

УДК 537.523.3; 532.517.4

## ОБ ЭЛЕКТРОВЯЗКОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛАХ

© 2011 г.

*В.А. Полянский, И.Л. Панкратьева*

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

ilpan@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследуется течение вязкой жидкости, содержащей малую примесь молекул электролитной природы. При движении такой среды в плоском микроканале в малой окрестности стенок образуется слой нескомпенсированного электрического заряда, который при конвективном переносе в отсутствие продольного электрического тока индуцирует составляющую электрического поля, направленную против течения. При этом в заряженном слое возникает объемная кулоновская сила, которая может тормозить поток. На основе исследований авторов по электризации жидкостей при течении в каналах [1, 2] проводится оценка возможного воздействия кулоновских сил на распределение скорости в пристенном слое жидкости и на величину касательных напряжений на стенке. Рассматриваются разные модели электрохимических процессов на стенках с заряженными пристенными слоями различной интенсивности.

*Ключевые слова:* электризация жидкости, электровязкий эффект, электрохимические процессы, объемная кулоновская сила.

В экспериментах, выполненных в последние годы в связи с проблемами микрогидродинамики, обнаружено повышенное по сравнению с расчетным гидравлическое сопротивление при прокачке жидкостей с электролитными примесями через плоские микроканалы микронной толщины [3]. Причину этого связывают с наличием электрически заряженных пристенных слоев, возникающих вблизи границы раздела при течении слабопроводящих жидкостей. При теоретическом объяснении обнаруженного явления за основу принимается следующая картина [3, 4]. Имеются заданный внешний перепад давления, создающий расход жидкого бинарного электролита через узкий плоский микроканал, и индуцированное течением продольное (направленное вдоль канала) электрическое поле, обуславливающее продольный ток проводимости в канале. Это продольное поле определяется принимаемым условием, что в каждом сечении канала равен нулю полный продольный электрический ток, который складывается из конвективного тока переноса вдоль канала объемного электрического заряда пристенного слоя и противоположного ему тока проводимости, распределенного по всему сечению. Продольное поле и объемный заряд создают в пристенном слое кулоновские силы, которые могут тормозить поток. Проведенные расчеты показывают, что при некоторых условиях в тонком слое вблизи поверхности стенки образуется возврат-

ное течение, приводящее к увеличению гидравлического сопротивления канала.

Рассматривается стационарное течение в плоском канале вязкой жидкости, содержащей в качестве малой примеси положительные и отрицательные ионы с концентрациями и подвижностями  $n_1, n_2, b_1, b_2$  соответственно. Внешнего электрического поля нет. При заданном постоянном градиенте давления для распределения скорости жидкости в отсутствие ионов имеет место профиль Пуазейля. Полная система уравнений, описывающая электризацию среды при течении в канале, приведена в [1]. Выпишем только в безразмерном виде нелинейное уравнение для скорости жидкости  $u$ :

$$\begin{aligned} \partial^2 u / \partial y^2 &= -A - SE_x q(y), \\ A &= \text{const}, \quad E_x = -R_q J_{con} / Sig, \\ J_{con} &= \int_0^1 q u dy, \quad Sig = \int_0^1 (b_1 n_1 + b_2 n_2) dy, \quad q = n_1 - n_2. \end{aligned}$$

Здесь  $A$  – градиент давления, имеющий порядок 1–10;  $q$  – плотность объемного заряда;  $x, y$  – продольная и поперечная координаты. Характерные значения безразмерных величин: электрическое число Рейнольдса  $R_q = u_0 e h / b_0 k T$  имеет порядок  $10^2$ – $10^4$ , параметр взаимодействия  $S = n_0 k T h / \mu u_0$  порядка  $10$ – $10^2$  ( $\mu$  – динамическая вязкость,  $h$  – высота канала, индексом ноль отмечены характерные значения параметров при обезразмеривании).

В рассматриваемой задаче важное значение имеют граничные условия для ионов на стенках канала. Эти условия получены из баланса потоков ионов на стенке:

$$\text{sign}(e_i)b_i n_i E_y - D_i \partial n_i / \partial y = \pm A_i \mp K_i n_i, \quad y=0, 1.$$

Здесь  $A_i$ ,  $K_i$  – задаваемые при решении задачи константы. В правых частях этих соотношений записаны потоки ионов, обусловленные поверхностными электрохимическими процессами ионизации нейтральных частиц и одночастичной рекомбинации ионов. Очевидно, что варьирование  $A_i$ ,  $K_i$  приводит к образованию заряженных слоев разной интенсивности. Далее приведены результаты решения задачи для случая, когда в поверхностном электрохимическом процессе участвуют только отрицательные ионы; положительные ионы на стенке не реагируют, примесь является сильным электролитом.

На рис. 1 представлено распределение объемного заряда в окрестности стенки, на рис. 2 – распределение потенциала  $F$  и нормальной к стенке компоненты поля  $E_y$ .

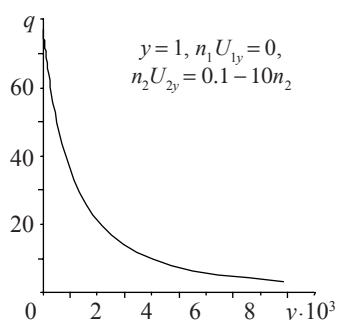


Рис. 1

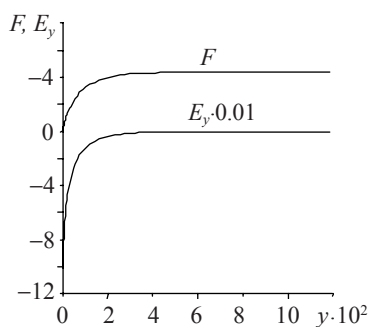


Рис. 2

Распределения типичны для задач электризации [1, 2]. Величина заряда в микрослое вблизи стенки в основном определяется параметрами поверхностного процесса и практически не зависит от распределения скорости жидкости в канале. Наоборот, образовавшийся в слое заряд и индуцированное конвективным переносом этого заряда продольное электрическое поле существенным образом меняют пристенный профиль ско-

рости. При этом меняется вязкое напряжение трения на стенке, что приводит к увеличению сопротивления канала и интерпретируется в [3, 4] как увеличение эффективной вязкости жидкости под влиянием сильного поля в пристенном микрослое.

На рис. 3 показаны профиль скорости Пуазейля (кривая 1,  $S = 0$ ) и профиль скорости с учетом тормозящего кулоновского воздействия (кривая 2), на рис. 4 – соответствующие распределения скорости в микрослое вблизи стенки.

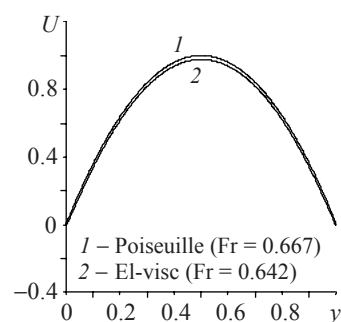


Рис. 3

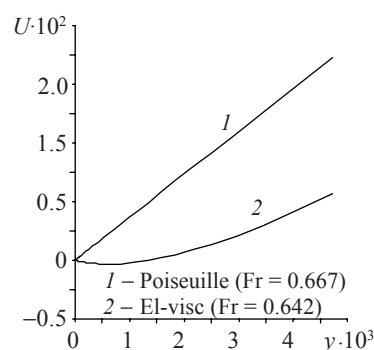


Рис. 4

Величина  $Fr$  на рисунках – безразмерный расход жидкости через канал. Видно, что в рассматриваемом случае в микрослое вблизи стенки, ширина которого отмечена вертикальной черточкой на кривой 2 (см. рис. 4), под действием кулоновских сил образовалось возвратное течение. Заметим, что описанное возвратное пристенное течение может служить одной из причин образования наблюдаемых вихревых структур на входе в микроканал [5].

Работа поддержана РФФИ (проект 10-01-00015).

#### Список литературы

1. Панкратьева И.Л., Полянский В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. №2. С. 3–16.
2. Панкратьева И.Л., Полянский В.А. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т. 4. 22 с. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-05-11-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-05-11-001.pdf).
3. Yang C., Li D. // J. Colloid and Interface Science.

1997. V. 194. P. 95–107; Ren L., Li D., Qu W. // J. Col. Int. ology J. 2003. V. 15, No 2. P. 83–90.  
Sci. 2001. V. 233. P. 12–22. 5. Ban H., Lin B., Song Z. // Biomicrofluidics. 2010.  
4. Chun M-S., Kwak H.W. // Korea-Australia Rhe- March; 4(1): 014104.

#### ON THE ELECTROVISCOUS EFFECT IN ELECTRIFICATION OF LIQUID IN MICROCHANNELS

*V.A. Polyanskiy, I.L. Pankratieva*

We study a flow of a viscous liquid containing a small admixture of molecules of the electrolyte nature. When moving such a medium in flat microchannels a layer of an uncompensated electric charge is created in a small neighborhood of the walls. In the absence of longitudinal electric current a convective transport of the charged layer induces an electric field component which is directed against the flow. In this case, the bulk Coulomb force appears in the charged layer, which may inhibit the flow. In this paper, based on the researches of authors on the electrification of fluid flows in channels, we assess the potential effects of Coulomb forces on the velocity distribution in the boundary layer and the value of the tangential stress at the wall. We consider different models of electrochemical processes on the walls with charged layers of varying intensity.

*Keywords:* electrification of liquid, electroviscous effect, electrochemical processes, bulk Coulomb force.