

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СКВОЗНОГО ЭГД-ТЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОВОД-ПРОВОД

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-образовательный центр «Электрофизика» физического факультета,
ул. Ульяновская, д.3, г. Санкт-Петербург, Петродворец, 198504, Россия*

Введение

За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в исследовании электропроводности диэлектрических жидкостей. Начиная с 80-х годов [1] конференции на эту тему стали постоянными, что свидетельствует об актуальности проблем электрогидродинамики (ЭГД) и электрофизики жидких диэлектриков и значительном прогрессе в этой области. Однако с развитием вычислительной техники основное внимание стало уделяться вопросам численного моделирования ЭГД-процессов, что помогает если не заменить эксперимент, то по крайней мере предсказать его результат, экономя время и средства.

Колоссальна заслуга Остроумова в анализе взаимодействия электрических и гидродинамических полей, часто его называют «отцом электрогидродинамики». В [2] систематически излагаются основные электрофизические и гидродинамические закономерности, ответственные за процессы тепло- и массообмена в изолирующих жидкостях, находящихся в сильных электрических полях. Даются рекомендации по интенсификации этих процессов, а также по использованию их в науке и технике. Указываются перспективные направления для дальнейших разработок.

Один из наиболее интересных видов ЭГД-течения – это случай сквозного течения, которое возникает в симметричной системе электродов при несимметричном зарядообразовании на активном и пассивном электродах.

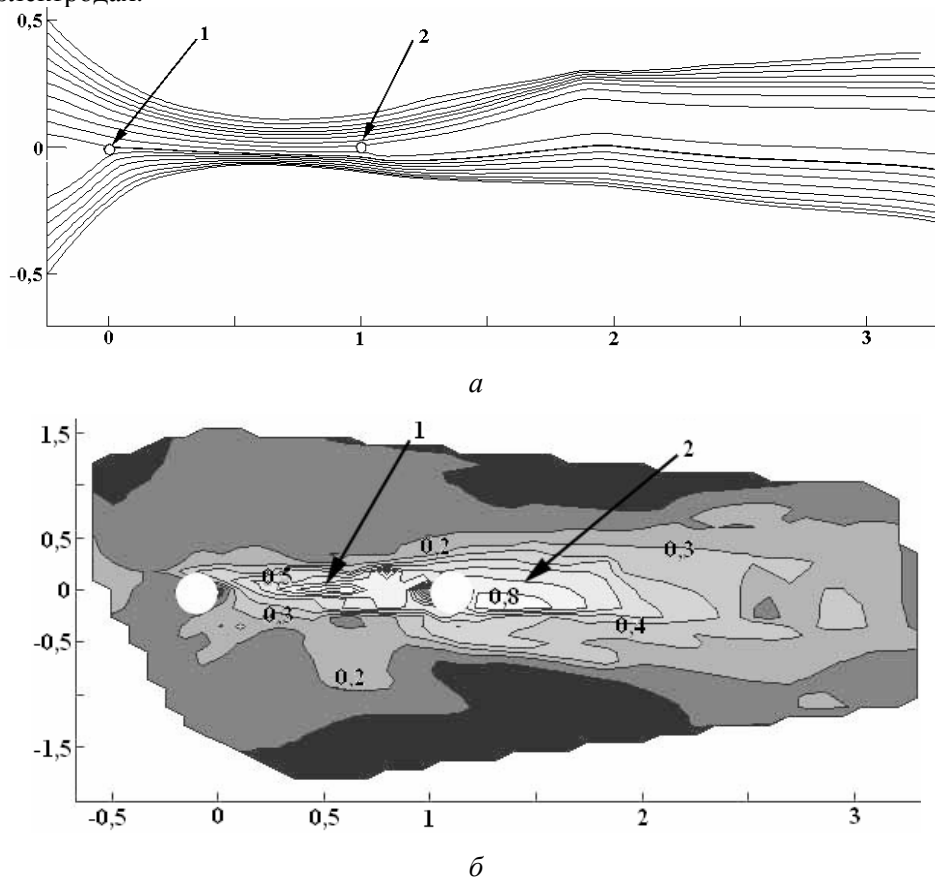


Рис. 1. Линии тока сквозного ЭГД-течения (а), карта линий уровня скорости (б)

В [3] приведены результаты компьютерной обработки эксперимента по изучению структуры ЭГД-течения в симметричной системе электродов. Эти результаты являлись основой для сравнения основных величин, полученных при моделировании на основе разработанного алгоритма, изложенного в работе. На рис. 1,а приведены линии тока, на рис. 1,б – график линий уровня сквозного ЭГД-течения ([3]). За единицу длины взято межэлектродное расстояние. Карты линий уровня нормированы на величину максимальной скорости. Струя, идущая от активного электрода (катода), обозначена стрелкой 1, а струи, выходящие за пассивный электрод (анод), – стрелкой 2. Центры электродов расположены в точках с координатами: 0,0 (катод) и 0,1 (анод). Из рисунка видно, что скоростная структура сквозного ЭГД-течения существенно отличается от структуры ЭГД-течения в системе электродов провод над плоскостью.

Замечены две зоны ускорения жидкости: зона ускорения 1 в межэлектродном промежутке существенно растянута. Несмотря на то что струи, текущие от электрода 1, несут отрицательный заряд, они выходят далеко за пределы положительного электрода и за ним видна зона 2, отмеченная стрелкой.

Зона торможения сквозного течения вынесена далеко за пределы межэлектродного промежутка: в области за пассивным электродом на расстоянии L скорость жидкости уменьшается в 2 раза (L – расстояние между электродами). В этой области электрическое поле направлено в сторону, противоположную движению жидкости, однако тормозящий эффект весьма мал. Эта особенность сквозного ЭГД-течения делает его особенно перспективным для практического использования. Но важным вопросом становится необходимость исследования его зарядовой структуры.

Алгоритм компьютерного моделирования

В данной работе приведены результаты компьютерного моделирования сквозного ЭГД-течения. В системе электродов провод-провод структура ЭГД-течения определяется соотношением скоростей ионообразования на катоде и аноде [4]. Если эти скорости равны, то течение реализуется в виде двух потоков равной интенсивности. Потоки встречаются в центре межэлектродного промежутка, и там образуются боковые струи, идущие под углом 90° к первоначальному направлению струи [7]. При нарушениях симметрии условий зарядообразования происходит искажение структуры течения: поток от электрода, на котором скорость зарядообразования выше, преобладает над встречным потоком, при этом боковые струи встречных потоков смещаются к электроду, у которого скорость зарядообразования ниже, угол наклона боковых струй к центральной оси течения становится острым. Сквозное течение – это предельный случай встречных течений, когда поток от одного из электродов намного интенсивнее, чем от второго. Угол наклона боковых струй к оси симметрии течения падает до очень малой величины, а сами струи выходят далеко за пределы межэлектродного промежутка [3].

Решение задачи проводилось в пакете численного моделирования Ansys, основанного на конечно-элементном механизме решения поставленных задач. В настоящее время компания Ansys Inc. является ведущей на рынке программ численного моделирования, что во многом определило выбор именно этого продукта.

Как и в [5–7], для решения задачи используется метод конечных элементов. Авторами разработан алгоритм, заключающийся в последовательном решении задач электростатики и гидродинамики.

Алгоритм решения задачи.

1) На основе анализа данных эксперимента задается начальное «приближенное» распределение заряда и путем решения электростатической задачи вычисляются кулоновские силы, которые переносятся в гидродинамическую часть и задаются в качестве объемной нагрузки.

2) По результатам решения, в приближении вмерзновенности заряда в жидкость, строится новая, «уточненная» заряженная область по линиям тока ЭГД-течения, полученным на первой итерации.

3) Новая заряженная область используется при решении задачи электростатики на следующей итерации, после этого вновь вычисляется объемная электрическая сила.

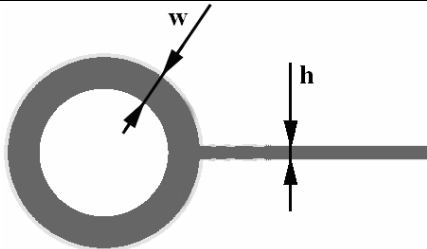
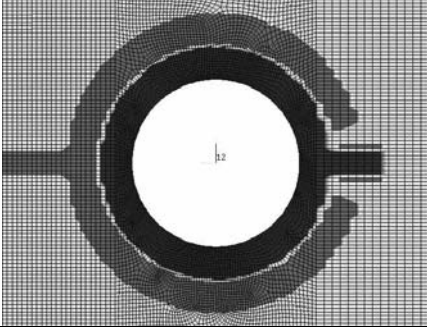
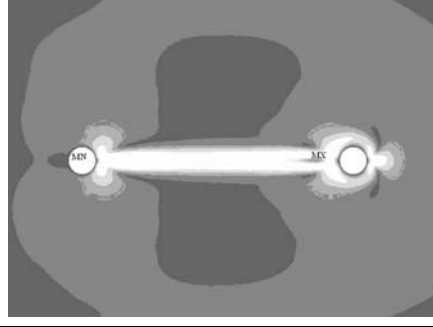

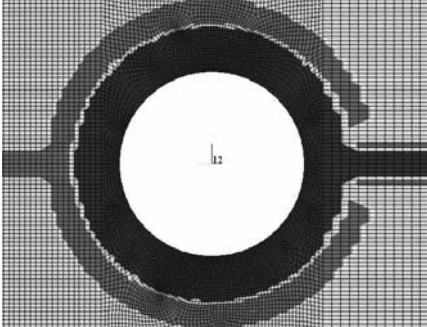
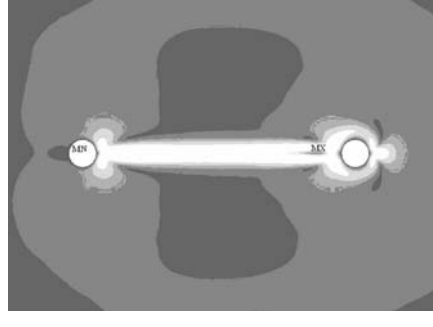
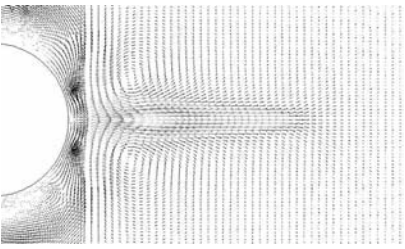
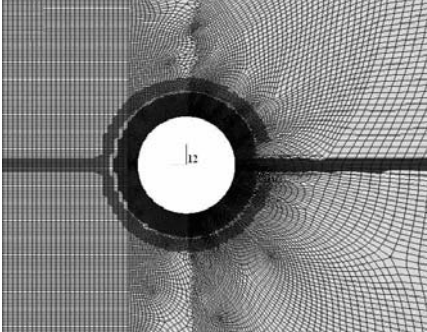
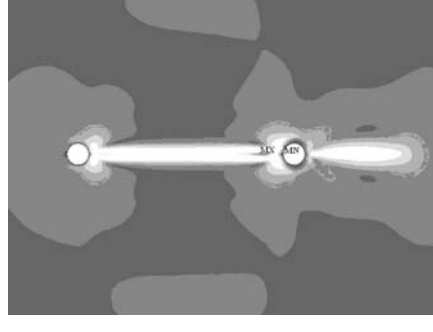
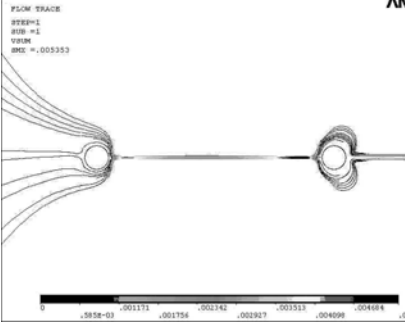
4) Повторяется решение гидродинамики с уточненной областью силовой нагрузки.

Как видно, процесс итеративный, причем сходимость осуществляется по области локализации объемного заряда.

При моделировании сквозного течения на первой итерации зарядовая структура моделировалась в виде двух кольцевых областей вокруг активного и пассивного электродов, заряженных соответственно с каждым из них, а также в виде тонких (толщиной меньше радиуса электрода) заряженных прямоугольных полосок, вытянутых вдоль оси течения. Полоска, идущая от активного электрода,

заряжена одноименно с ним (светло-серый оттенок); полоска, идущая от пассивного электрода за пределами МЭП, заряжена противоположным знаком (темно-серый оттенок) и с обеих сторон ограничена полосками противозаряда (см. табл. 1, вверху – заряженная структура в окрестности активного электрода, слева внизу – в окрестности пассивного электрода). Результаты моделирования показали, что гидродинамическая структура течения существенно зависит от стартовой протяженности заряженных струек за пределами межэлектродного промежутка. Следует заметить, что этот параметр определяется скоростью рекомбинации заряда в биполярно заряженной струйке. В табл. 1 приведены также линии тока ЭГД-течения, соответствующие трем различным зарядовым структурам. Видно, что сквозной режим ЭГД-течения реализуется в случае, когда протяженность заряженных областей в заэлектродной области сравнима с длиной МЭП. При коротких заряженных струйках течение в заэлектродной области теряет сквозной характер, появляются завихрения.

Области локализации объемного заряда у активного (вверху) и пассивного электродов (слева)

| Заряд на первом шаге | Заряд на втором шаге | Заряд на третьем шаге |
|--|---|---|
|  | | |
| Стартовая зарядовая структура | Контурный график скоростей | Линии тока ЭГД-течения |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Стоит отметить, что характер распределения заряда на первом шаге сказывается только на скорости сходимости задачи к конкретному распределению, но никак не на качестве этой сходимости. Если параметры были выбраны ошибочно (то есть при заданных параметрах формирование сквозного ЭГД-течения окажется невозможным), то результатом будет конкретный вид течения, отвечающий заданным параметрам, например симметричный случай при задании одинакового по модулю заряда на обоих электродах.

В таблице приведены возможные начальные распределения заряда, а также итоговые контурные графики скоростей и линии тока рассчитанного течения. В правой части таблицы приведены стартовые распределения заряда у пассивного (в данном случае правого) электрода.

Было замечено, что ширина заряженной струи между электродами зависит от ширины приэлектродного кольца. При точности это соотношение постоянно и равняется 2 ($w/h=2$).

При моделировании сквозного ЭГД-течения возможны два подхода: 1) на основе данных эксперимента задать ожидаемое распределение заряда и итеративно решить поставленную задачу с целью поиска реального распределения; 2) второй вариант использует в качестве входных данных задачи распределения заряда, получаемые при решении задачи о симметричном течении (которое формируется при равном ионообразовании на обоих электродах) [7]. После выхода на стационар (что является интересной задачей) увеличиваем заряд, поставляемый одним из электродов, что нарушает устойчивое равновесие заряженных струй между электродами и при определенном соотношении между зарядами приводит к сквозному течению.

I. Рассмотрим более подробно решение, полученное в случае, когда стартовым являлся третий вариант, приведенный в табл. 1, при котором формируется наиболее продолжительная струя за пассивным электродом. В этом случае заряд, натекающий с активного электрода, вплотную обтекает пассивный электрод с противоположно заряженным кольцом и выходит в виде тонкой струи за межэлектродный промежуток, вынося с собой биполярную вафельную заряженную структуру, внешние слои которой несут заряд знака активного электрода, внутренние – заряд пассивного электрода, противоположный по знаку. За пределами МЭП струя распространяется на расстояние, примерно равное 3 диаметрам электродов (1,5 мм). Результаты решения, когда плотности активного и пассивного зарядов по модулю отличаются незначительно, на 2 итерации, приведены на рис. 2.

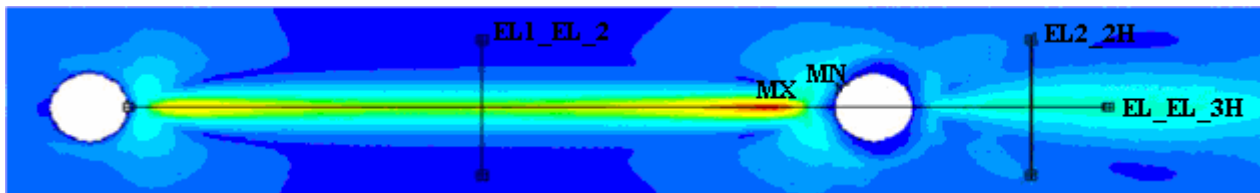


Рис. 2. Контурный график скорости сквозного течения при наличии «длинных» биполярных струек за пределами пассивного электрода



Рис. 3. График скорости по горизонтальному пути

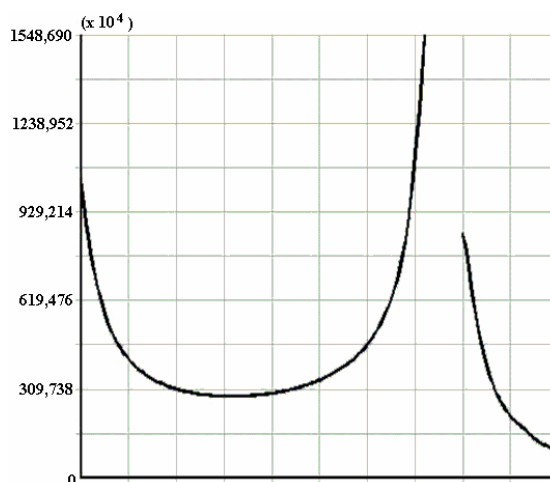


Рис. 4. График электрического поля по горизонтальному пути

Распределение скорости по горизонтальному пути (EL_EL_3H на рис. 2), проведенному от края активного электрода до границы заряженной области (за электродами), приведено на рис. 3, в месте провала – электрод. В соответствии с распределением электрического поля на этом пути, приведенном на рис. 4, профиль скорости заряженной жидкости имеет 2 максимума, соответствующих максимумам поля. Скорость струи за пассивным электродом быстро падает и по величине значительно ниже максимальной внутри межэлектродного промежутка. Это распределение существенно отличается от распределений скоростей сквозного течения, полученных в эксперименте (см. рис. 1), что заставляет искать иные распределения заряда, которые бы давали результат более схожий с экспериментальным (рис. 1, [3]).

Типичная картина распределения давления приведена на рис. 5. Она отражает специфику распределений объемного заряда в приэлектродных областях: у активного электрода зона пониженного давления, а у пассивного – биполярная структура: внутреннее кольцо пониженного давления и внешний полумесяц повышенного.



Рис. 5. Контурный график давления (типичная картина для сквозного течения)

Стоит обратить особое внимание на то, что в случае сквозного ЭГД-течения хорошо заметны области локализации заряженных колец вблизи обоих электродов, при этом у пассивного электрода со стороны, обращенной к активному, имеются области повышенного давления, обусловленные наличием кулоновских сил, направленных к центру электрода.

II. Другой способ получения сквозного ЭГД-течения схож с экспериментальным: при равном ионообразовании на электродах формируется так называемое встречное симметричное ЭГД-течение [6, 7]. В данном случае формируются 2 струи, идущие от электродов навстречу друг другу и уходящие в параллельные боковые струи в центре межэлектродного промежутка (рис. 6). Управляя примесными свойствами жидкости, можно добиться ухода струй от параллельных к наклоненным в сторону электрода с меньшим зарядообразованием. Предельным случаем будет являться сквозное ЭГД-течение.

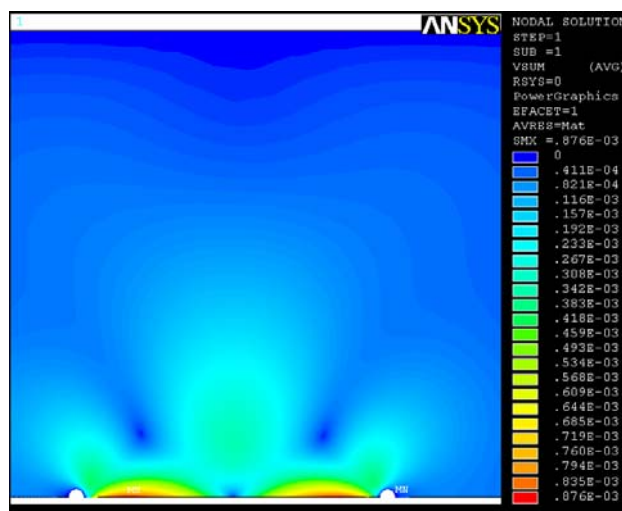


Рис. 6. Контурный график скорости сквозного ЭГД-течения

Изменим стартовую геометрию заряженных струй в виде встречных противоположно заряженных полосок и зададим равные плотности заряда во встречных струйках (рис. 7, шаг 1). В зависимости от механизма рекомбинации можно получить боковые струи разной длины (рис. 7, шаги 1, 2, 3). Увеличим теперь зарядообразование на левом электроде, заряженные струи останутся параллельными, но будут наклоняться вправо (в сторону меньшего заряда) (рис. 7, шаги 4, 5).

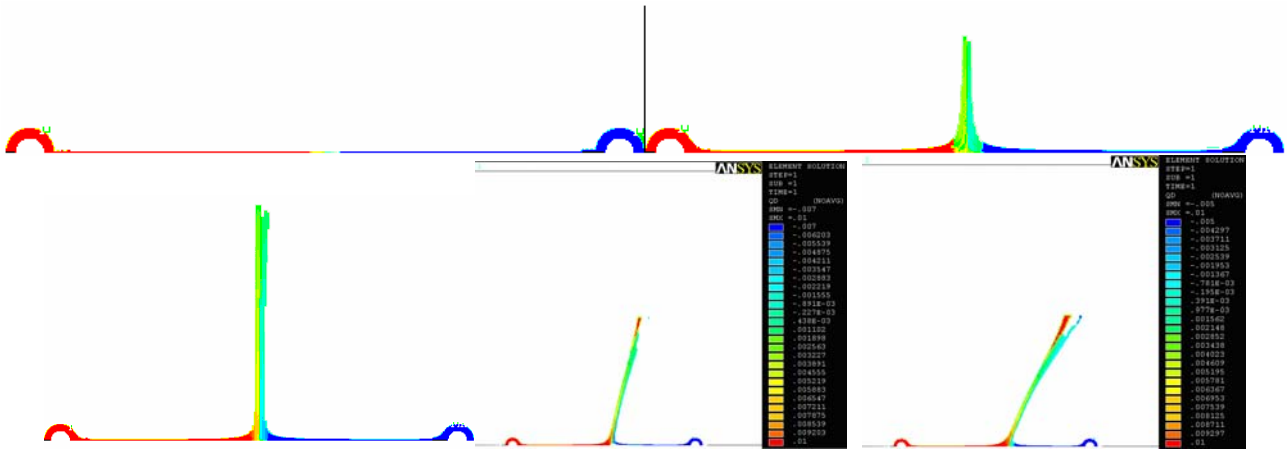


Рис. 7. Формирование ЭГД-течения от симметричного (шаги 1,2,3) к боковым струям (шаги 4,5)

При зарядообразовании у пассивного электрода в 8–10 раз меньше, чем у активного, формируется стабильное сквозное ЭГД-течение (рис. 10), схожее с полученным в экспериментах [3]. Результаты решения при таком соотношении зарядов приведены далее.

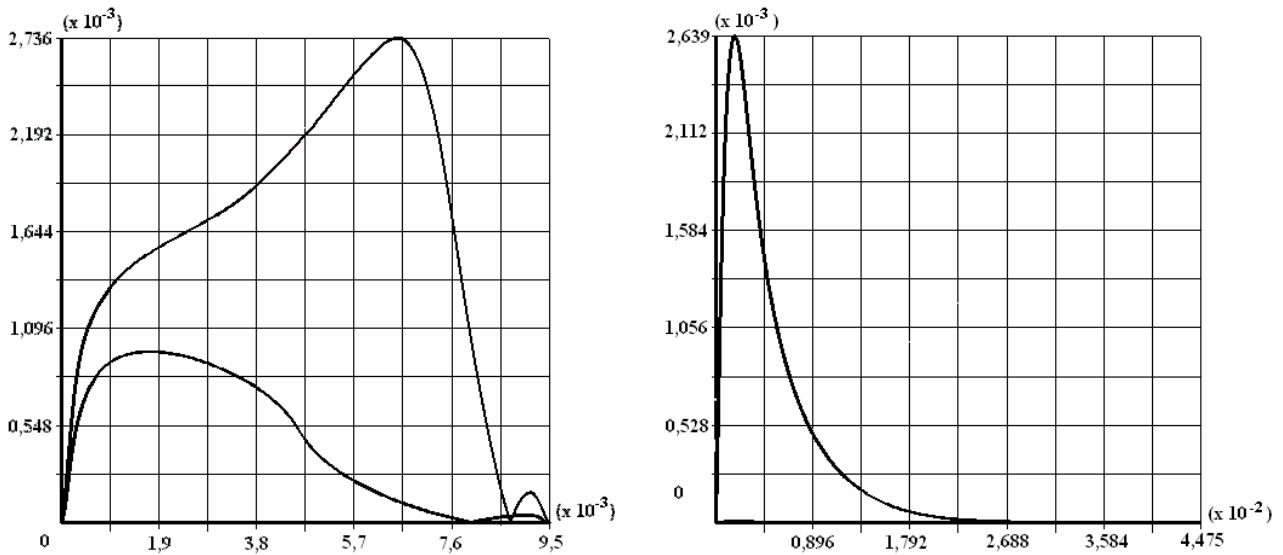


Рис. 8. Графики скорости на горизонтальном пути между и за электродами соответственно на 1,2 итерациях при распределении заряда на рис. 10

Основными доказательствами сквозного характера течения служат максимум скорости (рис. 8, справа), возникающий за пределами МЭП, сравнимый с максимумом (рис. 8, слева) в пределах МЭП, а также линии тока жидкости (рис. 9).



Рис. 9. Линии тока жидкости при сквозном ЭГД-течении с заряда на рис. 10

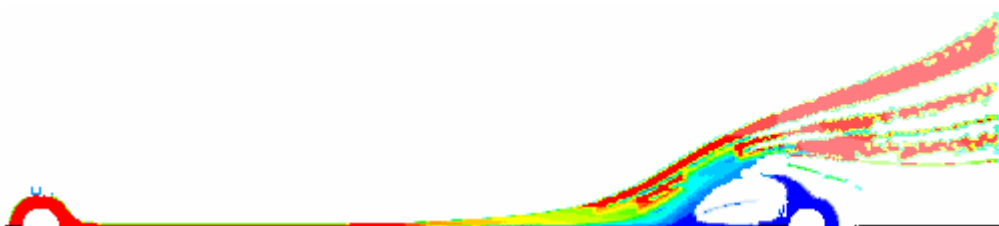


Рис. 10. Распределение заряда в случае сквозного течения

Сопоставляя результаты моделирования с данными экспериментов (рис. 11), можно выделить несколько важных особенностей этого вида течения (нумерация соответствует зонам, указанным на рисунке):

1) абсолютный максимум скорости находится в пределах МЭП и смещён относительно центра в сторону пассивного электрода (см. рис. 11, стрелка 1), при этом после резкого возрастания скорости от края активного электрода (до величины 0,5 максимума по данным эксперимента и 0,44 по результатам моделирования) дальнейшее увеличение скорости происходит практически линейно;

2) имеется короткоструйное образование, направленное в сторону обтекания пассивного электрода, которое присутствует во всех результатах моделирования и в приведенном эксперименте (стрелка 2);

3) заряженная струя, мигрирующая с активного электрода, не прижимает противоположный заряд вплотную к пассивному электроду, как это бывает при обычном обтекании цилиндра, а имеется вытянутая зона застоя жидкости перед пассивным электродом, обусловленная затягиванием заряда, инжектируемого с ближайшего электрода, в струю противоположного заряда без перемешивания. Из рис. 8 видно, что в этой области также имеется локальный максимум, который обусловлен действием кулоновских сил, направленных от электрода, что формирует разгон, торможение же формирует наличие противоположно направленных кулоновских сил, действующих на заряд противоположного знака, пришедшего в эту область с активного электрода;

4) в области за пассивным электродом имеется дополнительный максимум скорости сквозного течения, равный 0,8 абсолютного максимума в эксперименте и 0,79 в модели. Из рис. 8 и 9 видно, что жидкость выходит далеко за пределы МЭП и теряет свою скорость на расстоянии в несколько межэлектродных промежутков, что делает сквозное ЭГД-течение особенно перспективным для практического использования.

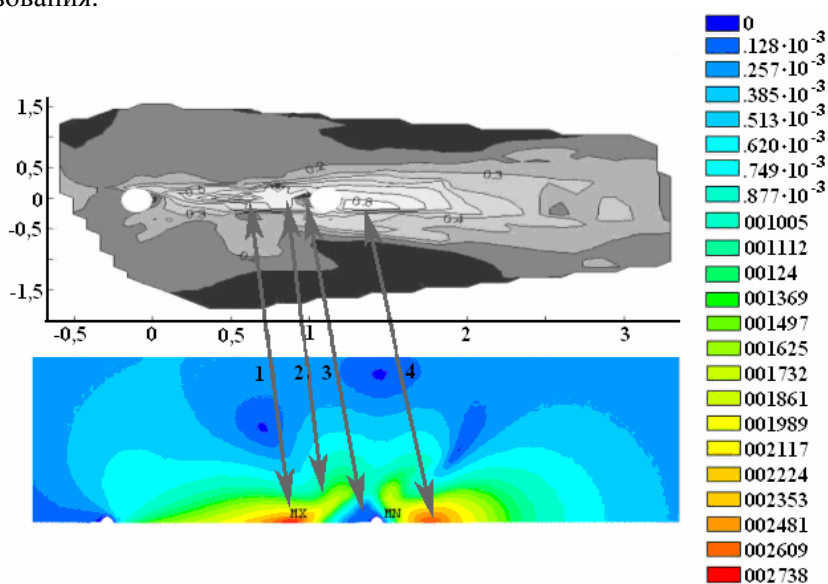


Рис. 11. Сопоставление данных эксперимента и результатов моделирования

Заключение

Разработан алгоритм компьютерного моделирования задачи ЭГД-течения в стационарном случае, позволяющий решать широкий круг ЭГД-задач. Программа написана таким образом, что пользователю не обязательно изучать пакет численного моделирования Ansys. А с помощью новых принципов моделирования течений была значительно увеличена производительность программы, что позволяет использовать ее в качестве предварительного этапа выполнения эксперимента с целью анализа возможных конфигураций, которые стоит применять на практике.

В работе приведены результаты решения задачи о симметричном и несимметричном (сквозном) течениях жидкости в симметричной системе электродов типа провод-провод. С одной стороны, анализ дополняет результаты, изложенные в [7], выводом на стационар симметричных струй, с другой – рассматривает принципиальный случай нарушения симметрии распространения заряда, в котором формируются струи, наклонённые под острым углом к центральной оси симметрии. В этом случае формируется так называемое сквозное ЭГД-течение. Замечены две зоны ускорения жидкости: зона ускорения в межэлектродном промежутке существенно растянута. Несмотря на то что струи, текущие от активного электрода, несут противоположный (по отношению к пассивному) заряд, они

выходят далеко за пределы пассивного электрода, и за ним видна дополнительная зона ускорения жидкости, величина скорости в которой достигает 0,8 максимума. Зона торможения сквозного течения вынесена далеко за пределы межэлектродного промежутка: в области за пассивным электродом на расстоянии L скорость жидкости уменьшается в 2 раза (L – расстояние между электродами). В этой области электрическое поле направлено в сторону, противоположную направлению движения жидкости, однако тормозящий эффект весьма мал.

При отношении заряда, инжектируемого с активного электрода к заряду, поступающему в объем с пассивного, равном от 1 до 2, формируется параллельно-струйное течение (в случае отношения 1 течение симметричное), наклонённое в сторону меньшего зарядообразования. При отношениях от 2 до 10 формируется хорошо выраженное сквозное течение, с увеличением скорости по мере увеличения отношения в указанных пределах. Однако значительное увеличение этого отношения может привести к локализации заряда исключительно в пределах пассивного электрода, что является следствием нехватки электрических сил, участвующих в отталкивании противоположного заряда.

Результаты моделирования качественно хорошо соотносятся с результатами эксперимента, что может свидетельствовать о корректности предположений и пренебрежений, сделанных в описанной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings of 7th Intern. Conf. On Cond. And Breakd. In Dielectric Liquids (I.C.D.L.), Berlin – West – Germany, 1981.
2. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. Физические основы электрогидродинамики. М.: Наука, 1979.
3. *Буянов А.В., Стишков Ю.К.* Особенности структуры ЭГД течения в симметричной системе электродов. VII международная научная конференция, 2003.
4. *Stishkov Yu.K., Buyanov A.V.* Electrodynamical Currents in a Wire-Wire Electrode System. Proceedings of the 14th International Conference on Dielectric Liquids, Austria, 2002.
5. *Buyanov A.V., Lazarev A.S., Stishkov Yu.K.* EHD flow structure modeling in wire–plane electrode system. Proceedings of the 5th international EHD workshop, France, 2004.
6. *Elagin I.A., Stishkov Yu.K.* Computer Simulation of Electrohydrodynamic Flow Formation Process using a Finite Element Method, Proceedings of the 5th International EHD workshop, France, 2004.
7. *Elagin I.A., Stishkov Yu.K.* The Investigation of the Recombination Area of Symmetric-Opposite EHD Flows, Proceedings of the 15th International Conference on Dielectric Liquids, Portugal, 2005.
8. Альбом течений жидкости и газа / Пер. с англ., сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986.

Поступила 02.01.07

Summary

In these terms we show the results of computer modeling of non-symmetric EHD flow in symmetric wire-wire electrode system. This problem was solved in Ansys program which is based on finite-elements method. We develop computer modeling of non-symmetric EHD flow algorithm in stationary variant which helps us to solve wide area of electrohydrodynamic problems. In these terms we show the results of solving the problem of symmetric and non-symmetric liquid flow in wire-wire electrode system. We researched a new type of charge diffusion. We saw a disruption of symmetry when the flow traces are in acute angle to central long axis of symmetry. In this case the non-symmetric EHD flow is generated.
