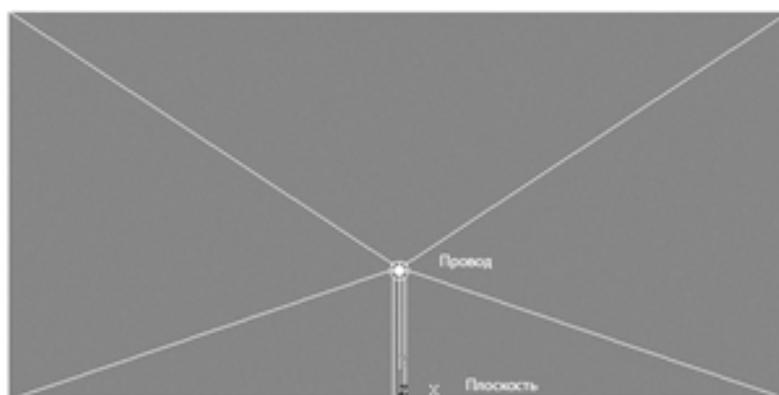


## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ ПРОВОД – ПЛОСКОСТЬ

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

Свойствам ЭГД-течений и методам их моделирования посвящено большое количество работ [1, 2]. В последнее время разработана методика компьютерной обработки ЭГД-течений [3], позволяющая восстанавливать распределение скоростей и ускорений в межэлектродном промежутке.

Цель работы – моделирование процесса установления ЭГД-течения в несимметричной системе электродов типа провод-плоскость (рис. 1) для изучения процесса формирования, развития и особенностей движения объемного заряда в межэлектродном промежутке.



*Рис 1. Геометрия задачи*

Существует ряд исследований о моделировании ЭГД-течений в данной системе электродов в стационарном случае [4, 5]. Работа [4] посвящена компьютерному моделированию структурных особенностей электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов типа провод (лезвие) над плоскостью.

В [5] показано, что при значительных межэлектродных расстояниях давление на большей части промежутка постоянно, имеются лишь локальные области пониженного (у активного электрода) и повышенного давления у плоского электрода, показано влияние этих зон на структуру течения. Спад эффективности ЭГД-течения наблюдается при перекрытии зон ускорения и торможения жидкости.

Также известно, что ЭГД-течения возникают с некоторой задержкой относительно момента включения напряжения. Это объясняется формированием некоторого заряженного слоя у поверхности электрода до начала формирования ЭГД-течения [6].

Вопрос о распределении объемного заряда на первом шаге нагружения требует особого обсуждения. Естественно положить, что в начальный момент заряд распределен в слое, имеющем форму окружности. Однако, как показали численные эксперименты [7], при таком распределении электрические силы симметричны относительно цилиндрического электрода и возникающие течения не имеют определенного направления. В то же время при униполярной инжекции возникающее распределение объемного заряда несимметрично относительно поверхности цилиндрического электрода, а вытянуто в направлении к плоскому электроду (рис. 2).

Отсюда логично определить начальную форму заряженной области как слегка смещенную в направлении к противоэлектроду. Из неподвижного заряженного слоя под действием кулоновских

сил возникает ЭГД-течение, которое перемещает электрический заряд вдоль линий тока. В результате этого заряженная область принимает форму узкой полоски, простирающейся от проволочного электрода к плоскому. Распределение плотности электрического заряда в новой области также считается однородным. Такие допущения правомерны, если ионы, образующие область объемного заряда, считаются вмороженными в жидкость, то есть электрическое число Рейнольдса значительно больше 10.

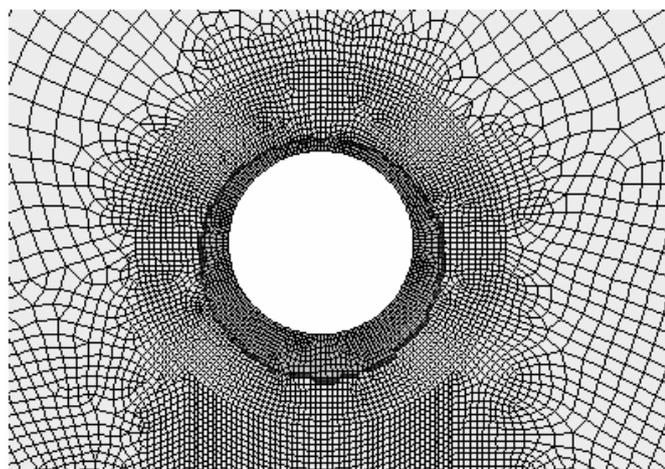


Рис. 2.

Система уравнений, описывающая моделируемый процесс, существенно нелинейна. Причиной нелинейности служит, например, зависимость электрического поля от величины объемного заряда. Одним из самых эффективных методов решения подобных математических задач является метод конечных элементов. В последнее время все большее распространение получают прикладные пакеты, реализующие этот метод для решения различных задач.

Для решения данной задачи моделирование проводилось при помощи конечно-элементного пакета ANSYS. При этом использовались электростатический, термический гидродинамический типы анализа. Для чего был разработан алгоритм, изложенный ниже, реализованный в виде пакета программ. Несмотря на очень богатые возможности пакета ANSYS/Multiphysics, решение переходной ЭГД-задачи при помощи стандартных средств пакета не представляется возможным. В основе алгоритма лежит идея, предложенная в [7].

На первом шаге решается электростатическая задача с однородным распределением объемного заряда, заданным в пределах кольца, и определенной разностью потенциалов (25 кВ) на электродах. Из полученного на первом шаге решения находится распределение кулоновских сил в заряженной области. Поле электрических сил вычисляется как произведение плотности объемного заряда на напряженность электрического поля в каждом узле сетки. После чего вычисленная плотность сил переносится в гидродинамическую часть анализа. Принципиальное отличие разработанного алгоритма от аналогичных состоит в том, что он позволяет моделировать развитие течения в динамическом режиме, причем не только продвижение заряда в глубь межэлектродного промежутка, но и отслеживать изменения толщины заряженной области.

Задача решается в приближении того, что заряд “вморожен” в жидкость [2], тогда в режиме ламинарного течения можно считать, что он переносится только по линиям тока жидкости. Миграция заряда в собственном и внешнем поле не учитывается, поэтому конфигурация формы заряженной области определяется при помощи построения линий тока жидкости, которое производится после расчета гидродинамической части задачи. Результатами расчетов гидродинамической части задачи являются векторное поле скоростей, распределение давления и собственно линии тока. Смещение заряженной области и форма области, занятой объемным зарядом, на последующем шаге рассчитываются с помощью специального набора процедур, написанного на языке интерпретатора Ansys.

На первой итерации определяется передний фронт заряженной области. Фронт представляет собой множество точек – кривую. Важная особенность состоит в том, что его ширина – величина динамическая, а возможные изменения формы ничем не ограничены, что позволяет выбрать достаточное количество точек на первой итерации. Перемещение передней границы рассчитывается как произведение скорости в каждой точке переднего фронта на время итерации. Боковая граница заряженной области строится по линиям тока жидкости. Граничные линии тока можно определить из сле-

дующих обстоятельств: форма переднего фронта нам известна, и считается, что первоначальная форма заряженного кольца, локализованного вокруг активного электрода, остается неизменной.



На второй итерации новое распределение объемного заряда передается в электростатическую задачу, рассчитываются новая плотность электростатических сил и распределение электрических сил на второй итерации, по которому решается гидродинамическая задача. Таким образом, организуется итеративный процесс. Между итерациями задачи переносится геометрия внешней границы заряженной области. Такой алгоритм позволяет достигнуть сравнительно высокой скорости работы программы.

Разработанная программа позволяет проводить численное исследование для различных начальных распределений и величин объемного заряда и напряжений. После получения всех входных данных она полностью работает в автоматическом режиме в течение всего времени расчета. По завершении каждого шага происходит автоматическая запись картин распределения объемного заряда и скоростей жидкости, позволяющих контролировать процесс решения.

Универсальность предложенного алгоритма и его модульная структура позволяют легко доработать его для расчета других конфигураций электродов.

В разработанной программе входными данными для автоматического расчета являются напряжение на электродах, величина плотности объемного заряда и его начальное распределение – геометрия смещенного кольца вокруг активного электрода и размер кольца. В области интереса – области распространения объемного заряда – сетка значительно измельчается.

#### **Результаты расчетов**

Исходные данные расчета: электроды-провод над плоскостью, двумерный случай, ширина кюветы 0,09 м; высота кюветы 0,03 м; радиус провода 0,00035 м; длина межэлектродного промежутка 0,01 м. Начальная плотность объемного заряда в кольце 0,01 Кл/м<sup>3</sup>, радиус начальной заряженной области 1,3\*r (r – радиус электрода), приложенное напряжение 25 кВ. На рис. 3 приведены последовательные стадии формирования заряженной струйки в моменты времени 0,005 с, 0,055 с, 0,090 с после включения напряжения, время задержки, необходимое для формирования заряженного кольца вокруг активного электрода, не учитывается. В нижней части рисунка линии тока течения внутри заряженной струйки.

Течение носит ламинарный, параллельно-струйный характер. Под электродом наблюдается существенное сгущение линий тока, что приводит к распространению весьма тонкой заряженной струйки.

На первом шаге линии тока жидкости лишь немного внедряются в глубь межэлектродного промежутка, образуя сильное сужение в приэлектродной области, напоминающее воронку, что и позволяет начать поступательное движение заряженной струйки. По мере продвижения заряженной

струи линии тока спрямляются, и участок параллельно-струйного течения. Шаг по времени выбран настолько малым, что появляется возможность детально отслеживать изменения линий тока по мере продвижения заряда. Как видно из рисунка, на конечных этапах область параллельно-струйного однородного течения занимает большую часть межэлектродного промежутка, причем толщина заряженной струйки составляет долю от толщины заряженного кольца.

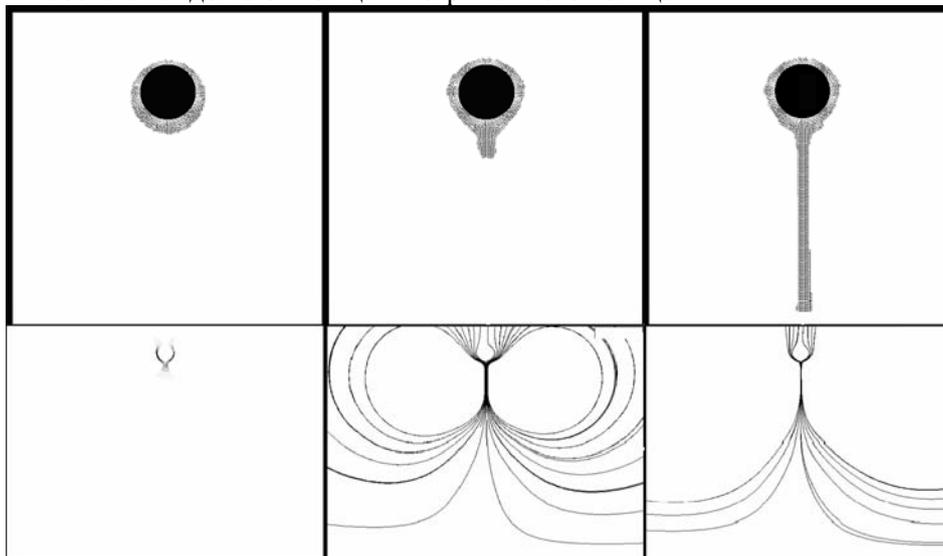


Рис. 3.

На рис. 4 выведены графики распределения давления вдоль межэлектродного промежутка: слева – в начальный момент времени, справа – динамика изменения в последующие моменты времени. Под электродом формируется локальная зона пониженного давления, за которой следует зона повышенного давления. Эта зона связана с началом развития течения. Из правой части рисунка видно, как зона повышенного давления по мере продвижения заряженной струйки к противоэлектроду также смещается к нему. Пик избыточного давления соответствует внешней границе заряженной струйки. Под активным электродом заряженная область имеет форму воронки, с продвижением фронта заряженной области в глубь межэлектродного промежутка приэлектродная структура линий тока и области пониженного давления остается неизменной. Причиной сгущения линий тока под активным электродом является наличие области пониженного давления. Пониженное давление под активным электродом является своего рода «насосом течения» и характерно для любого момента развития течения.

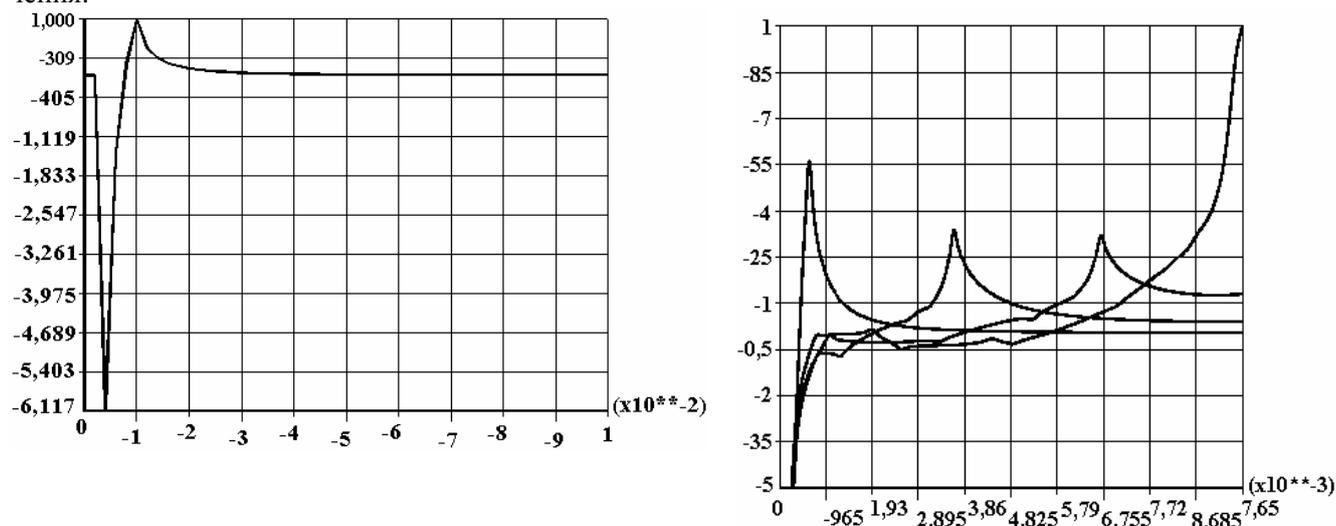


Рис. 4. Распределение давления у активного электрода (слева) и динамика распространения зоны повышенного давления (справа). Величина давления нормирована на максимум, который возникает у противоэлектрода при приближении заряженной струи. Распределения давлений приведены для 0,06, 0,085, 0,185 и 0,285 секунды после начала движения

На рис. 5 приведены распределения скорости и ускорения вдоль межэлектродного промежутка по центру заряженной струйки для следующих моментов времени с начала движения: 0,06, 0,11, 0,16, 0,245, 0,285 сек.

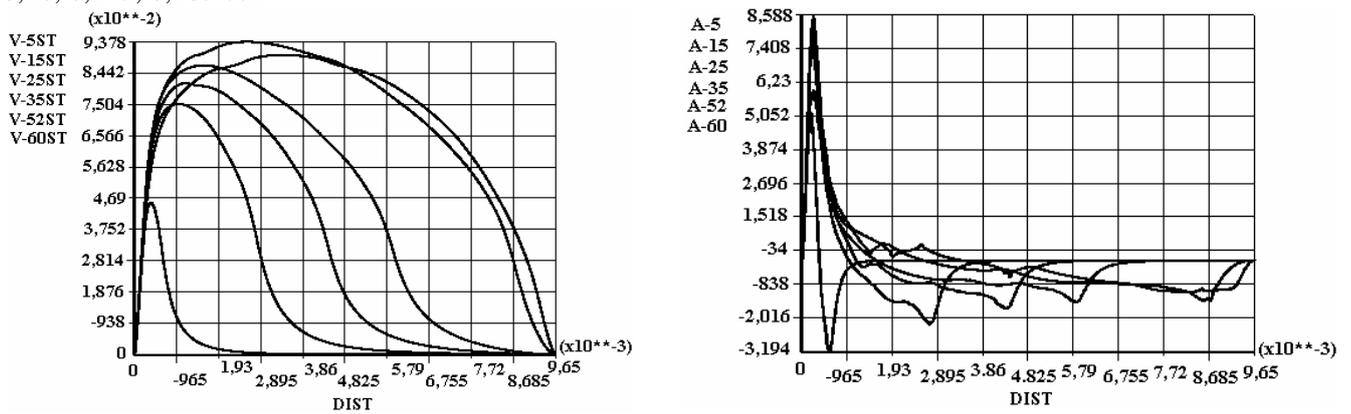


Рис. 5. Распределения скоростей и ускорений вдоль межэлектродного промежутка в различные моменты времени

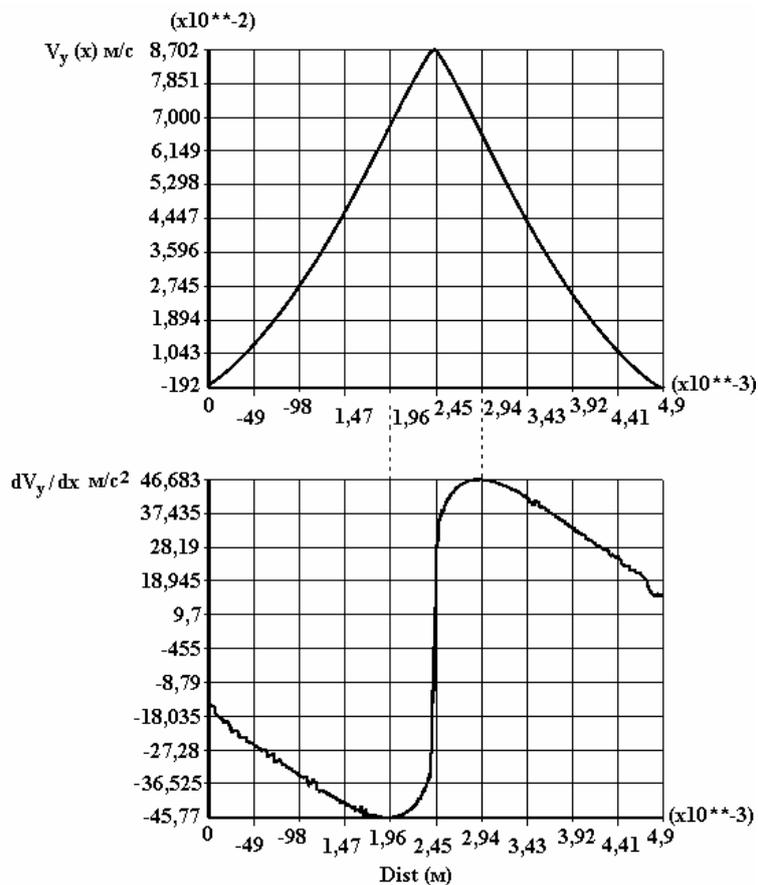


Рис 6. Продольная составляющая скорости и ее производная по поперечной координате

На графике скорости видно, что в непосредственной близости к активному и пассивному электродам имеются тонкие, прилипшие слои неподвижной жидкости.

На графике ускорения и скорости хорошо видны три зоны течения. Можно выделить зону интенсивного ускорения, соответствующую воронкообразной части течения (рис. 3), зону плавно изменяющегося течения, соответствующую параллельно-струйной части заряженной струйки, и зону торможения.

Для любой стадии развития течения зона ускорения практически сохраняет свою структуру и находится в непосредственной близости к активному электроду в области зоны пониженного давления. Зона торможения, соответствующая зоне повышенного давления (рис. 4), распространяется в глубь межэлектродного промежутка до противоэлектрода и соответствует внешней границе заряжен-

ной струйки. Как только заряженная струйка достигает противоэлектрода, структура течения перестает изменяться. Заряженная струйка раздваивается и распространяется вдоль поверхности противоэлектрода, на некотором расстоянии от его поверхности. Здесь происходит рекомбинация заряда, пришедшего от активного электрода с противозарядом, поставляемым с плоского электрода. Поэтому размеры заряженной струйки в поперечном направлении ограничены. В расчетах они составляют не более 10% от длины МЭП.

На рис. 6 приведен график продольной составляющей скорости и ее производной по поперечной координате. Начало координат расположено в середине межэлектродного промежутка, левее центральной струи, точка перехода через ноль – в ее середине. Видно, что эта величина испытывает излом на границах заряженной области. Внутри области действия сил производная возрастает от середины к границе, а вне заряженной области спадает, что соответствует переходу к пассивной части центральной струи, где течение формируется под действием вязких сил.

**Заключение.** Результатом работы явилось численное моделирование процесса установления ЭГД-течения в приближении вмерзлости заряда, основанное на предположении о том, что на первичной стадии процесса вокруг активного электрода формируется заряженная кольцеобразная структура, из которой на более поздних стадиях вытягивается тонкая заряженная струйка жидкости, определяющая структуру и свойства ЭГД-течений. Алгоритм моделирования учитывает ширину исходного заряженного кольца и его форму. В результате численного моделирования были получены контурные и векторные поля скоростей, распределения давлений, линии тока на различных стадиях развития течения.

Показано и проанализировано формирование зонной структуры ЭГД-течения, многократно наблюдаемой в экспериментах.

Под проволочным электродом существует зона пониженного давления, а перед заряженной струей появляется зона повышенного давления, которая и обуславливает наличие зоны торможения жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стишков Ю. К., Буянов А. В., Лазарев А. С.* Моделирование структуры ЭГД-течений в несимметричной системе электродов // Сборник докладов VI Международной научной конференции по современным проблемам электрофизики и электрогидродинамике жидкостей. 2003. С. 259–262.
2. *Стишков Ю. К., Остапенко А. А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Издательство Лен. университета, 1989. С. 174.
3. *Ostapenko A. A., Pavleyno M. A., Stishkov Y. K.* Velocity and power fields electro hydrodynamics flows. Annual 1999 Conference on electrical insulation and dielectric phenomena. Austin. USA. 1999.P. 246–250.
4. *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.A V.
5. *Buyanov A.V., Dernovsky V L. and Stishkov Yu.K.* Interelectrode Gap Size Influence on EHD Flow Kinematics, International Symposium on Electric Insulating Materials, Japon, 2005.
6. *Стишков Ю.К., Жмаев Н.А., Яруничев А.В.* Переходные процессы, сопровождающие возникновение электрогидродинамических течений в жидких диэлектриках // Магнитная гидродинамика. 1989. № 2.
7. *Шапошников А.М., Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* Моделирование коронного разряда в FEMLAB. // Сборник докладов VI Международной научной конференции по современным проблемам электрофизики и электрогидродинамике жидкостей. 2003. С. 293–296.

*Поступила 16.01.07*

## Summary

The object of this work is nonstationary ehd-flow modeling in wire-plane electrode system for researching processes of volumetric charge forming and evolution, also peculiarities of one's moving in the interelectrode gap are researched. Equations set, describing modeling process appreciably nonlinear. Final-element modeling package ANSYS was used for this problem solution. Special algorithm was developed. It was realized as a package of programs, based on approximation, that charge is “frozen” in liquid. Results of calculations are presented as velocity vector plot evolution, pressure distributions and ehd-flow traces. Typical peculiarity of ehd-flow is forming of thin charged stream, which cross interelectrode gap.