

01;03

Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод—провод

© Ю.К. Стишков, И.А. Елагин

Научно-исследовательский институт радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: pelab@niirf.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2004 г.)

Проведено компьютерное моделирование процесса формирования электрогидродинамических течений в системе двух взаимно параллельных проводов, возникающих при симметричной инжекции с каждого из электродов (двумерный случай). Моделирование проведено с использованием системы ANSYS. Разработан алгоритм моделирования нестационарных электрогидродинамических течений. Приведены результаты моделирования. Анализ результатов показал, что процесс развития электрогидродинамических (ЭГД) течений сопровождается формированием из приэлектродных заряженных слоев, окружающих каждый электрод, тонких противоположно заряженных струек жидкости, движущихся во встречных направлениях.

Введение

Вопросу формирования электрогидродинамических течений при подаче на электроды ступеньки напряжения было посвящено несколько работ. В работах [1,2] приведены результаты экспериментального исследования процесса формирования ЭГД течений при включении напряжения. Среди основных результатов этих работ следует назвать следующие: ЭГД течения возникают с некоторой задержкой относительно момента включения напряжения, процесс развития течения происходит путем чередующихся выбросов тонкой струйки заряженной жидкости с поверхности электрода. Первое объясняется формированием некоторого заряженного слоя у поверхности электрода до начала формирования ЭГД течения. Дальнейшие исследования показали [3], что если заряженный слой имеет симметричную кольцевидную структуру, то от него могут возникнуть только локальные течения. Для формирования направленного течения необходимо, чтобы первичная околоэлектродная заряженная структура имела асимметричную форму, например форму овального кольца.

Целью настоящей работы было компьютерное моделирование процесса формирования ЭГД течений в симметричной системе электродов типа провод—провод в двумерном случае, когда длина проводов значительно больше межэлектродного расстояния. В электростатическом приближении такая система симметрична относительно центральной плоскости.

При разработке алгоритма моделирования были использованы следующие допущения: после включения напряжения вокруг каждого электрода образуется слой заряженной жидкости, имеющий форму овального кольца, вытянутого по направлению к противоположному электроду, распределение плотности электрического заряда в пределах кольца однородно, из неподвижного заряженного слоя под действием кулоновских сил возникает ЭГД течение, которое выносит электрический

заряд вдоль линий тока. Распределение плотности электрического заряда в новой области также считается однородным. Такие допущения правомерны, если ионы, образующие облако объемного заряда, заморожены в жидкость, т.е. электрическое число Рейнольдса значительно больше единицы. Действительно, закон сохранения заряда в рамках сделанных допущений можно записать в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

или в случае несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{v} \operatorname{grad} \rho, \quad (2)$$

где ρ — плотность объемного заряда, \mathbf{v} — скорость движения жидкости.

Моделирование проводилось при помощи конечно-элементного пакета программ ANSYS. Для решения нестационарных задач электрогидродинамики был разработан и осуществлен метод, заключающийся в последовательном решении задач электростатики и гидродинамики, который будет описан ниже.

Описание модели и алгоритма моделирования

Модель близко соответствует использованной в экспериментах [1] и состоит из кюветы квадратного сечения, сторона квадрата 10 см, в центре кюветы размещены два параллельных провода диаметром 0.14 см и с межэлектродным расстоянием 1 см. Исследуемая жидкость — трансформаторное масло, электрическая проводимость $10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, диэлектрическая проницаемость 2.2.

Алгоритм моделирования основан на итеративном процессе, а каждая итерация состоит из нескольких шагов.

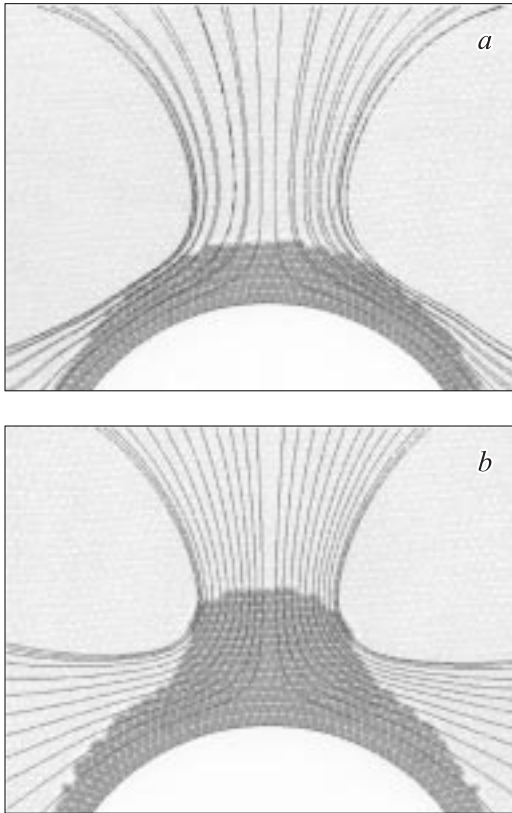


Рис. 1. *a* — исходная область объемного заряда плотностью 0.01 C/m^3 (более темная область) и соответствующие линии тока, *b* — область объемного заряда плотностью 0.01 C/m^3 (более темная область) после четвертой итерации и соответствующие линии тока.

1. На первом шаге рассчитывается электростатическая задача с объемным зарядом $\pm 0.01 \text{ C/m}^3$ (рис. 1, *a*), заданным в пределах овального кольца толщиной 0.1 радиуса электрода, опоясывающего каждый из электродов и смещенного к противоположному электроду (т.е. в виде кольца овальной формы). На рис. 1 часть электрода представлена в виде белой области, ограниченной полукругом. На рис. 1, *a* показана исходная зарядовая структура у нижнего электрода. Граничные условия следующие: на электродах потенциалы $\pm 12 \text{ kV}$, на внешних стенках нормальная компонента электрического поля равна нулю. Из полученного на первом шаге решения находится распределение кулоновских сил в заряженной области.

2. На втором шаге рассчитывается нестационарная гидродинамическая задача с распределенной нагрузкой в виде кулоновских сил, рассчитанных на первом шаге. Граничные условия: обе компоненты скорости на стенках равны нулю. Рассчитываются поля скоростей и давлений возникающих ЭГД течений. После возникновения ЭГД течений заряд их исходной овальной структуры выносится ЭГД течением вдоль линий тока жидкости, формируя заряженную струю. Исходя из этих сообра-

жений на втором шаге с помощью полученных распределений скоростей и линий тока жидкости рассчитывается новая область распределения объемного заряда. Для этого из полученного решения гидродинамической задачи строятся линии тока (рис. 1, *a*), проходящие через границу области первоначального распределения заряда, и рассчитывается смещение этой границы за некоторое время с учетом изменения скорости движения жидкости вдоль линий тока. Считается, что заряд перемещается вместе с жидкостью. Для достижения хорошей точности промежуток времени на следующую итерацию рассчитывается таким образом, чтобы граница зарядовой области сместилась не более чем на 0.5 толщины кольца. На рис. 1, *b*, представлена область распределения плотности объемного заряда после четвертой итерации.

3. На третьем шаге решается электростатическая задача с новой областью распределения заряда, рассчитывается новое распределение электрических сил.

4. На четвертом шаге решается гидродинамическая задача с объемной нагрузкой, рассчитанной на третьем шаге. Строятся новые линии тока (рис. 1, *b*).

Далее итеративный процесс повторяется, пока заряженная область не достигнет середины межэлектродного промежутка, где происходит встреча со струйкой, текущей от противоположного электрода.

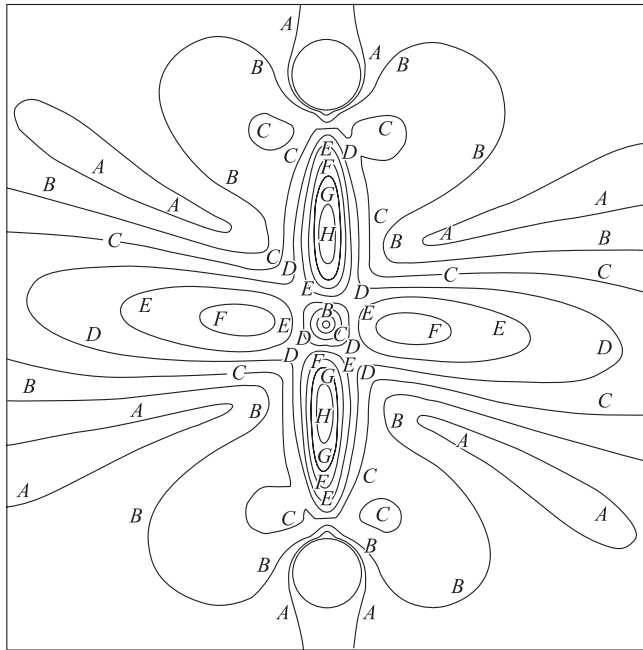
Таким образом, в представленной модели ЭГД течение формируется в результате образования заряженной центральной струи, переносящей заряд в межэлектродный промежуток. Центральная струя в свою очередь образуется путем сноса ЭГД течением заряда из первоначально сформированной кольцевой заряженной области. Всего выполнено 17 циклов, в результате которых сформированы две встречные струи ЭГД течения. Считалось, что плотность заряда, возникающая у каждого из электродов, одинакова, равна 0.01 C/m^3 и соответствует знаку полярности электрода.

Результаты моделирования

Результаты моделирования включают динамику смещения области распределения плотности объемного заряда, напряженности электрического поля, кулоновских сил и соответствующие им контурные графики распределения скоростей возникающих ЭГД течений и давлений в моменты времени $0.006, 0.024, 0.036, 0.048, 0.06, 0.078, 0.102 \text{ s}$ после подачи напряжения. Все значения на графиках приведены в системе единиц СИ.

На рис. 2 приведен контурный график распределения скоростей ЭГД течений в момент времени 0.102 s , соответствующий встрече двух заряженных струй, текущих от противоположных электродов. Как и следовало ожидать по данным экспериментов [1,2], в ячейке формируются два встречных ЭГД потока, образующих четырехячеистую структуру.

Анализ полученных данных показывает, что каждая из возникающих встречных струй ЭГД течений имеет



ANSYS 7.0
 A = .012401 C = .062007 E = .111612 G = .161217
 B = .037204 D = .086809 F = .136415 H = .18602

Рис. 2. Контурный график распределения скоростей.

характерную зонную структуру, описанную ранее на основе анализа данных эксперимента. У поверхности каждого из электродов имеется тонкий слой жидкости, в котором скорость течения очень мала. Далее следует зона ускорения, затем имеется область слабо изменяющегося течения и далее зона торможения жидкости. В середине межэлектродного промежутка находится область неподвижной жидкости, имеющая округлую форму. Поскольку картина ЭГД течений симметрична относительно середины межэлектродного промежутка, здесь и далее будет анализироваться только нижняя полуплоскость.

На рис. 3, *a* приведены последовательные во времени распределения скорости ЭГД течения вдоль центральной оси течения от нижнего электрода до середины межэлектродного промежутка. Вертикальными черточками на рисунке помечены соответствующие расположения границы заряженной струйки. Видна область ускорения, за которой следует область торможения жидкости. По мере продвижения заряженной струйки в глубь жидкости продвигается максимум скорости ЭГД течения. На всех стадиях горб скорости несколько сдвинут к электроду относительно границы заряженной области.

На рис. 3, *b* приведены соответствующие этим же временам распределения ускорения жидкости. Эти распределения имеют выраженную двугорбую структуру. Зона ускорения жидкости имеет максимум, отстоящий от поверхности электрода на некоторую величину, слабо

зависящую от времени. Зона торможения жидкости также имеет экстремум — максимум отрицательного ускорения, распространяющийся в объем жидкости вместе с границей заряженной струйки. Наличие этой зоны определяет ячеистый характер ЭГД течения и его структуру.

На рис. 4, *a* приведен контурный график распределения давления в межэлектродном промежутке. Динамика развития ЭГД течения сопровождается формированием двух зон давления, расположенных на различных концах заряженной струйки: зоны пониженного давления, лежащей в приэлектродной области и сосредоточенной в основном в верхней части заряженного кольца, и зоны повышенного давления, имеющей полукруглую форму и сплюснутую нижнюю границу. Нижняя граница зоны повышенного давления определяется верхней границей заряженной струйки и распространяется вместе с ней до середины межэлектродного промежутка, где она объединяется с аналогичной зоной, следующей от

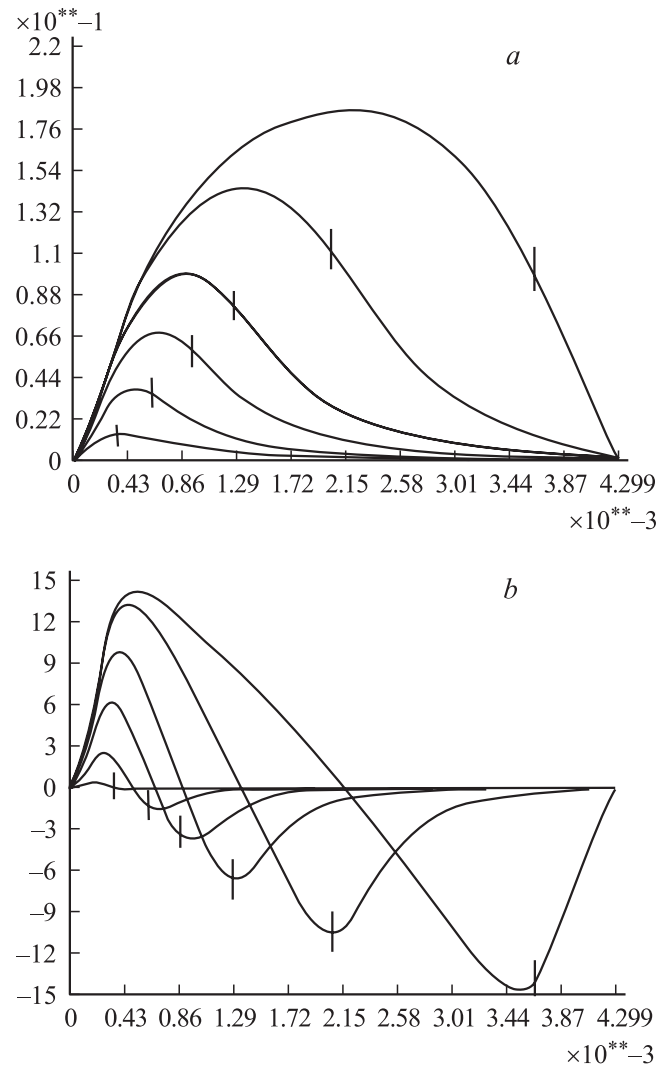
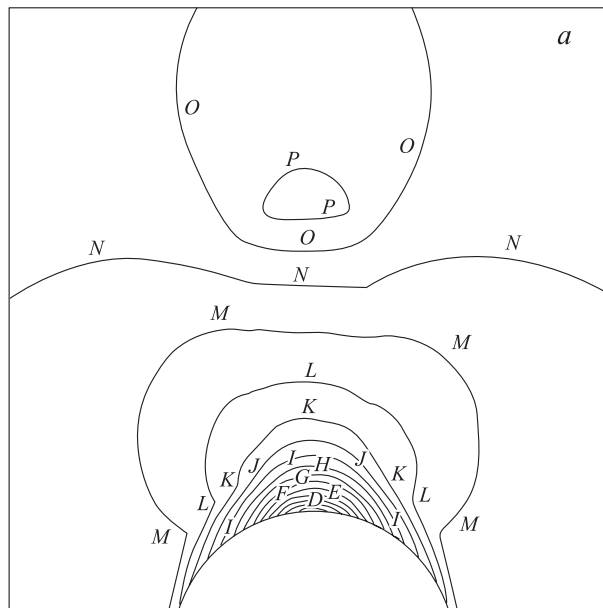


Рис. 3. *a* — распределение скоростей в моменты времени 0.024, 0.036, 0.048, 0.06, 0.078, 0.102 s; *b* — динамика формирования зон ускорения и торможения жидкости.



ANSYS 7.0

A = -31.326	E = -21.84	I = -12.354	M = -2.867
B = -28.955	F = -19.468	J = -9.982	N = -4.95914
C = -26.583	G = -17.097	K = -7.611	O = 1.876
D = -24.212	H = -14.725	L = -5.239	P = 4.247

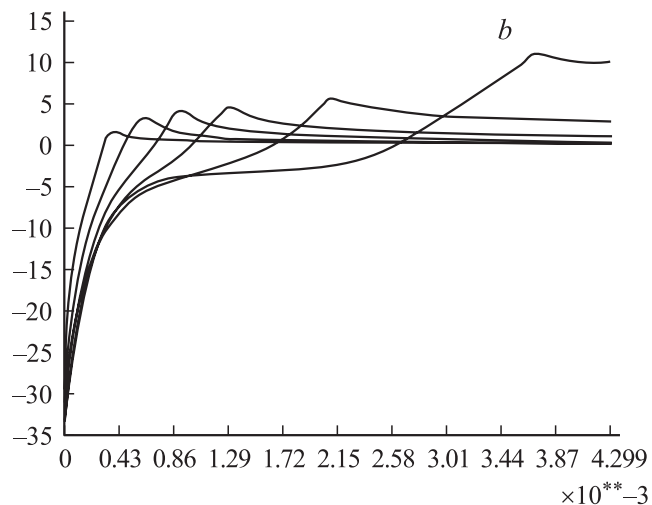


Рис. 4. *a* — контурный график распределения давлений, *b* — распределение давлений в моменты времени 0.024, 0.036, 0.048, 0.06, 0.078, 0.102 s.

противоположного электрода. В момент времени 0.06 s, соответствующий рис. 4, *a*, зона повышенного давления расположена на уровне 0.3 межэлектродного промежутка.

На рис. 4, *b* приведены линейные графики распределения давлений в жидкости вдоль центральной оси течения от нижнего электрода до середины межэлектродного промежутка. По мере продвижения заряженной струйки в глубь межэлектродного промежутка формируются зоны пониженного и повышенного давления. Зона

пониженного давления имеет максимум у поверхности электрода, величина давления возрастает с течением времени. Отрицательное давление быстро падает от поверхности электрода в жидкость, область локализации зоны пониженного давления — приэлектродный слой. Область повышенного давления имеет максимум, расположенный на внешней границе заряженной струйки и продвигающийся вместе с ней к центру межэлектродного промежутка. Максимумы зон ускорения, приведенные на рис. 3, *b*, примерно соответствуют зонам локализации пониженного давления, а экстремумы зон торможения — зонам локализации повышенного давления.

Анализ карт линий уровня ускорений показывает: на начальной стадии, когда зарядовая структура имеет форму кольца, зона ускорения возникающих ЭГД течений раздвояна и лежит вдоль боковых поверхностей электрода. По мере распространения заряженной струйки в глубь межэлектродного промежутка зона ускорения жидкости смещается вдоль оси течения в область, находящуюся под электродом, и течение приобретает структуру, характерную для режима развитого ЭГД течения [4,5]: за зоной ускорения следует зона центральной струи, в пределах которой ускорение практически отсутствует, а вектор скорости направлен вдоль линии, соединяющей электроды.

Таким образом, в ЭГД течения реализован экзотический механизм: течение жидкости происходит из области пониженного давления в область повышенного давления. Такое течение возможно благодаря объемному характеру движущих кулоновских сил. И именно оно определяет оригинальную структуру динамики распространения зон ускорения и торможения, приведенную на рис. 3, *b*.

Динамика изменения кулоновских сил состоит в продвижении области их локализации к середине межэлектродного промежутка вместе с заряженной струйкой жидкости. Силы монотонно спадают от поверхности электрода в жидкость и в отличие от ускорений не имеют экстремума. Непосредственно в приэлектродной области кулоновские силы создают зону пониженного давления и только на некотором расстоянии от поверхности электрода приводят жидкость в движение.

Заключение

Таким образом, разработан алгоритм компьютерного моделирования процесса формирования ЭГД течений в симметричной системе электродов типа провод—провод при включении напряжения, определяемый распространением двух заряженных струй от каждого из электродов в глубь межэлектродного промежутка. Проведенные расчеты показали, что при одинаковой плотности заряда в приэлектродных зонах у обоих электродов формируются встречные симметричные четырехячейчатые ЭГД течения, неоднократно наблюдавшиеся в экспериментах. Процесс формирования характерной зонной структуры встречных симметричных ЭГД течений определяется

продвижением заряженной струйки от каждого из электродов. Этот процесс приводит к формированию пространственно распределенных кулоновских сил, монотонно спадающих от каждого электрода в жидкость. При этом в приэлектродных областях образуется зона пониженного давления, локализованная в основном в узком приэлектродном слое, а также зон повышенного давления, распространяющаяся в объем жидкости вместе с границей заряженной струйки. Эти особенности определяют характерную зонную структуру ЭГД течения: зону ускорения, имеющую экстремум, находящийся в приэлектродной зоне, и зону торможения, приводящую к формированию ячеистого течения.

Список литературы

- [1] *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989.
- [2] *Стишков Ю.К., Жмаев Н.А., Яруничев А.В.* // Магнитная гидродинамика. 1989. № 2. С. 93–96.
- [3] *Буянов А.В., Lazarev A.S., Stishkov Yu.K.* // Proc. 5th Intern. EHD workshop. Poitiers, 2004. P. 262–267.
- [4] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // Электрон. обраб. материалов. 2000. № 1. С. 14–21.
- [5] *Буянов А.В., Стишков Ю.К.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 34–39.