друг на друга

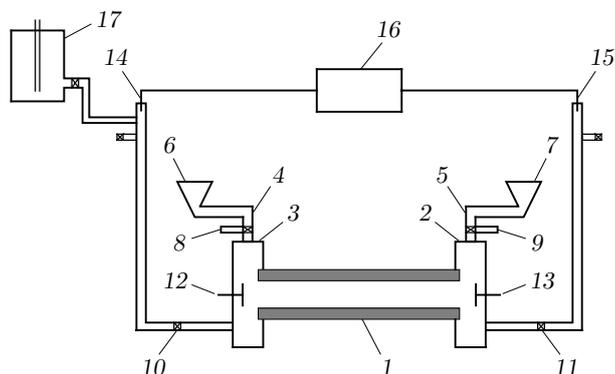


Рис. 2. Схема установки для исследования электроосмотического течения в тонких щелях:

1 — щелевой канал, 2, 3 — торцы щелевого канала, 4, 5 — отводы, 6, 7 — измерительные каналы, 8–11 — краны, 12–15 — электроды, 16 — источник постоянного напряжения, 17 — сосуд Прандтля

определенным образом пластин из стекла. Для того чтобы предотвратить утечку жидкости в местах соединения, торцы 2, 3 щелевого канала зажимаются с помощью резиновой обоймы, закрепляющейся зажимными болтами, расположенными по периметру этих торцов. Для снятия показаний объемного расхода жидкости при электроосмотическом течении к гидродинамическому каналу с помощью отводов 4, 5 подсоединены измерительные каналы 6, 7. Для облегчения процесса заполнения установки фильтрующей жидкостью и ее опораживания служат краны 8–11. Электроды 12, 13 используются для подачи напряжения или для измерения разности потенциалов, в случае если напряжение подается через электроды 14, 15. Источник постоянного напряжения 16 создает необходимую для возбуждения электроосмотического течения разность потенциалов. Сосуд Прандтля 17 используется для промывки и заполнения щелевого канала соответствующим раствором.

Прозрачная стенка щелевого канала позволяет непосредственно следить за продвижением границы раздела между вытесняющей и вытесняемой жидкостями в процессе их совместного течения и проводить соответствующие измерения.

В эксперименте использовались водные растворы NaCl, концентрации которых (0,010, 0,005, 0,001 моль/л) соответствуют средним и большим значениям дзета-потенциала. Предварительно в канале большей ширины ( $H = 100$  мкм) определялись дзета-потенциалы для материала, из которого изготавливались стенки щелевого канала. В качестве вытесняемой жидкости использовалось минеральное масло с вязкостью  $14 \cdot 10^{-3}$  Па·с при температуре  $20$  °С. Затем в различные моменты времени и при различных значениях напряженности поля, дзета-потенциалов вытесняющих растворов и ширины каналов определялось положение границы раздела двух фаз  $x_f$ . Координата границы  $x_f$  вычислялась путем осреднения ее минимального и максимального значений в данный момент времени.

На рис. 3 приведены зависимости положения фронта раздела фаз от времени при различных значениях напряженности поля.

На рис. 4 приведена зависимость положения границы раздела фаз от времени при различных значениях дзета-потенциала вытесняющего раствора (напряженность поля  $E = 75$  В/см, ширина канала  $H = 50$  мкм).

Заметим, что нарушение гладкости границы существенно увеличивается с увеличением дзета-потенциала.

Расчет для канала шириной  $H = 10$  мкм при дзета-потенциале  $\Psi = 97$  мВ дает заниженное почти в 1,5 раза по сравнению с наблюдаемым значение скорости движения границы раздела фаз. Это можно объяснить тем, что при малой ширине канала влияние

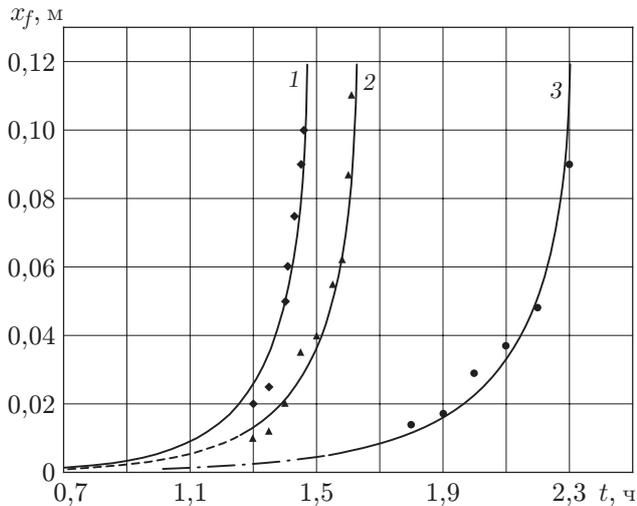


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость  $x_f(t)$  при различных значениях напряженности электрического поля ( $H = 50$  мкм,  $\Psi = 97$  мВ):

линии — расчет, точки — эксперимент; 1 —  $E = 83$  В/см, 2 —  $E = 75$  В/см, 3 —  $E = 53$  В/см

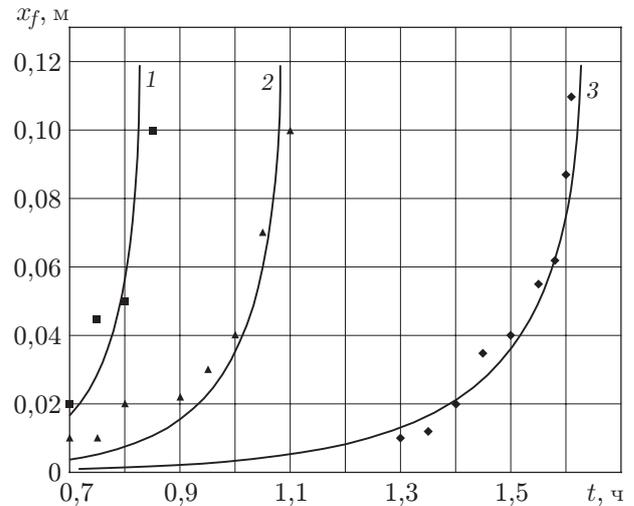


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость  $x_f(t)$  при различных значениях дзета-потенциала ( $E = 75$  В/см,  $H = 50$  мкм):

линии — расчет, точки — эксперимент; 1 —  $\Psi = 110$  мВ, 2 —  $\Psi = 93$  мВ, 3 —  $\Psi = 87$  мВ

его поверхностной проводимости значительно увеличивается. Так как в рассматриваемой модели данное явление не учитывается, то возможным вариантом корректировки модели является предварительное определение эффективного дзета-потенциала для канала такой ширины. При сравнительно большой ширине канала ( $H = 100$  мкм) отличие рассчитанной скорости от измеренной составило 9 %.

**Выводы.** Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что при ширине щелевого канала  $H > 20$  мкм модель [1], обобщенная на случай двухфазного течения, адекватно описывает процесс вытеснения в тонких каналах при двухфазном электроосмотическом течении жидкости для средних и больших значений дзета-потенциала.

Предложенная методика позволяет с достаточной точностью проводить анализ влияния напряженности внешнего электрического поля и концентрации вытесняющего раствора электролита (дзета-потенциала) на зависимость скорости движения фронта вытеснения от времени для двухфазного течения в тонкой щели. Однако при ширине канала  $H \leq 20$  мкм погрешность расчетов увеличивается, достигая 50 %, поэтому необходимо введение поправки на поверхностную проводимость канала. Эта поправка может быть получена в результате дополнительного измерения эффективного дзета-потенциала для данной ширины канала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Patankar N. A., Hu H. H. Numerical simulation of electroosmotic flow // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 1870–1881.
2. Garguilo M. G., Molho J. I., Santiago J. G., et al. Electroosmotic capillary flow with nonuniform zeta potential // Anal. Chem. 2000. V. 72. P. 1053–1057.

3. **Cummings E. B., Griffiths S. K., Nilson R. H.** Irrotationality of uniform electroosmosis // Proc. of the 2nd SPIE conf. "Microfluidic devices and systems". Santa Clara (CA, USA), 20 Sept. 1999. Santa Clara: SPIE, 1999. P. 180–189.
4. **Molho J. M., Herr A. E., Desphande M., et al.** Fluid transport mechanisms in micro fluidic devices // Proc. of the ASME Intern. mech. engng congress and exposition, Anaheim (California, USA), Nov. 15–20, 1998. N. Y.: ASME Books, 1998. P. 69–76.
5. **Bianchi F., Ferrigno R.** Finite element simulation of an electroosmotic-driven flow division at a T-junction of microscale dimensions // Anal. Chem. 2000. V. 72. P. 1987–1993.
6. **Kang Y., Yang Ch., Huang X. J.** Electroosmotic flow in fine grained porous media // J. Micromech. Microengng. 2004. N 14. P. 1249–1257.
7. **Jacky S., Lee H., Dongqing Li.** Electroosmotic flow at a liquid-air interface // Microfluidics Nanofluidics. 2006. V. 2, N 4. P. 361–365.
8. **Shulin Zeng, Chuan-Hua Chen, Juan G. Santiago, et al.** Fréchet electroosmotic flow pumps with polymer frits // Sensors Actuators B: Chem. 2002. V. 82, iss. 2/3. P. 209–212.
9. **Brask A., Goranović G., Jensen M. J., Bruus H.** A novel electro-osmotic pump design for nonconducting liquids: theoretical analysis of flow rate-pressure characteristics and stability // J. Micromech. Microengng. 2005. V. 15. P. 883–891.
10. **Фролов Ю. Г.** Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы): Учеб. для вузов. М.: Химия, 1982.

*Поступила в редакцию 28/XI 2007 г.,  
в окончательном варианте — 1/VIII 2008 г.*

---