



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ  
"ОБРАЗОВАНИЕ"



**Проект «Инновационная образовательная среда в классическом университете»**

Пилотный проект № 22 «Разработка и внедрение  
инновационной образовательной программы «Прикладные математика и физика»»

Физический факультет

Научно-образовательный центр «Электрофизика»

**И.А.Елагин, Ю.К.Стишков**

# **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ**

## **Раздел 3. Компьютерное моделирование ЭГД-течений**

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург  
2007

УДК 536.2, 53.04, 53.05

- Рецензент: д.ф.м.н. проф. Ключарёв А.Н.
- Печатается по решению методической комиссии физического факультета СПбГУ.
- Рекомендовано Ученым советом физического факультета СПбГУ.

**И.А.Елагин, Ю.К.Стишков**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.  
РАЗДЕЛ 3. Компьютерное моделирование ЭГД-течений – СПб., 2007**

Учебно-методическое пособие к курсам специальных дисциплин «Введение в электрофизику», «Физические процессы в жидкостях и газах при воздействии сильных электрических полей».

В работе рассмотрены основные приемы компьютерного моделирования электрогидродинамических течений в программных пакетах ANSYS, Comsol и др., приведены алгоритмы моделирования и примеры некоторых оригинальных программ. Особое внимание уделено обсуждению и анализу результатов моделирования. В пособии использованы материалы научно-исследовательских работ и программы студентов направления «Прикладная математика и физика» физического факультета Санкт-Петербургского государственного Университета: Глущенко П., Дерновского С., Чиркова В., и др.

Пособие предназначено для студентов 4-6-го курсов и аспирантов направления «Прикладная математика и физика» специализирующихся в области тепло- и электрофизики.

## Оглавление

Оглавление .....	3
Компьютерное моделирование ЭГД-течений .....	4
Модельная задача с однородным распределением сил в области интереса .....	6
Моделирование течений в Comsol Multiphysics.....	7
Моделирование ЭГД-течений в несимметричной системе электродов провод- плоскость [12,20,20-30].....	15
Алгоритм моделирования .....	16
Исследование зависимости структуры ЭГД-течения от скорости спадания заряда между электродами вдоль заряженной струи и от ширины этой струи .....	17
Исследование зависимости структуры ЭГД-течения от радиуса активного электрода [25,31].....	24
Исследование влияния размеров межэлектродного промежутка на кинематику ЭГД-течений [15,23].....	33
Сравнительный анализ течений с функциональной и постоянной нагрузкой	38
Решение ЭГД-задачи итерационным методом в FEMLAB [10,16,20,24,25,31]..	43
Моделирование стационарных течений в системе игла над плоскостью [24,30] .....	53
Подробное описание алгоритма моделирования.....	56
Результаты решения и их анализ.....	59
Моделирование процесса установления электрогидродинамических течений в ANSYS .....	70
Введение .....	70
Метод моделирования .....	70
Формирование и развитие ЭГД-течения .....	75
Исследование зоны рекомбинации в боковых струях ЭГД течений [26,17] ...	85
Моделирование нестационарных ЭГД-течений в несимметричной системе электродов типа провод-плоскость [21,22,33].....	91
Результаты расчетов .....	95
Моделирование сквозного ЭГД-течения [18,32] .....	99
Литература .....	109

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

## Раздел 3

### Компьютерное моделирование ЭГД-течений

Среди задач электрофизики наиболее фундаментальной остается задача об электризации среды, то есть задача о нахождении пространственных распределений электрического поля  $E(r)$  и плотности электрических зарядов  $\rho(r)$ , где  $r$  – радиус–вектор рассматриваемой точки пространства. Эти функции должны быть найдены из сложных (нелинейных) уравнений электрогидродинамики, включающих в себя совокупность уравнений как гидродинамики (Навье-Стокса), так электрохимии и электродинамики (Нернста-Планка-Максвелла).

Ввиду того, что в уравнениях электрогидродинамики все переменные (электрическое поле, заряд, ток, скорость, давление и т.д.) зависят друг от друга, их решение напрямую пока не представляется возможным, а возникающие эффекты, исследованные экспериментально, очень интересны и нуждаются в теоретическом описании. С возникновением достаточно мощной компьютерной техники появилась возможность моделирования реальных геометрических объектов с довольно сложными постановками задач [1-5] (уравнения, граничные условия). ЭГД-уравнения решаются с некоторыми приближениями, в упрощенных постановках, рассматриваются разные допущения, когда пренебрегают теми или иными особенностями уравнений. Для того чтобы понять, справедливы ли сделанные предположения в постановке задачи, необходимо сопоставлять данные проведенного моделирования с экспериментальными данными. Поэтому ряд работ посвящен экспериментальному исследованию ЭГД-течений для различных геометрий электродов, с различными жидкостями (и газами) [11]. Часто рассматриваются так называемые ЭГД-насосы, в которых рабочая жидкость перекачивается с помощью подачи на электроды разных потенциалов. Для возникновения ЭГД-течения необходима большая разность потенциалов (десятки киловольт) и высокая локальная неоднородность электрического поля в области электрода. Поэтому часто используются электроды в виде тонкого провода, острия или иглы, они создают высоконеоднородные поля, вызывающие инжекцию заряженных частиц с электрода. Например, в работе [6] рассматривается моделирование электрофилтра. В объемных ячейках движется газ с постоянной скоростью, перпендикулярно течению расположены острые электроды, на которые подается большой потенциал, напротив располагается заземленная пластина. Возникающие ЭГД-течения создают завихрения газа в ячейках, двигающегося изначально с постоянной скоростью. Расчет электрического поля и плотности объемного заряда произведен итеративно с помощью метода конечных разностей при некоторой упрощенной постановке электростатической задачи с объемным зарядом. Итерации проводились для

достижения баланса между зарядом, током и электрическим полем, исходя из неких начальных и граничных условий. Дальнейший расчет течений проводился с помощью *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE)*, внешней силой считалась объемная кулоновская сила.

При численных моделированиях чаще всего используют упрощенные модели типа плоских случаев, электрод рассматривается в виде гиперболы, прямоугольника, окружности и т.д. В работе [1], например, рассматривается прямоугольный электрод. Считается, что заряд образуется из-за диссоциации молекул в жидкости под действием сильного электрического поля. Аналогично вышеописанному моделированию считается, что движение жидкости вызывается кулоновскими силами, которые используются в уравнении Навье-Стокса. При численном моделировании проводится итеративное решение уравнений, дискретизация основана на методе конечных объемов. Представлены графики распределения электрического поля, потенциала, заряда, сил, скоростей.

Случай моделирования гиперболического электрода рассмотрен в работе [4], противоэлектродом является плоскость, задача двумерная. Предполагается инжекция заряженных частиц с электрода, причем она зависит от величины электрического поля. Считается, что заряд распространяется в виде узкой струйки от гиперболического электрода. Для расчетов использовался метод конечных элементов и частиц. В конечно-элементной модели используется квазирегулярная сетка, построенная по линиям электрического поля для построения гладкого распределения заряда. Приводятся графики осевых распределений заряда, поля скоростей, тока. Распределения имеют характерный вид, качественно схожий с результатами экспериментов. В работе [3] рассматривается аналогичная геометрия. На электрод подается переменное напряжение с частотой 50 Гц амплитудой 24 кВ. Для решения уравнений используется метод конечных разностей. Считается, что силой, вызывающей ЭГД-течения, является кулоновская сила, действующая на положительный заряд в двойном приэлектродном слое. Показаны распределения тока и заряда в зависимости от времени, преобладает ток, вызванный течением, а не проводимостью. Показаны распределения скоростей в кювете, они имеют довольно хаотичный характер из-за изменяющегося напряжения.

Необходимо отметить, что в данный момент конечно-элементные методы решения, или идентичные им, являются основополагающими при расчете подобных сложных задач. Отличаются моделирования постановкой задачи, сделанными приближениями, в частности, механизмом возникновения и распространения заряда в жидкости: конвекция, миграция, диффузия. Учесть одновременно эти члены очень сложно, поэтому в работах используются те или иные предположения о том, какие механизмы преобладают в каком-то конкретном случае. Задача усложняется, если в расчет принимаются другие явления, например термогравитационная конвекция, когда электрод нагревается.

В работе [2] проводится численное моделирование электро-термо-конвективного движения в плоской ячейке диэлектрической жидкости. Рассматривается влияние ЭГД-эффектов на термоконвективное движение. Решаются уравнения сохранения, связываются соответствующие ЭГД и тепловые уравнения, используется метод конечных объемов. Расширенный метод Лагранжа превращает уравнение Навье-Стокса в вариационную задачу. При включении инжекция заряда с одной из пластин и задании разности потенциалов на пластинах картина течений изменяется, при этом рассмотрен переходной анализ. Рассчитано влияние электрического поля на перенос тепла, что может найти применение в промышленности.

Большое количество работ посвящено экспериментальному исследованию ЭГД-течений, расчетам полезных в промышленности устройств (электрофилтры, ЭГД-насосы и т.д.). В этих работах приводятся модели, наиболее подходящие для определенных целей. Интересны также экспериментальные исследования для простых геометрий, когда полученные данные можно сравнить с теоретическими расчетами и понять, насколько правдоподобные результаты дает моделирование. В работе [5], например, рассматривается движение воздуха в системе электродов игла-плоскость, когда возникает коронный разряд. Процесс визуализируется с помощью дыма, который запускается в рабочую область. Представлены результаты измерения вольтамперных характеристик положительной и отрицательной короны, графики распределения скоростей в кювете (контурный, осевые, профили). Представлена зависимость максимальной скорости газа от величины электрического тока, а также от подаваемой мощности (эффективность). Такие данные очень удобно использовать при численном моделировании процесса.

### **Модельная задача с однородным распределением сил в области интереса**

Классические задачи гидродинамики включают: обтекание тел, либо течения в трубах. Наряду с этим в природе существует класс течений с объемной нагрузкой. К этому классу задач относятся естественная конвекция, электро- и магнито- гидродинамические течения.

Свойства такого рода течений к настоящему времени изучены недостаточно полно. Для анализа общих свойств течений с объемной нагрузкой были решены простые модельные задачи, в которых объемная нагрузка задавалась в некоторой области пространства и имела достаточно простую геометрию. Наиболее простой вариант – это тот, в котором распределение сил однородно и однонаправлено в заданной области, а область имеет вид узкой полоски. Этот расчет позволит сделать общие выводы о структуре течений с объемной нагрузкой, получаемой при моделировании в конечно-элементном пакете. Геометрия такого простого варианта представлена на рис.3.1.

## Моделирование течений в Comsol Multiphysics

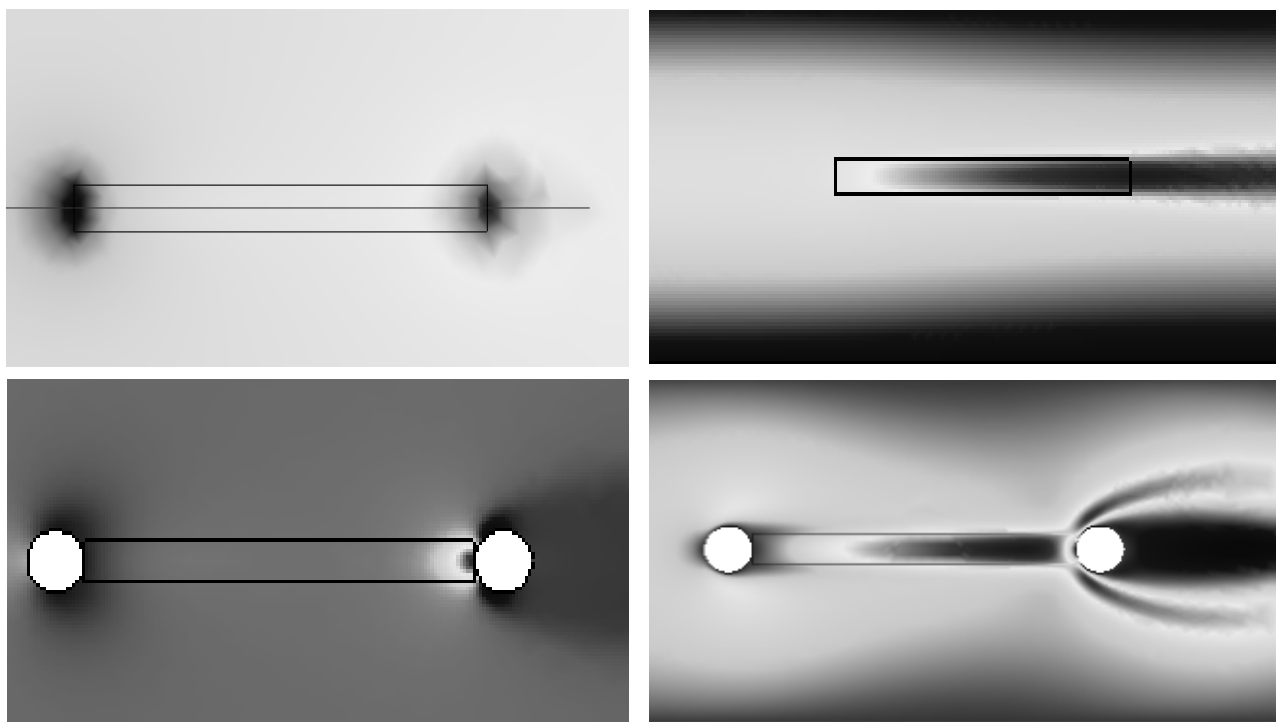
Система *Comsol Multiphysics* разработана Шведской фирмой *Comsol*. *Comsol Multiphysics* (далее *Comsol*) – интерактивная среда для моделирования и имитации физических полей в технических устройствах. Почти все физические процессы описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Эти уравнения являются фундаментальным базисом для основных законов науки. Многопрофильные физические (*Multiphysics*) возможности системы *Comsol* позволяют одновременно моделировать любую комбинацию различных взаимосвязанных физических полей. Поддерживается два способа моделирования: «физическое моделирование», т.е. содержит готовые к использованию прикладные режимы, в которых можно просто задавать параметры и характеристики материальных свойств среды, и моделирование, «основанное на уравнениях», позволяющее в явной форме задавать дифференциальные уравнения в частных производных и пространственные распределения их параметров. Используя многогранные (мультифизические) возможности, можно комбинировать оба способа моделирования. *Comsol* используется в ряде дисциплин, включая такие как: акустика, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, теплопередача, явления переноса вещества и др. *Comsol* имеет специализированные модули: Модуль Химических технологий (явления переноса и химические реакции в реакторах и аппаратах); Модуль Электромагнетизма (прикладные режимы моделирования распространения волн и высокочастотного анализа в микроволновой технике и фотонике); Моделирование статических и квазистатических полей в электрических машинах и системах с постоянными магнитами; Модуль Строительной механики (статический и динамический анализ, а также задачи на собственные частоты в теории упругости). Изложенное дает все основания, чтобы использования *Comsol* для моделирования ЭГД-процессов.

Если говорить о выборе пакета *Comsol Multiphysics*, то, начиная с самого начала задачи – построения геометрии, у данной системы уже наблюдаются существенные преимущества перед другими [31]. *Comsol* предлагает более удобный интерфейс для построения геометрии, так же здесь гораздо проще построен процесс построения сетки, он вообще автоматизирован и имеет набор самых необходимых настроек. Одним из важных факторов является машинное время, затрачиваемое на расчет задачи. При схожих результатах решения задачи *Comsol* требуется гораздо меньше время на его получение, чем другим системам.

Исходной модельной задачей является моделирование течения в сквозном канале при наличии объемной силы [16]. Для этого задается прямоугольная область, в пределах которой сила однородна и имеет только соосную со струйкой составляющую (рис.3.1). Граничные условия – нормальная к верхней и нижней стенкам компонента скорости равна нулю, на

вставках – условия прилипания, на входе в канал давление равно нулю, на выходе – свободная граница.

На рис.3.1 представлены результаты решения – контурные графики давления и скорости течения в свободной жидкости и при наличии твердых круговых вставок.

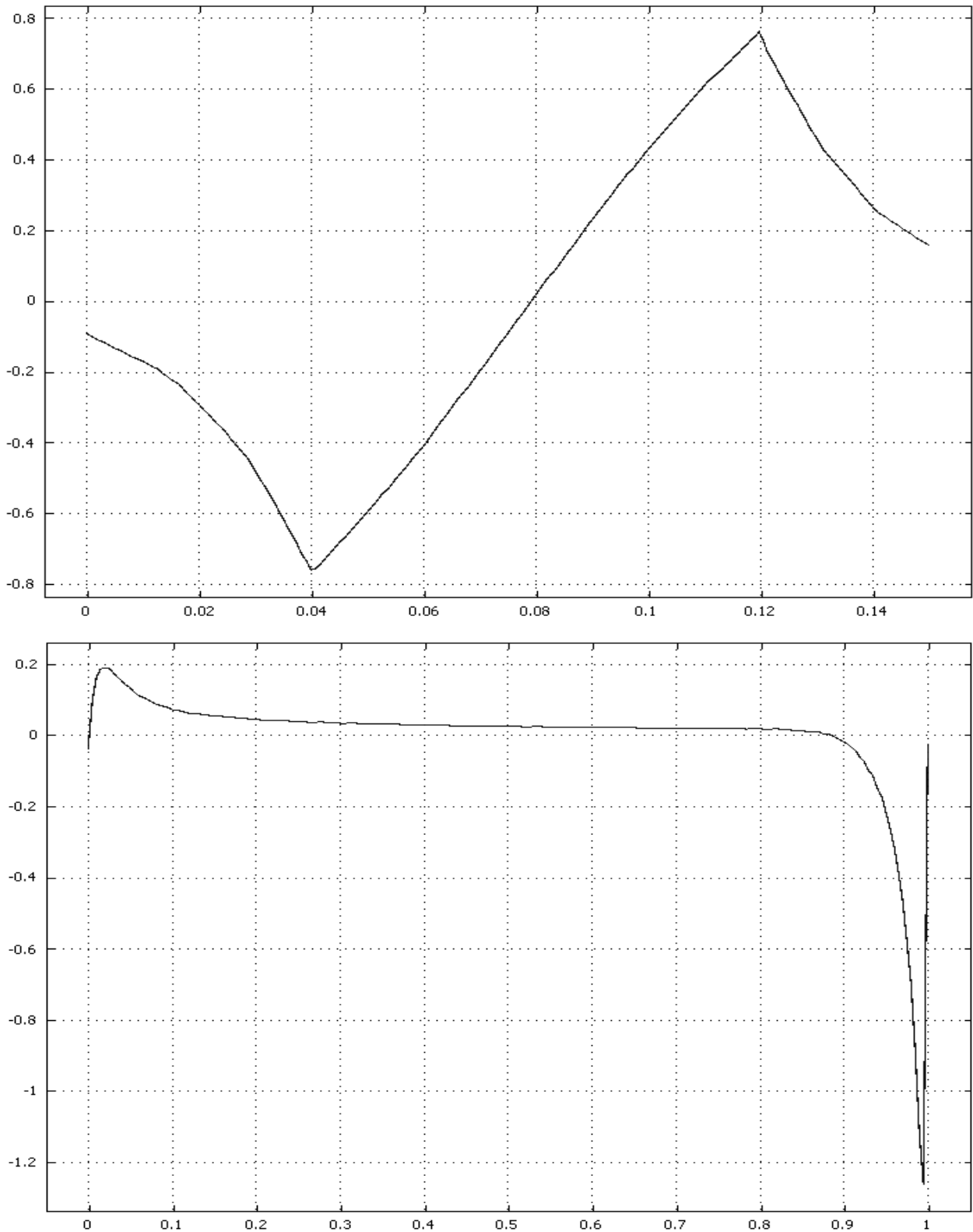


*Рисунок 3.1. Контурные графики давлений (слева) и скоростей (справа) для течений с препятствиями (внизу) и без них (вверху).*

В свободной жидкости наблюдаются области пониженного и повышенного давления в левой и правой части полосы приложения сил. Из области приложения сил формируется струйка жидкости, ускоряющейся на участке действия сил. Следует заметить, что течение с объемной нагрузкой направлено из области пониженного давления в область повышенного. Эта ситуация естественна, т.к. ускорение происходит из области неподвижной жидкости и поэтому у левой границы наблюдается разряжение. Размеры области разряжения не превышают удвоенных поперечных размеров полосы приложения сил. Продольная компонента скорости растет на протяжении всей области приложения сил, далее наблюдается спад скорости.

Наиболее информативными являются распределения производных продольной и поперечной компонент скорости. Линейные графики распределений производных компонент скорости: поперек и вдоль струйки представлены на рис.3.2.





**Рисунок 3.2.** Производные  $X$ -компоненты скорости в свободном пространстве по пространственным координатам: по  $Y$ –сверху, по  $X$ –снизу.

Видно, что в свободном пространстве производная  $X$ -компоненты скорости практически постоянна вдоль силовой струйки за исключением начальной и конечной части. Что касается поперечной производной, то она

претерпевает излом на границе области приложения сил, что является отличительным признаком перехода от силового течения внутри струи к вязкому снаружи. Этот эффект можно использовать для определения реальной толщины области приложения сил в течениях с объемной нагрузкой по данным об их кинематической структуре.

При наличии твердых препятствий картина усложняется: у левого (начального) препятствия по-прежнему сохраняется область разряжения, а у правого (заднего) препятствия область сжатия локализуется в лобовой его части, давление в ней повышается, а струйка раздваивается, обтекая вставку. За вставкой появляется зона завихрений.

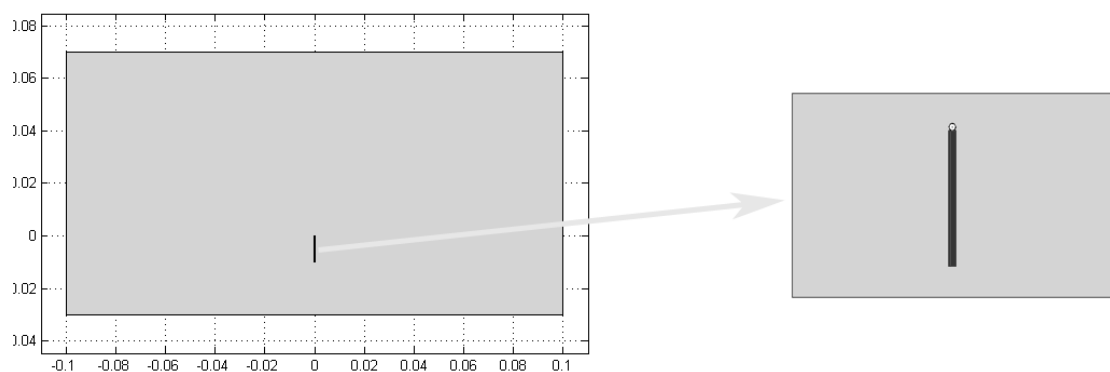
При моделировании течений с объемной нагрузкой решается система уравнений гидродинамики, включающая уравнение Навье-Стокса с внешней силой (3.1) и уравнение неразрывности.

$$\gamma \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla \vec{v}) \right) = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + F \quad (3.1)$$

Внешняя сила  $F$  в задачах электрогидродинамики (ЭГД), магнитной гидродинамики (МГД) или естественной конвекции определяется по-разному. В задачах ЭГД – это кулоновская сила, в задачах МГД – это магнитная сила, а в задачах естественной конвекции – это сила Архимеда.

Однако независимо от природы действующих сил все течения с объемной нагрузкой имеют общие черты. Как правило, эти течения реализуются в замкнутых объемах. Течения от нагретых тел и ЭГД-течения имеют твердые источники тепла или заряда, соответственно, а магнитогидродинамические течения – источники тока.

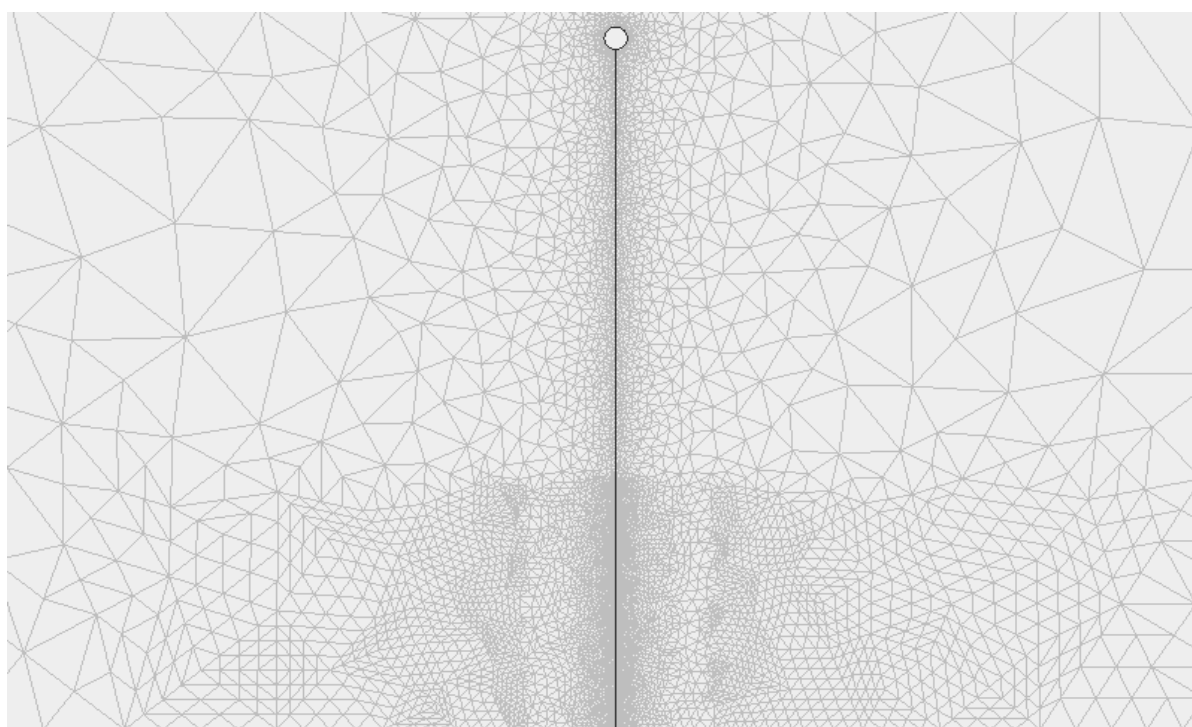
Поэтому рассмотрим течения с объемной нагрузкой возникающие в замкнутом объеме с некоторыми твердыми вставками в объеме. Рассмотрим внутреннюю двумерную гидродинамическую задачу в прямоугольной кювете с нагрузкой в виде прямоугольной области в центральной части кюветы (рис.3.3), эта область выделена темным цветом [10]. В ней задается постоянная, равная константе, сила, направленная к нижней границе кюветы. Полоска определения силы контактирует с цилиндрической твердой вставкой. В случае электрогидродинамического течения твердой вставкой может быть электрод, в случае естественной конвекции – нагреватель.



**Рисунок 3.3.** Геометрия задачи для гидродинамической задачи. Красная полоска – область задания силы.

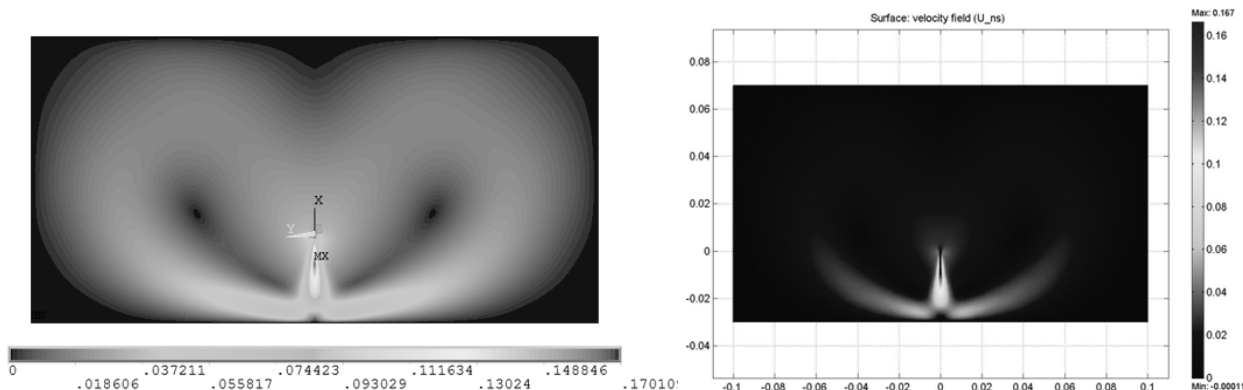
Такое распределение силы в виде полоски было выбрано из следующих соображений. При развитом ЭГД-течении с большим значением электрического числа Рейнольдса, заряд, образующийся у цилиндрического электрода, при движении к плоскому не успевает расплыться в направлении перпендикулярном движению. Поэтому область локализации заряда имеет форму полоски шириной равной диаметру электрода. Реальное распределение сил в заданной области сложнее, еще сложнее выявить соответствие его с распределением скоростей в кювете. Поэтому на первом этапе задавалось однородное распределение сил и моделировалось течение с таким распределением.

Для полной постановки задачи остается задать граничные условия. На всех стенках кюветы и поверхности круглого электрода задаётся нулевая скорость жидкости.



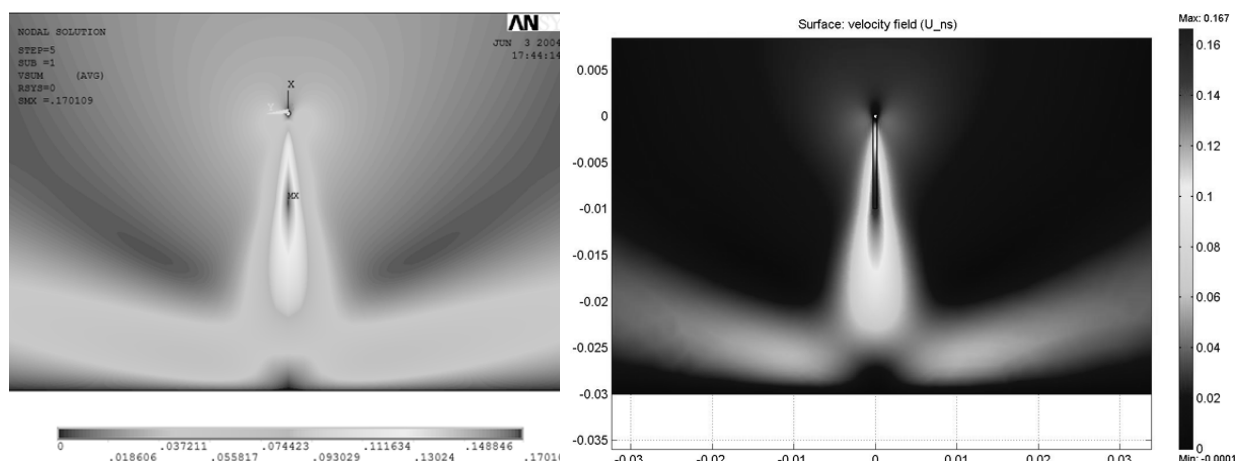
**Рисунок 3.4.** Построение сетки для решения задачи

При построении сетки учитываются области интереса, в которых возможны повышенные градиенты искомых функций. В этих областях размеры сетки существенно уменьшены (рис.3.4).



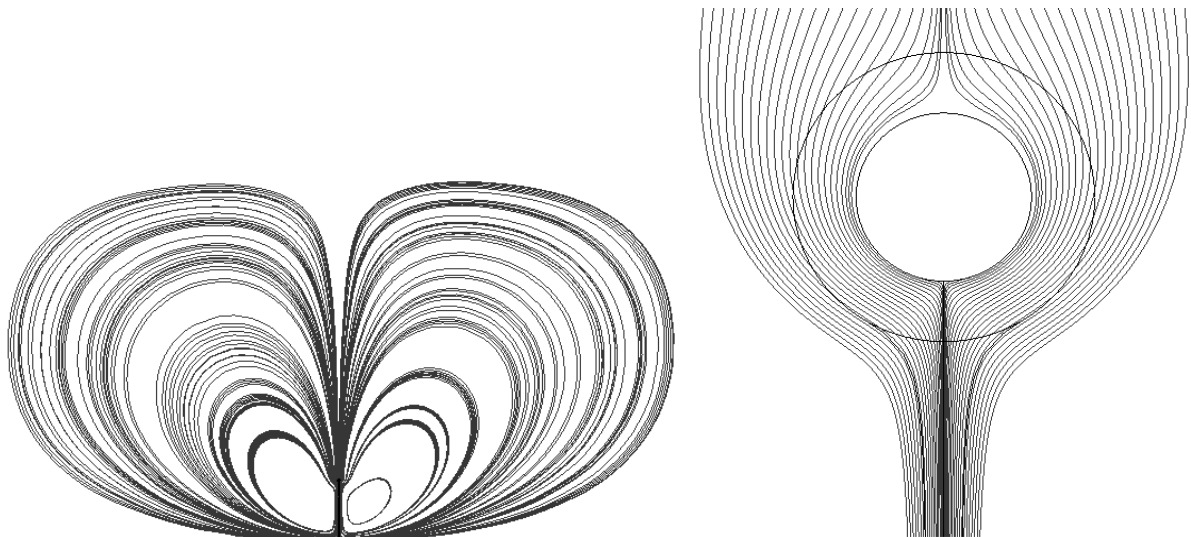
**Рисунок 3.5.** Распределение скоростей в кювете.

После решения модельной задачи с однородным распределением сил в области интереса получаем следующие результаты (рис.3.5, 3.6).



**Рисунок 3.6.** Увеличенное изображение распределения скоростей в межэлектродном промежутке.

Течение с объемной нагрузкой представляет собой узкую струю, направленную вдоль полосы приложения сил от круглой вставки к нижней границе и имеет ламинарный параллельно-струйный характер (рис.3.7). Течение имеет зонную структуру: можно легко выделить неподвижные области около электродов, зону ускорения и зона торможения. Причём граница зоны разгона находится в точке прекращения действия силы, она же соответствует точке максимальной скорости, то есть точке окончания действия объемной силы. Это утверждение нарушается, если длина полосы становится равной величине межэлектродного промежутка.



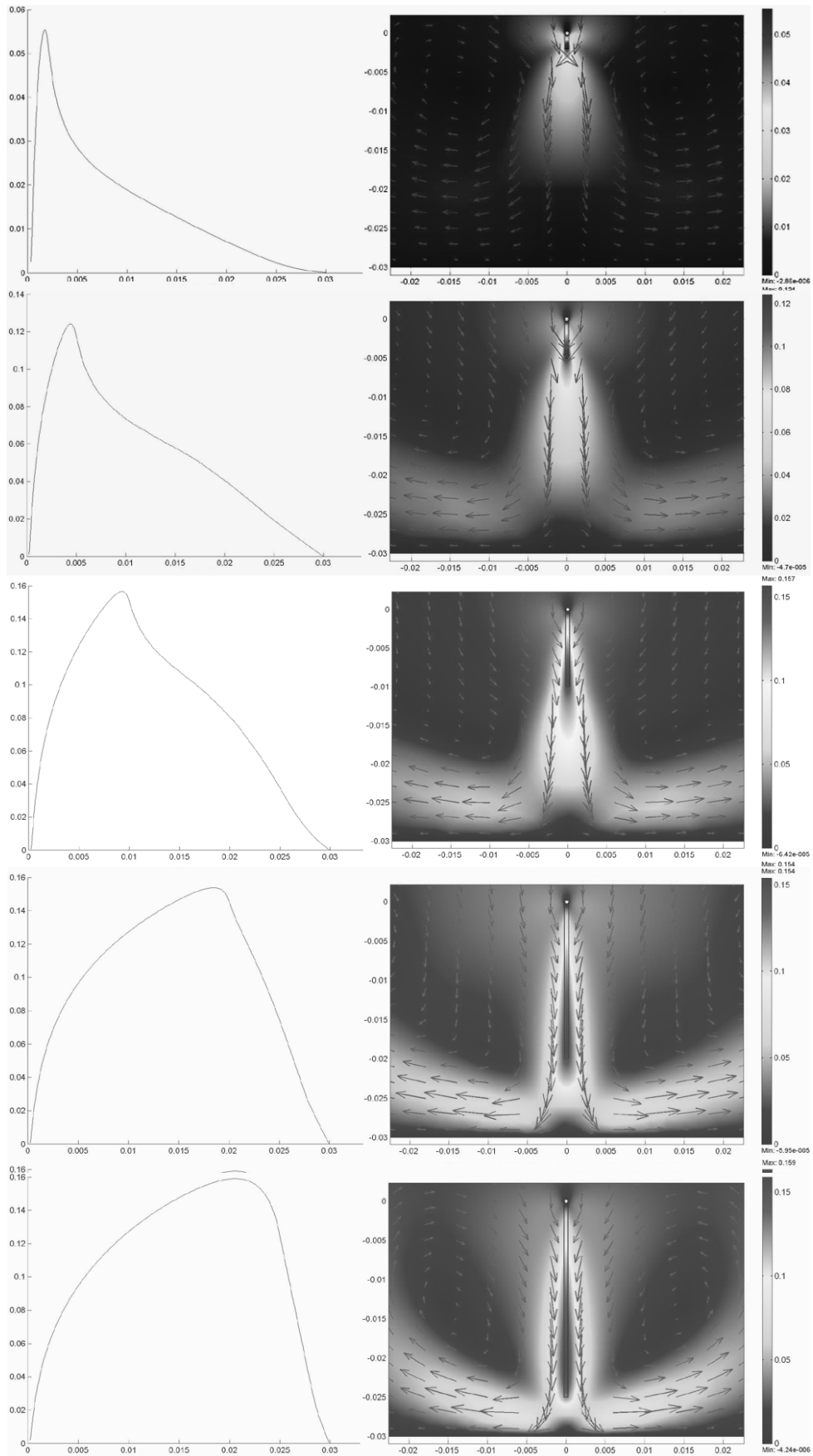
*Рисунок 3.7. Линии тока в межэлектродном промежутке*

Во время расчетов были рассмотрены разные варианты длины полосы действия силы (рис.3.8).

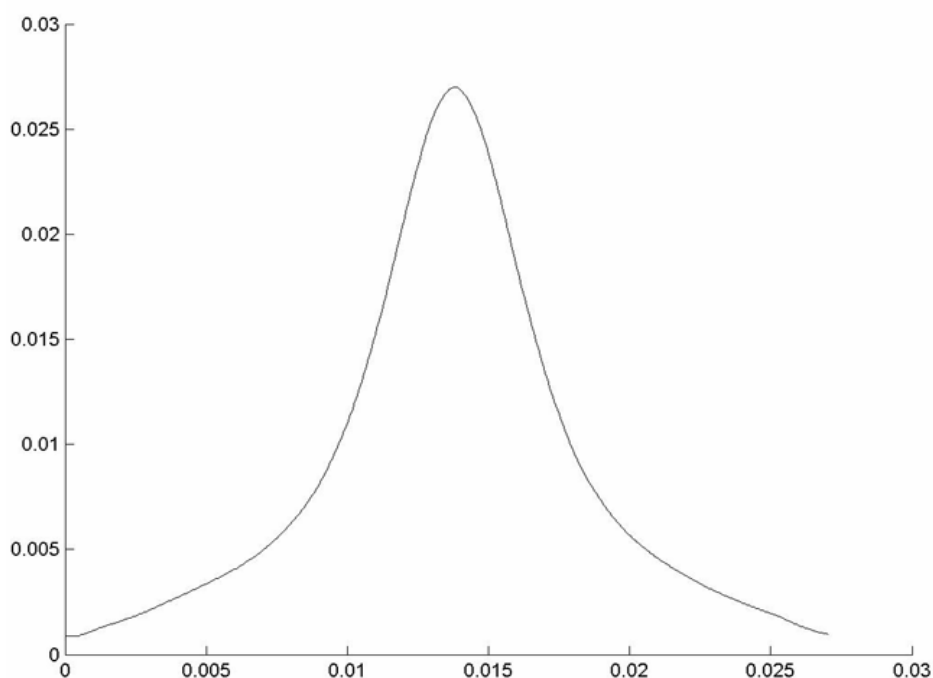
Как видно, при изменении длины области действия силы, структура течения, описанная выше, не нарушается. Сохраняется зонная структура. Изменяется только максимальное значение скорости, значение которой растёт вместе с увеличением длины области действия силы. Однако данный рост прекращается при условии, что точка максимальной скорости близка к плоскому электроду. Стоит отметить, что все рассмотренные течения на уровне центров завихрений имеют Гауссов профиль (рис.3.9).

Таким образом, можно сформулировать общие свойства течений возбуждаемых однородной объемной силой, сосредоточенной вдоль выделенной полоски при наличии твердых препятствий:

- течение направлено вдоль полосы действия силы, имеет короткую зону ускорения и область квазиоднородного течения,
- торможение жидкости при отсутствии преград начинается на уровне окончания силовой нагрузки, а при наличии преграды непосредственно перед ней,
- профиль скорости течения имеет Гауссов характер, производная продольной составляющей профиля скорости по поперечной координате испытывает излом на уровне границ области приложения силы,
- у начала полоски приложения сил имеется область пониженного давления, а в конце – область повышенного давления, наличие твердых препятствий на торцевых границах полоски приложения сил усиливает описанный эффект.



*Рисунок 3.8. Различные варианты длины области действия силы. Слева – осевые распределения, справа – контурный график с векторным полем.*



*Рисунок 3.9. Гауссов профиль скорости течения жидкости на уровне центров завихрений. По оси  $x$  отложена скорость, по оси  $y$  – координата.*

### **Моделирование ЭГД-течений в несимметричной системе электродов провод-плоскость [12.20,20-30]**

Данный раздел посвящен компьютерному моделированию стационарных ЭГД-течений, возникающих при униполярной инжекции с цилиндрического электрода расположенного над плоским электродом (двумерный случай).

Скорость приэлектродных реакций сильно зависит от напряженности электрического поля в этой области, поэтому, как правило, в системах, не обладающих геометрической симметрией, течение направлено от электрода с меньшим радиусом кривизны. Такой электрод обычно называют активным.

Выше приводились результаты компьютерной обработки экспериментальных данных по исследованию ЭГД-течений. Обтекание электрода имеет безотрывный характер, линии тока за электродом сходятся, образуя тонкую струйку, в которой они параллельны центральной силовой линии электрического поля. Непосредственно к поверхности электрода примыкает приэлектродный слой, в пределах которого плотность электрического заряда и плотность кулоновских сил наиболее высока, а скорость электрогидродинамического течения очень мала. Жидкость, обтекая электрод, сносит заряд из этой зоны вглубь межэлектродного промежутка в виде тонкой струйки. Линии тока в ней параллельны центральной силовой линии электрического поля.

Было установлено, что ЭГД-течения, независимо от размеров электрода, имеют зонную структуру. У поверхности электрода имеется тонкий

неподвижный слой жидкости. В непосредственной близости к активному электроду расположена короткая зона ускорения, в пределах которой осуществляется переход электрической энергии в кинетическую. Далее, по ходу течения, расположена зона однородного движения, а затем зона торможения жидкости. Различия течений от электродов различного диаметра касаются размеров этих зон. Следует отметить, что описанная зонная структура напоминает структуру тлеющего разряда в газах. Однако, в отличие от последнего, зоны в ЭГД-течении не светятся.

Для объяснения выявленных особенностей зонной структуры при различных условиях были проведены численные эксперименты. В данной главе представлены результаты численного расчета ЭГД-течений, возникающих при униполярной инжекции с поверхности цилиндрического электрода, расположенного над плоским. Проводится исследование структуры течений при различном характере распределения заряда в заряженной струе, при различных значениях радиуса электрода, межэлектродного промежутка (МЭП) и потенциала.

### **Алгоритм моделирования**

Алгоритм расчета ЭГД-течения состоит из двух этапов, на первом из которых рассчитывается распределение электрического поля и действующих кулоновских сил. Для этого на плоском и цилиндрическом электродах задаются потенциалы. На границах кюветы используется условие Неймана: равенство нулю нормальной составляющей электрического поля. Во внутренней области кюветы задается некое распределение объемного заряда (в пределах узкой полоски между электродами). Непосредственно у поверхности цилиндрического электрода распределение объемного заряда задается в виде соосного с электродом кольца небольшой толщины. Для определения распределения объемного заряда внутри межэлектродного промежутка использовалась двумерная функция вида:

$$\rho(x, y) = \rho_0 \cdot \exp \left\{ -\alpha \cdot x^2 - \frac{y}{\beta} \right\}.$$

Как видно из этого выражения, параметр  $\alpha$  определяет ширину заряженной полоски. Параметр  $\beta$  характеризует изменение заряда струи в процессе пересечения межэлектродного промежутка. Ниже приводится исследование характера возникающих течений при изменении параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\rho_0$ .

После определения граничных условий и распределения объемного заряда рассчитывается распределение электрического потенциала в системе с помощью программного комплекса (*ANSYS* или *FEMLAB*), а затем определяется



распределение напряженности электрического поля, а также поле кулоновских сил. Найденное распределение плотности электрических сил используется в качестве внешних действующих сил в уравнениях гидродинамики. Граничными условиями являются нулевые скорости на электродах и стенках кюветы. Свойства жидкости остаются постоянными и соответствуют условиям экспериментов (трансформаторное масло). Гидродинамическая часть задачи также рассчитывается при помощи отмеченных программных комплексов.

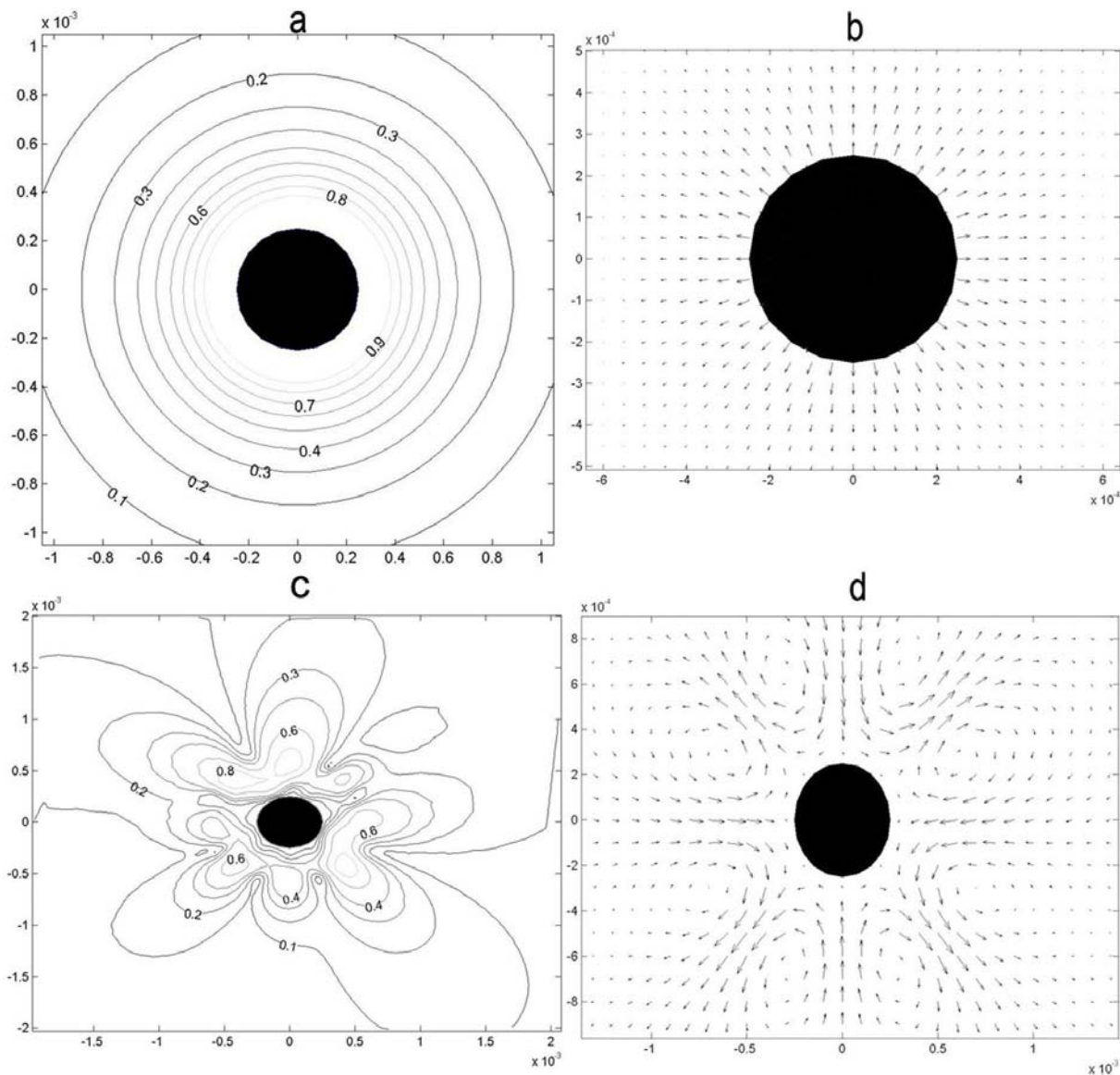
После вычисления, распределение скоростей и других параметров ЭГД-течений сравниваются с результатами обработки экспериментальных данных.

### ***Исследование зависимости структуры ЭГД-течения от скорости спадания заряда между электродами вдоль заряженной струи и от ширины этой струи***

Непосредственно у поверхности цилиндрического электрода распределение объемного заряда задавалось в виде соосного с электродом кольца толщиной 0,1мм. Далее в модели учитывался снос заряда из приэлектродной зоны вглубь межэлектродного промежутка возникающим ЭГД-течением. В качестве функции, моделирующей распределение объемного заряда при сносе, использовалась двумерная функция, описанная выше:  $\rho_0 \cdot \exp\{-\alpha \cdot x^2 - y/\beta\}$ . Изменяя параметр  $\beta$ , можно регулировать скорость спадания плотности объемного заряда вдоль центральной струи ЭГД-сечения, при этом параметр  $\alpha$  вдоль оси течения изменялся таким образом, чтобы соблюдался закон сохранения заряда в струе. Физический смысл этого требования – это отсутствие в жидкости стоков заряда. Критерием для определения  $\rho_0$  было экспериментальное значение скорости течения в области центральной струи. После этого рассчитывалось распределение электрического поля и плотность электрических сил с заданным распределением объемного заряда в электростатическом приближении. Найденное распределение плотности электрических сил использовалось для решения гидродинамической задачи. Геометрия электрической и гидродинамической задач, а также свойства жидкости были такими же, как и в эксперименте. Вычисленные распределения скоростей сравнивались с типичным распределением, получающимся при обработке экспериментальных данных. Изменяя параметры функционального распределения объемного заряда, необходимо добиться наилучшего соответствия между результатами моделирования и экспериментальными данными.

На рис.3.10 представлены результаты моделирования для ситуации, когда весь объемный заряд находится внутри цилиндрического кольца, соосного с электродом (рис.3.10,а). Сечение электрода соответствует внутренней окружности. Распределение электрических сил (рис.3.10,б) также обладает центральной симметрией. Как видно (рис.3.10,с,д), при таком распределении заряда, возникают внутренние ячеистые течения, сосредоточенные в

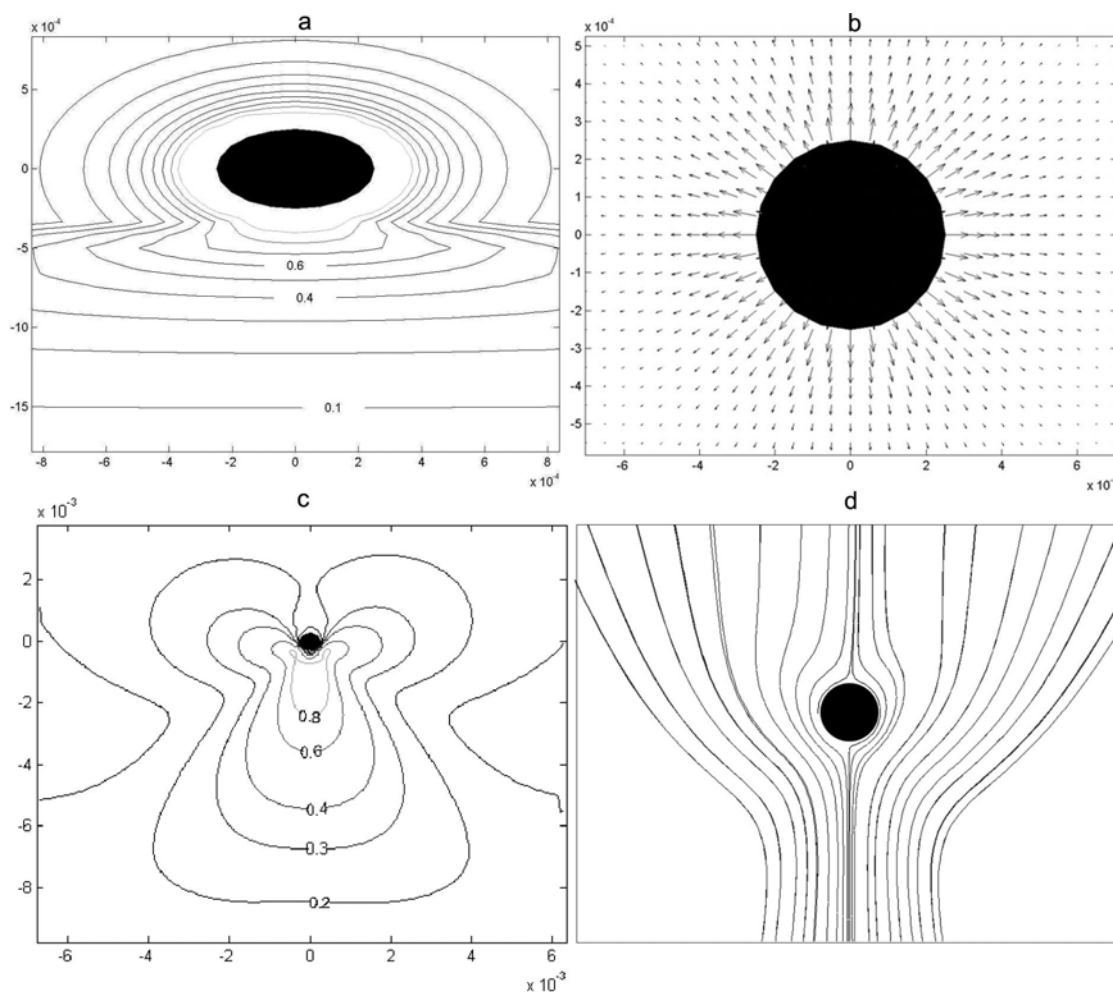
непосредственной близости от электрода. Они образуют симметричную мелкочаеистую структуру, размеры которой намного меньше межэлектродного промежутка. Скорости течений в вихрях не превышают 0,1мм/с (для напряжения 20кВ и плотности заряда  $3 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>).



**Рисунок 3.10.** Распределение плотности объемного заряда (а), плотности объемных сил (b), скорости течения (с,d) для случая, когда весь заряд сосредоточен возле активного электрода.

При появлении асимметрии в распределении заряда картина ЭГД-течения существенно изменяется. На рис.3.11 представлены распределения объемного заряда (а), электрических сил (b), скорости течения (с,d) для случая малой асимметрии ( $\beta=0,001$ ). Из распределений заряда (рис.3.11,а) видно, что заряд спадает в десять раз на расстоянии 1,5 диаметра электрода, то есть по-прежнему сосредоточен в приэлектродной зоне. В распределении сил появляется составляющая, направленная к противоэлектроду (рис.3.11,б).

Однако появление малой асимметрии приводит к качественному изменению гидродинамической картины (рис.3.11,c,d): мелкомасштабные вихри в приэлектродной области исчезают, картина обтекания электрода напоминает ползущее течение, появляется два локальных вихря жидкости. Течение направлено к противоэлектроду. Скорость течений возрастает до 2,5см/с, однако течение незначительно проникает вглубь межэлектродного промежутка на расстояние не более  $0,3l_0$ . В остальной части межэлектродного промежутка течение несущественно. Этот режим имеет все характерные особенности неразвитого ЭГД-течения [1] и характеризуется малыми значениями среднего электрического числа Рейнольдса.

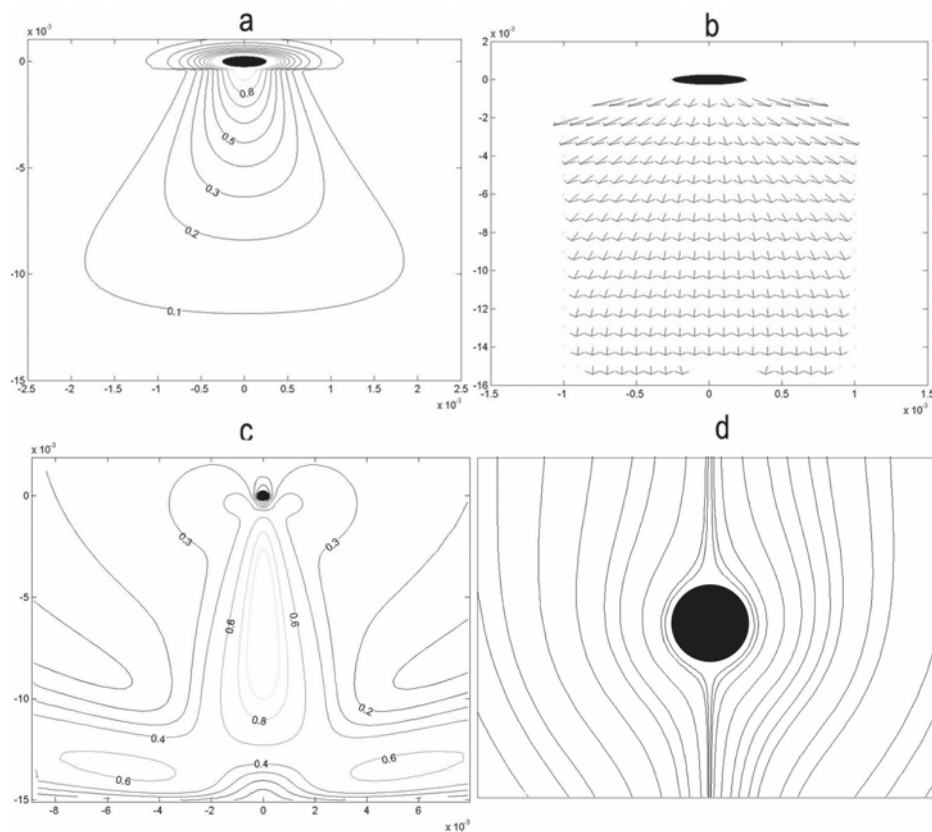


**Рисунок 3.11.** Распределение плотности объемного заряда (a), плотности объемных сил (b), скорости течения (c, d) при появлении небольшой асимметрии в распределении заряда.

При увеличении параметра  $\beta$  асимметрия быстро возрастает, течение охватывает все большую часть межэлектродного промежутка. При значениях  $\beta > 0,03$  в распределении электрических сил появляется область их однородной локализации, а кинематическая структура течения приобретает характерные черты развитого течения. На рис.3.12 представлены результаты расчета для

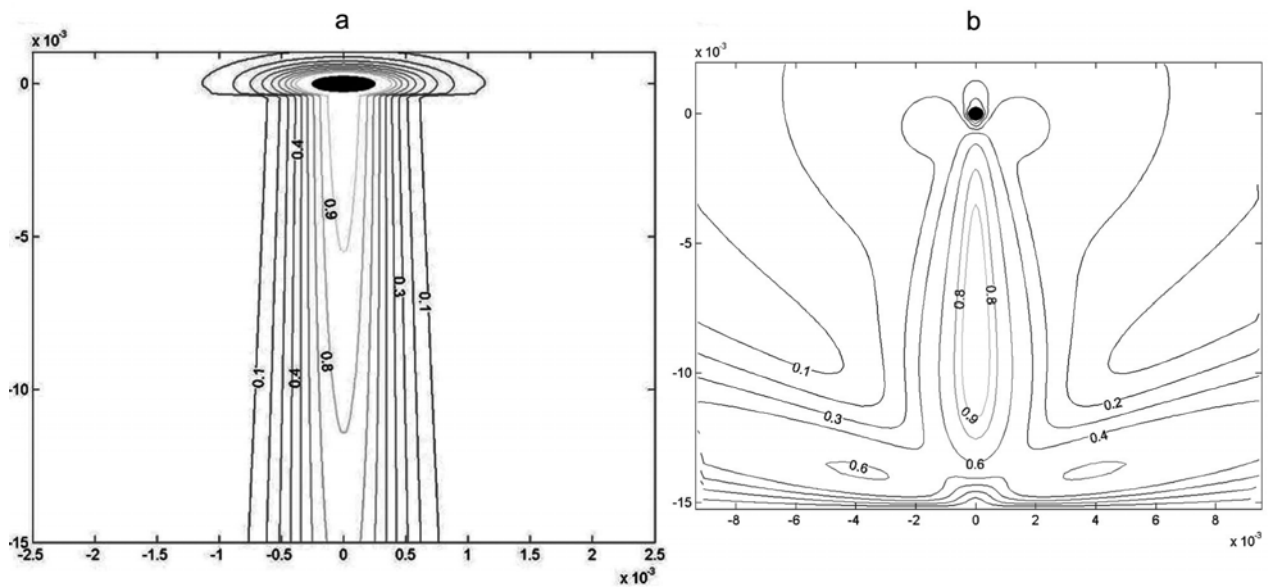
случая  $\beta=0,005$ : заряд спадает в десять раз на расстоянии в 2,5см, то есть равном длине межэлектродного промежутка. Протяженность зоны ускорения составляет  $\sim 0,2l_0$  ( $l_0$  – длина межэлектродного промежутка) и практически не меняется при изменении приложенного напряжения. Имеется обширная зона равномерного движения, в которой скорость направлена вдоль оси течения и изменяется слабо. Эта зона занимает большую часть межэлектродного промежутка. Зона эффективного торможения начинается на уровне  $0,6l_0$ . Все эти особенности близко соответствуют ранее опубликованным данным о структуре развитых ЭГД-течений [7,8].

Зона обтекания активного электрода (рис.3.12,d) очень похожа на ползущее обтекание цилиндра. Как известно, в этом режиме линии тока жидкости симметричны относительно оси цилиндра. Видно, что при ЭГД-течении в боковых частях заряженного кольца линии тока соответствуют окружностям с центром на оси электрода и только в нижней части кольца такая симметрия отсутствует. Это вызвано активным ускорением за электродом в направлении оси течения под действием объемных электрических сил. Струя жидкости сужается, на линиях уровня скорости хорошо заметен выступ в направлении течения жидкости. За электродом наблюдается понижение давления.



**Рисунок 3.12.** Развитие ЭГД-течение: *a* - распределение плотности объемного заряда, *b* - векторное поле плотности объемных электрических сил, *c* – карта линий уровня скорости ЭГД-течения, *d* – структура линий тока жидкости в приэлектродной области.

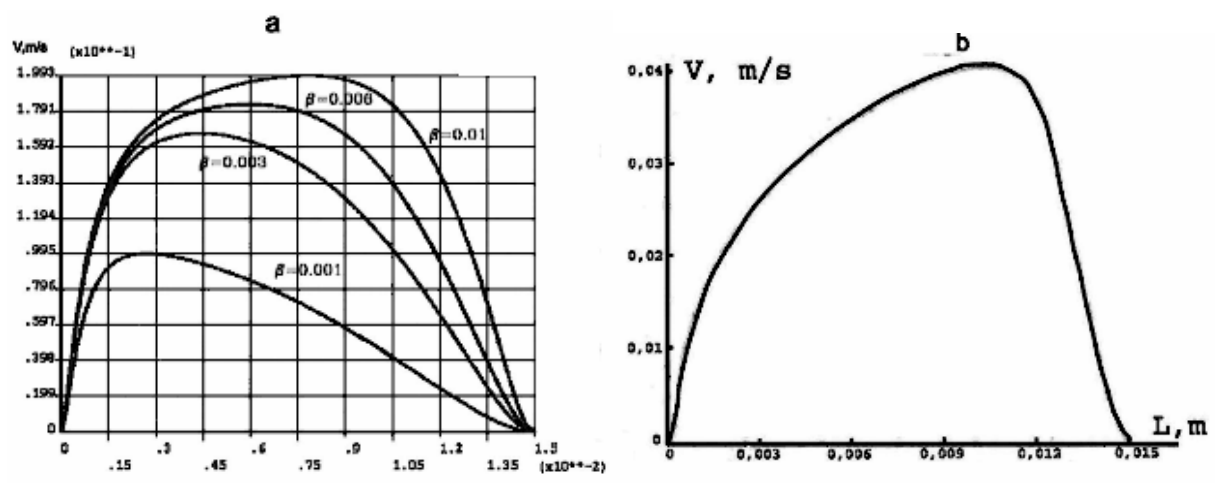
При уменьшении скорости спадания заряда структура течения начинает отличаться от наблюдаемой экспериментально. Зона ускорения удлиняется и захватывает все большую часть межэлектродного промежутка. Область максимальной скорости смещается ближе к плоскому электроду. Это хорошо видно на рис.3.13, который соответствует значению  $\beta=0,03$ . На рис.3.13,a, представлено распределение плотности объемного заряда, рис.3.13,b, – распределение скорости течения, вызванного таким распределением заряда. В этом случае заряженная струйка представляет узкую полосу почти постоянной ширины, плотность заряда вдоль струи изменяется на 30% на всём межэлектродном промежутке. На рис.3.13,b, также показаны цилиндрический электрод (темный круг) и плоский электрод (темная линия внизу рисунка). Видно (рис.3.13,b), что зона ускорения занимает почти половину межэлектродного промежутка, в то время как из экспериментальных данных [7,8] следует, что ее размеры составляют от  $0,1 \cdot l_0$  до  $0,3 \cdot l_0$  и мало изменяются при изменении внешних условий (приложенное напряжение, размеры электродов и геометрия электродов, состав жидкости) в широких пределах. Размеры зоны торможения сокращаются до  $0,2 \cdot l_0$ , что также не соответствует характерной структуре ЭГД-течения.



**Рисунок 3.13.** Распределение плотности объемного заряда (a) и скорости ЭГД-течения (b) при малой скорости спадания заряда ( $\beta=0,03$ ).

На рис.3.14,a, представлены линейные распределения скорости вдоль линии, проходящей через центр цилиндрического электрода и перпендикулярной плоскому электроду (вдоль центральной оси ЭГД-течения) для различных скоростей спадания заряда:  $\beta = 0,001, 0,003, 0,005, 0,03$ . Видно, что режиму развитого течения лучше всего соответствует вариант  $\beta = 0,005$ : протяженность зоны ускорения составляет  $\sim 0,2 \cdot l_0$  ( $l_0$  – длина межэлектродного

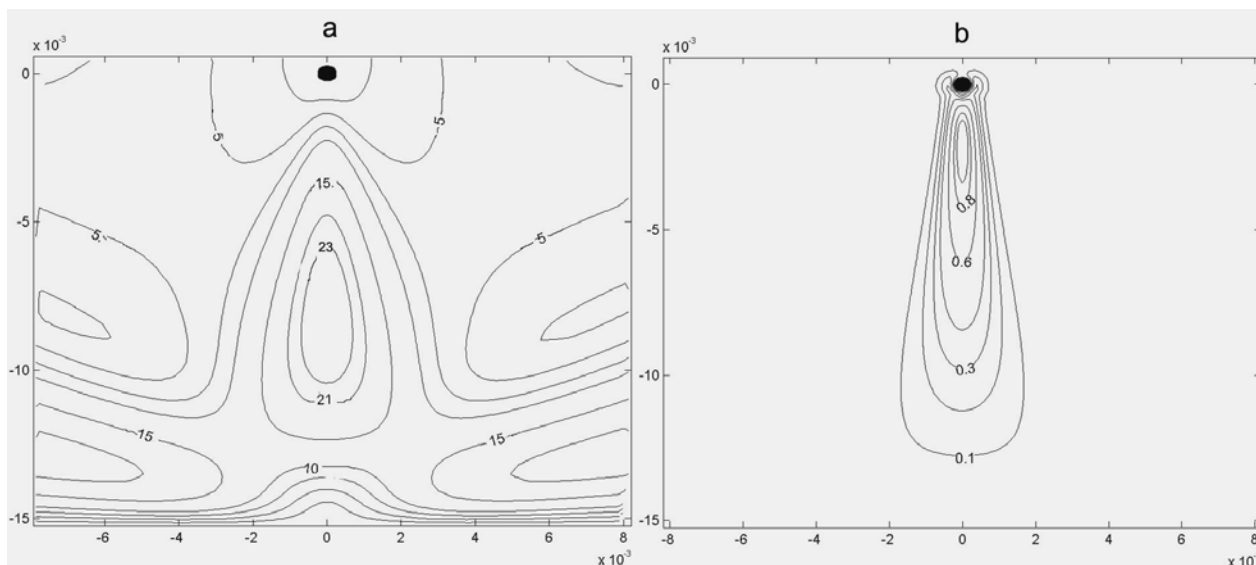
промежутка) и практически не меняется при изменении приложенного напряжения. Имеется зона равномерного движения, в которой скорость направлена вдоль оси течения и изменяется слабо. Зона эффективного торможения начинается на уровне  $0,6 \cdot l_0$ . Все эти особенности близко соответствуют ранее опубликованным данным о структуре развитых ЭГД-течений. Если скорость спадания заряда увеличивается, то реализуется структура характерная для неразвитого течения, а при увеличении  $\beta$  возникает нереализуемая на практике структура. Был проведен численный эксперимент, в котором задавалось однородное распределение движущих сил, направленных вдоль центральной оси течения от цилиндрического электрода к плоскому и локализованных в области, представляющей собой полосу, размеры которой приблизительно равны размерам области локализации объемного заряда при развитом ЭГД-течении. На рис.3.14,b, представлено осевое распределение скорости течения при таком способе задания движущих сил. Возникающее течение имеет структуру, похожую на случай малого спадания заряда вдоль центральной струи: протяженная зона ускорения, промежуточная область однородного течения практически отсутствует, зона ускорения сменяется зоной торможения. Максимум скорости соответствует длине полосы приложения сил, непосредственно за ним следует зона торможения жидкости. Таким образом, зонная структура ЭГД-течений сильно зависит от распределения объемного заряда.



**Рисунок 3.14.** Распределение скорости ЭГД-течения вдоль центральной оси: *a* – для различных распределений объемного заряда, *b* – для однородной плотности объемных сил.

В результате моделирования имеется полная информация об ЭГД-течении: распределения напряженности поля  $E$ , плотности заряда  $\rho$ , а также скорости течений. Следовательно, можно определить распределения  $Re_{el} = V/bE$  и плотности конвективного тока  $J_k = \rho \cdot V$  в объеме жидкости. Эти распределения представлены на рис.3.15. Значения плотности тока нормированы относительно максимального значения ( $j_{max} = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$ ). Видно, что у обоих электродов

имеются обширные зоны малых  $Re_{el}$  и  $J_k$ . В этих зонах ионная транспортировка носит преимущественно миграционный характер. Распределение электрического числа Рейнольдса имеет каплеобразный вид с максимумом в центральной струе. Конвективный ток имеет вид узкой полосы в зоне центральной струи течения.



**Рисунок 3.15.** Распределения электрического числа Рейнольдса (a) и плотности тока (b) при развитом ЭГД-течении ( $\beta = 0,006$ ).

Во многих работах [11,13,30] механизм проводимости на нелинейном участке вольтамперной характеристики связывают с появлением конвективного механизма проводимости. Этому же мнению придерживаются и авторы. Действительно, в центральной струе течения плотность тока  $j \cong \rho(v+b \cdot E)$ . В режиме развитого течения электрическое число Рейнольдса обычно больше 10, следовательно, плотность тока конвекции значительно выше плотности тока проводимости. Однако в неподвижных приэлектродных областях течение отсутствует. Полное сопротивление системы электроды–жидкость является суммой сопротивлений всех зон, включая сопротивление межфазных переходов. Наибольшее влияние оказывает участок, обладающий наиболее высоким сопротивлением, а это не обязательно зона центральной струи ЭГД-течения. В исследованиях, посвященных влиянию границы раздела электрод–жидкость на характер вольтамперной характеристики, показано, что таким участком может являться контакт металл–жидкость [11]. Поэтому, не в коей мере не умаляя роли конвективного члена, авторы считают необходимым в каждом конкретном случае тщательно анализировать влияние всех стадий и зон на общий ход вольтамперной характеристики.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Симметричные распределения объемного заряда, в виде кольца, окружающего электрод приводят к местным, многоячейстым течениям, не проникающим далеко в объем жидкости.

2. Слабоасимметричные распределения заряда, локализованные в окрестности цилиндрического электрода, приводят к двухячейстым течениям, направленным к плоскому электроду, структура которых соответствует режиму неразвитого ЭГД-течения.
3. При увеличении асимметрии, глубина проникновения течения увеличивается и реализуется режим развитого ЭГД-течения. Распределение плотности электрических сил, а также плотности конвективного тока в таком течении имеет вид тонкой струйки, локализованной вдоль оси течения. В таком течении реализуется характерная зонная структура, описанная ранее на основе анализа экспериментальных данных.
4. Сильно асимметричные распределения заряда в виде тонкой полосы пересекающей межэлектродный промежуток при малом спаде плотности заряда в направлении течения приводят к нереализуемому на практике режиму течения, который характеризуется протяженной зоной ускорения и малыми размерами зоны торможения.
5. В режиме развитого ЭГД-течения в приэлектродных областях транспортировка заряда имеет преимущественно миграционный характер, а в центральной струе конвективный.

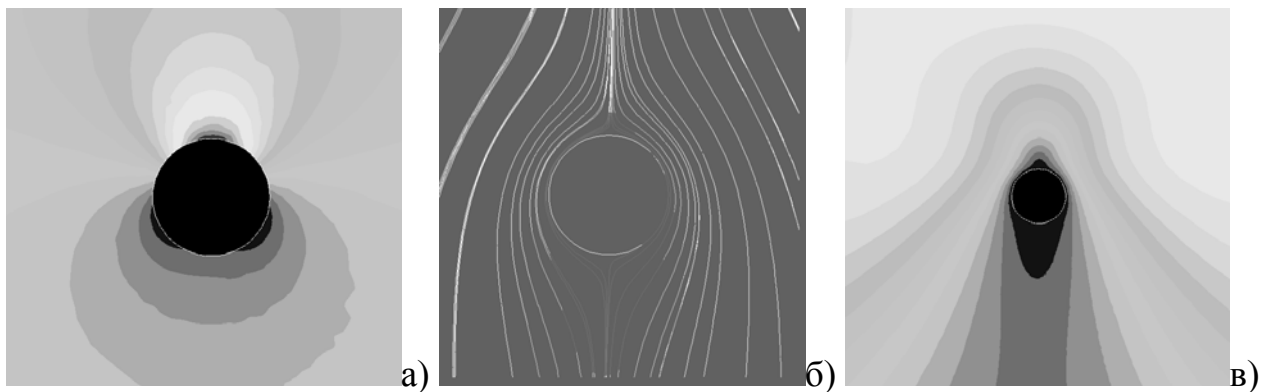
### **Исследование зависимости структуры ЭГД-течения от радиуса активного электрода [25,31]**

При моделировании одним из самых важных вопросов является определение распределения объемного заряда в жидкости. Как было сказано выше, непосредственно около активного электрода в экспериментах наблюдается малоподвижная область, заряженная одноименно с электродом. Так как обтекание электрода происходит в режиме так называемого «ползущего» течения, то из этой зоны заряд смещается вглубь межэлектродного промежутка в виде тонкой полосы, поперечные размеры которой не превосходят размеров электрода. По этой же причине ширина этой полосы не должна меняться с изменением радиуса электрода. Так как при развитом ЭГД-течении электрическое число Рейнольдса больше 10, то уширение этой полосы должно быть незначительным.

В данном параграфе используются следующие параметры, соответствующие параметрам экспериментальной установки: длина межэлектродного промежутка равна 1,5см, приложенное напряжение 20кВ. В качестве исследуемой жидкости использовалось трансформаторное масло. Значение плотности заряда ( $\rho_0 \cdot \exp\{-\alpha \cdot x^2 - y/\beta\}$ ) выбиралось таким образом, чтобы вычисленные значения максимальной скорости в центральной струе течения соответствовали экспериментальным данным, представленным в [11]. Для определения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  были проведены специальные численные эксперименты [10]. Оказалось, что для жидкостей с электрической проводимостью  $0,1 \div 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ , для активного электрода с радиусом

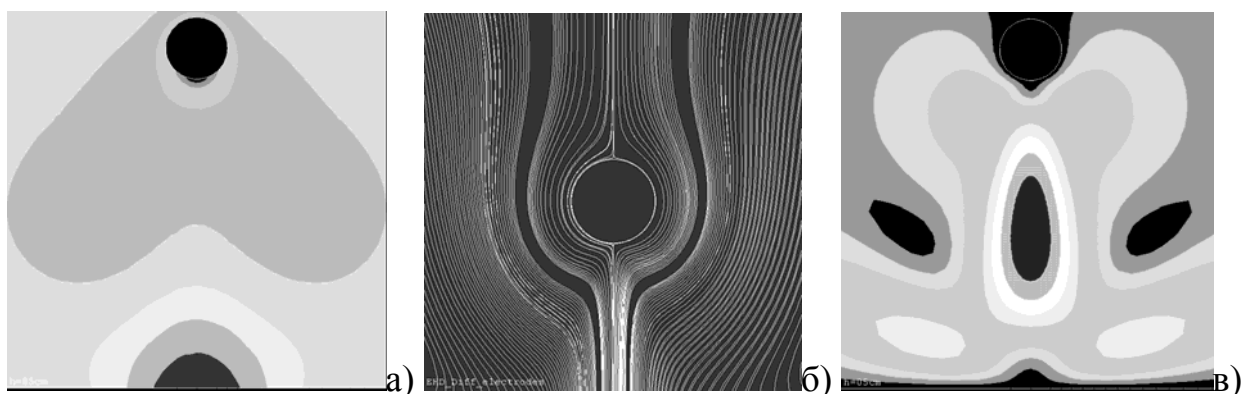


0,25 мм параметр  $\beta$  равен 0,006, а параметр  $\alpha$  имеет значение  $1 \cdot 10^{-4}$ . В соответствии со сказанным выше, можно предположить, что при изменении радиуса активного электрода значения этих параметров не изменяются. После проведения вычислений, распределения скоростей сравнивались с результатами обработки экспериментальных данных и величина объемного заряда в приэлектродной области ( $\rho_0$ ) корректировалась в соответствии с экспериментальным значением скорости ЭГД-течения для данных условий.



**Рисунок 3.16.** Обтекание цилиндра: распределение линий уровня давления (а), линии тока (б), карта линий уровня скорости (в).

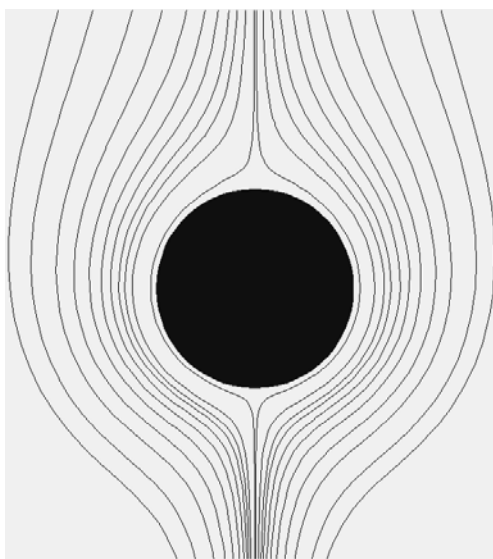
Ниже представлены рисунки течений для обычного обтекания цилиндра потоком жидкости (рис.3.16) и для ЭГД-течений (рис.3.17), где этот цилиндр является активным электродом. Хорошо видны различия в зонных картинах распределения давлений и скоростей. Для ЭГД-течений узкая зона пониженного давления находится сразу под электродом в области заряда, который вызывает движение жидкости. Линии тока для ЭГД-течений в этой области сильно сужаются, образуя несимметричную картину. Здесь и формируется узкая заряженная струя. При обычных течениях такого не наблюдается в связи с отсутствием сконцентрированных сил в данной области.



**Рисунок 3.17.** Обтекание цилиндрического электрода ЭГД-течением: распределение линий уровня давления (а), линии тока (б), карта линий уровня скорости (в).

Были проведены вычисления для нескольких электродов, радиусы которых изменялись в пределах от 0,1мм до 5мм, таким образом напряженность электрического поля вблизи него менялась в пределах от  $0,2 \cdot 10^7$  до  $10^8$ В/м. В результате решения электрической и гидродинамической задач получена полная информация об электрической и гидродинамической структуре ЭГД-течений в режиме развитого течения от электродов различного диаметра при униполярной инжекции.

Полученные векторные поля скоростей и линии тока близко соответствуют фотографиям ЭГД-течений полученным ранее, а также результатам обработки соответствующих видеофильмов [11]. На рис.3.18 представлены линии тока ЭГД-течения в окрестностях активного цилиндрического электрода. Видно, что обтекание электрода имеет безотрывный характер, линии тока за электродом сходятся, образуя тонкую струйку, в которой линии тока параллельны центральной силовой линии электрического поля. Непосредственно к поверхности электрода примыкает приэлектродный слой, в пределах которого плотность электрического заряда и плотность кулоновских сил наиболее высока, а скорость ЭГД-течения очень мала. Жидкость, обтекая электрод, сносит заряд из этой зоны вглубь межэлектродного промежутка в виде тонкой полоски.



**Рисунок 3.18.** *Линии тока жидкости вблизи активного электрода ( $r=0.5$ мм).*

В результате моделирования мы получаем полную информацию о течении и, благодаря этому, можем посчитать конвективную составляющую электрического тока  $J_k$ . Некоторые из полученных при моделировании результатов представлены в Таблице3.1.

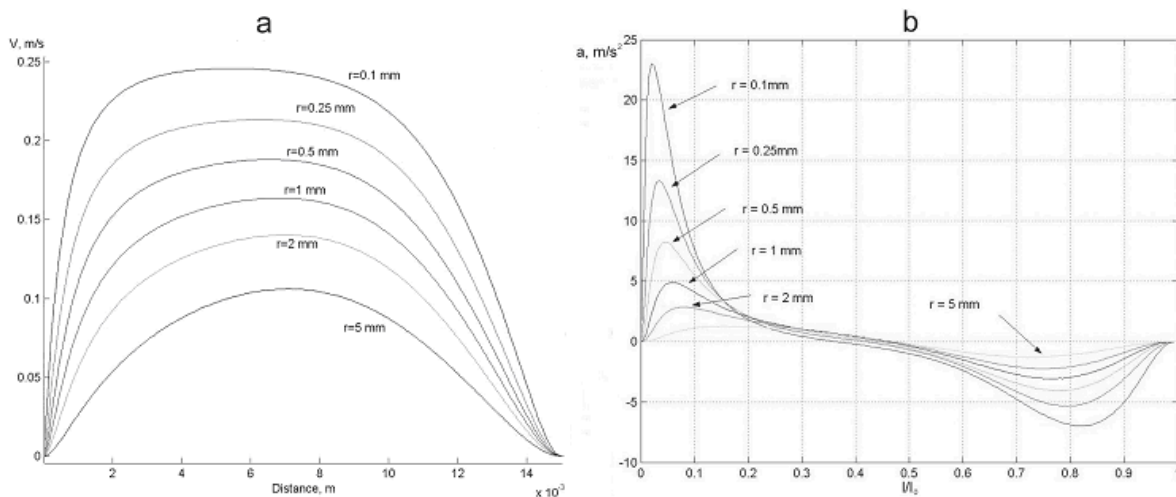
В этой таблице используются следующие обозначения:  $r$  – радиус активного электрода,  $V_{max}$  – экспериментально определенная скорость течения (максимальное значение),  $E_{max}$  – значение напряженности поля около активного

электрода,  $\rho_0$  – значение плотности объемного заряда около активного электрода,  $Re_{эл}$  – максимальное значение электрического числа Рейнольдса в центральной струе ЭГД-течения,  $l_m$  – расстояние от кромки электрода до максимума ускорения,  $A_m$  – максимальное значение ускорения.

Таблица 3.1.

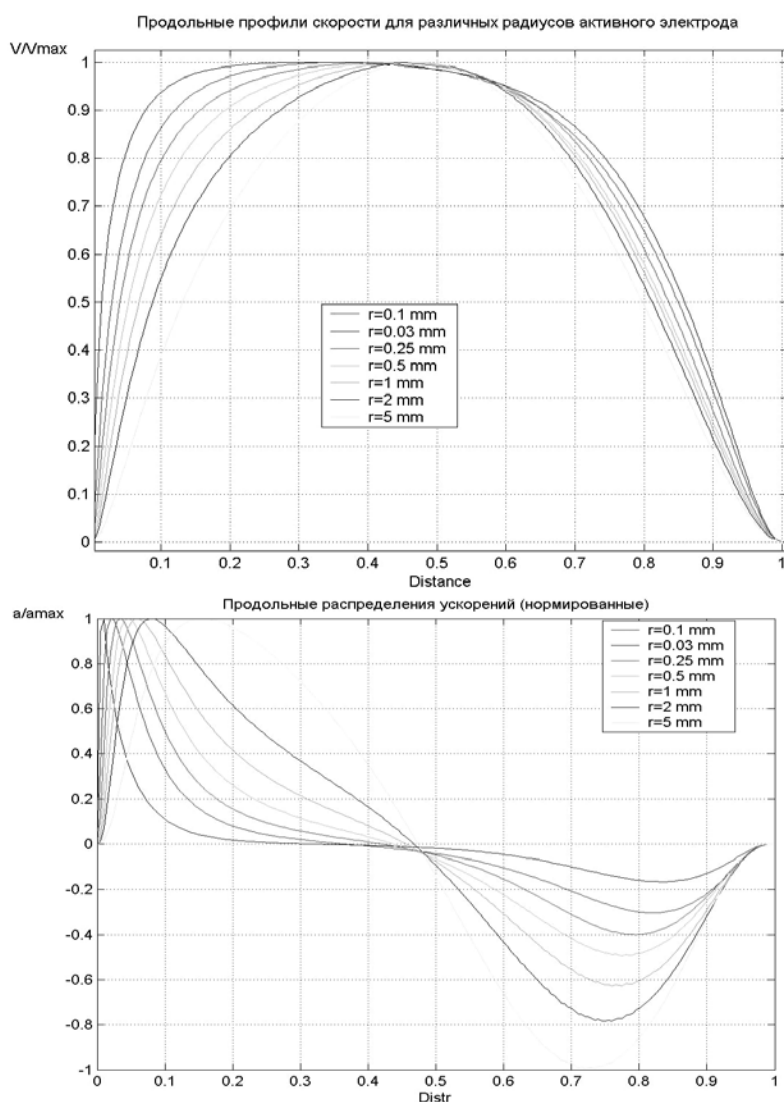
$r$ , мм	$Re_{эл}$	$V_{max}$ , см/с	$E \cdot 10^7$ В/м	$\rho_0 \cdot 10^{-2}$ , Кл/м <sup>3</sup>	$J_K \cdot 10^{-6}$ А/м <sup>2</sup>	$l_m$ , мм	$A_m$ , м/с <sup>2</sup>
0,03	21,7	28,9	8,10	2,35	4,170	0,15	60,88
0,10	18,5	24,6	3,09	1,72	2,629	0,31	23,00
0,25	16,0	21,3	1,45	1,28	1,749	0,53	13,33
0,5	14,2	18,9	0,85	1,02	1,264	0,68	8,23
1,0	12,3	16,4	0,52	0,81	0,920	0,90	4,90
2,0	10,5	14,0	0,33	0,61	0,669	1,20	2,86
5,0	8,0	10,7	0,22	0,28	0,355	2,25	1,27

На рис.3.19,а, представлены распределения скоростей ЭГД-течений вдоль центральной силовой линии электрического поля. Начало координат соответствует поверхности цилиндрического электрода, расстояния нормированы на длину межэлектродного промежутка. Аналогичные распределения, полученные путем обработки экспериментальных данных, представлены в работах [8,11]. Следует отметить хорошее соответствие по характеру распределения скорости для всего диапазона размеров активного электрода. Видно, что ЭГД-течения, независимо от размеров активного электрода, сохраняют характерную зонную структуру. Строение и размеры зон также соответствуют экспериментальным данным, опубликованным в [11].



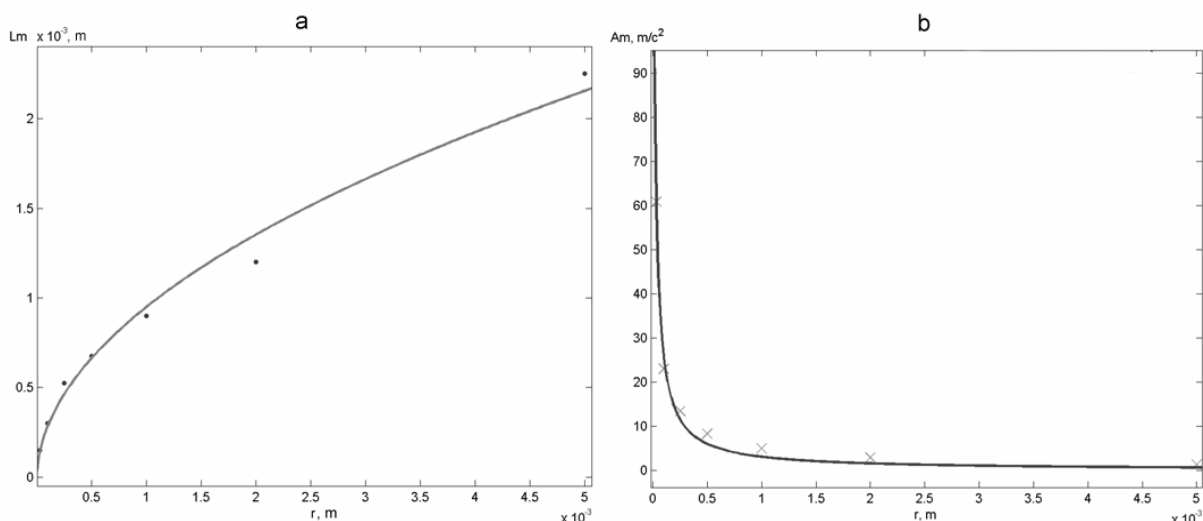
**Рисунок 3.19.** Распределение скорости ЭГД-течения (а) и распределение ускорения ЭГД-течения (б) вдоль оси  $x=0$  для различных размеров активного электрода.

На рис.3.19,б, представлены распределения ускорений, полученные путем численного дифференцирования распределений скорости. На этих графиках более отчетливо прослеживаются все особенности структуры зон ускорения и их зависимость от размеров активного электрода. На некотором расстоянии  $l_m$  от поверхности электрода наблюдается максимум ускорения, после чего ускорение быстро падает. На промежуточной части межэлектродного промежутка, начиная с  $0,2 \cdot l_0$  и до  $0,6 \cdot l_0$ , скорость жидкости изменяется незначительно. Часто эту область называют центральной струей ЭГД-течения. В пределах этой зоны линии тока жидкости параллельны друг другу и центральной силовой линии электрического поля. С уровня  $0,6 \cdot l_0$  начинается область торможения жидкости. В пределах этой зоны линии тока жидкости расходятся, и образуется два потока жидкости. Непосредственно к поверхности плоского электрода примыкает слой неподвижной жидкости. На рис.3.19,б, область торможения хорошо видна в виде провалов.



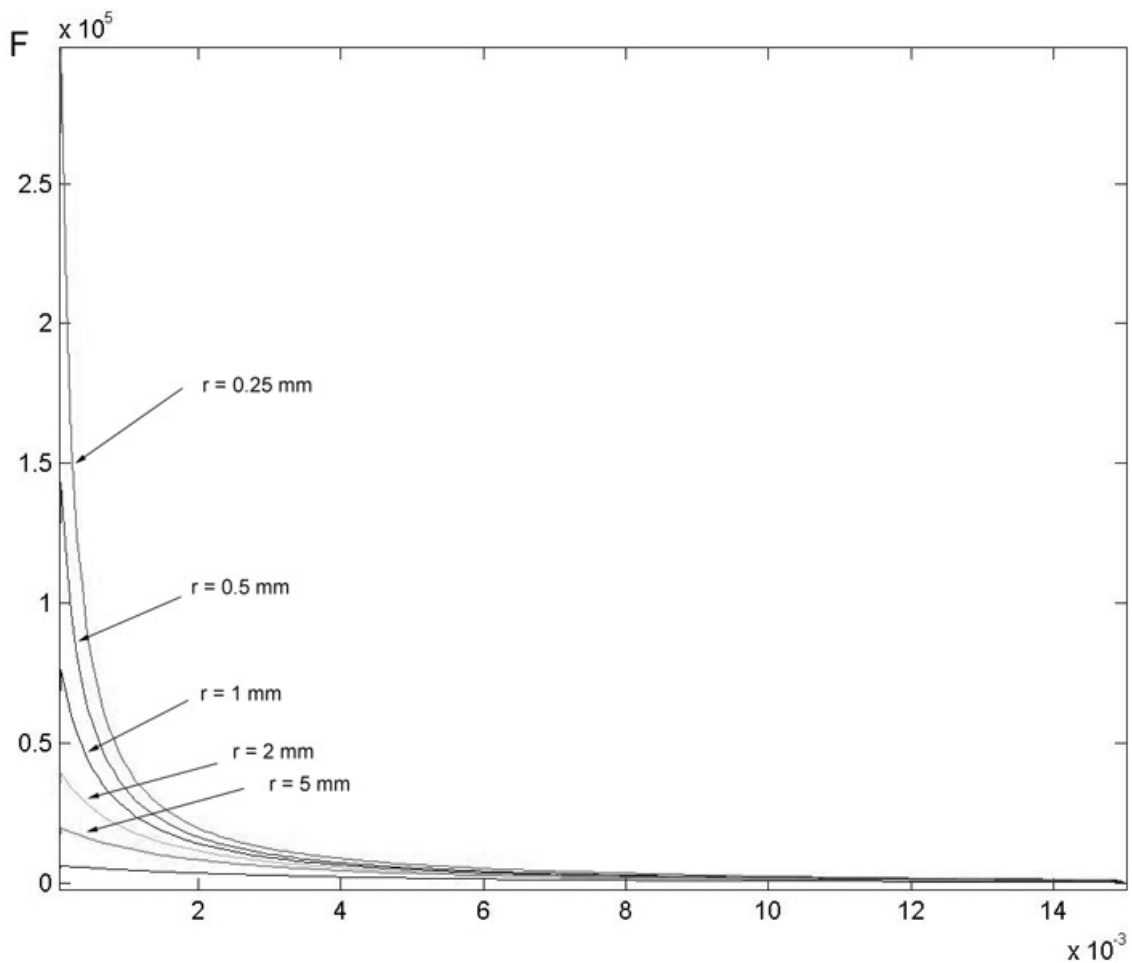
**Рисунок 3.20.** Нормированные осевые распределения скоростей (сверху) и ускорений (снизу) для разных размеров активного электрода.

На рис.3.20 представлены нормированные графики для скоростей и ускорений. Видно, что кинематическая структура ЭГД-течения не изменяется при изменении радиуса активного электрода. Зоны ускорения и торможения сохраняют свои размеры. При увеличении радиуса цилиндра ускорение становится менее интенсивным. Происходит изменение местоположения  $l_m$  и величины максимума ускорения, а также величины и местоположения максимума торможения жидкости. На рис.3.21, а, представлено изменение местоположения максимума ускорения в зависимости от радиуса электрода. Это изменение хорошо аппроксимируется зависимостью вида:  $L=a \cdot r^{0,5}$ , где  $a$  – некоторая постоянная, равная 0,031. Видно (рис.3.21,b), что величина максимума ускорения также нелинейно зависит от размеров активного электрода. При увеличении размеров цилиндра максимальное значение ускорения уменьшается как  $r^{-1}$ .



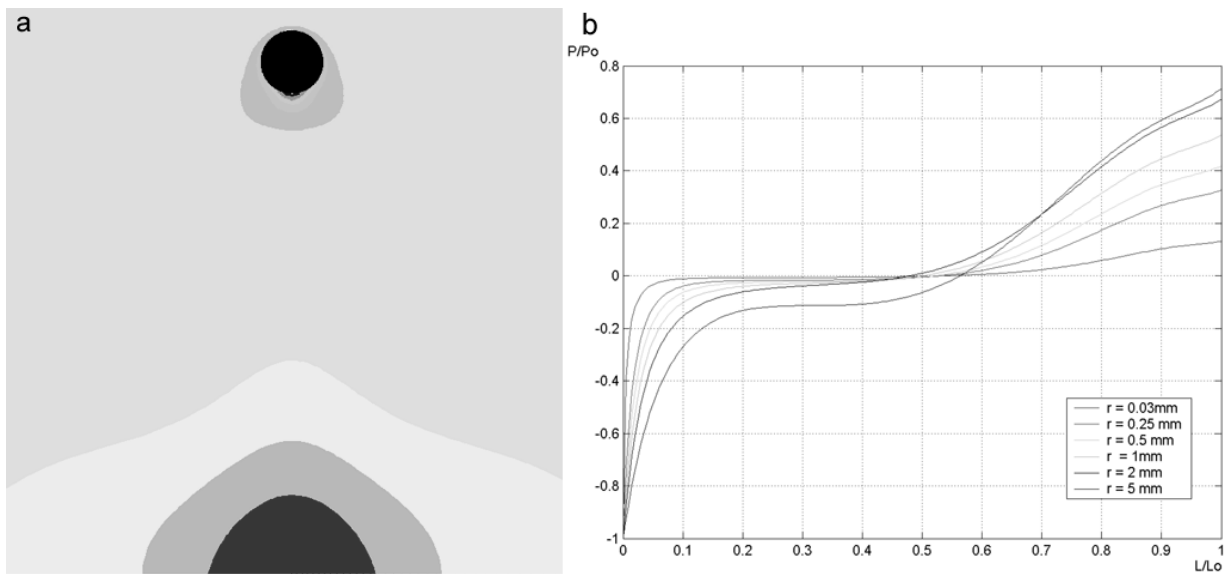
**Рисунок 3.21.** Изменение расстояния до максимума ускорения (а) и величины максимального ускорения (b) при изменении диаметра активного электрода. Точки – вычисленные значения, сплошная линия – аппроксимационная кривая.

На рис.3.22 представлены осевые распределения кулоновских сил для электродов различного диаметра. Так как распределение электрического поля имеет монотонный убывающий характер вдоль оси  $x$  и распределение объемного заряда, хоть медленно, но спадает вдоль этой оси, то распределение кулоновских сил вдоль этой оси также имеет убывающий характер, и в целом повторяет поведение электрического поля. Максимум сил находится на поверхности электрода и тем выше, чем меньше диаметр электрода.



**Рисунок 3.22.** Распределения кулоновских сил вдоль оси  $x$  для электродов различного радиуса.

На рис.3.23 представлены рассчитанные распределения давления в жидкости при ЭГД-течениях. Распределения давления в большей части межэлектродного промежутка однородны и соответствуют атмосферному. Исключения составляют две области: под цилиндрическим электродом находится область пониженного давления, а у плоского электрода, в месте соударения центральной струи ЭГД-течения с поверхностью электрода, находится область повышенного давления. На рис.3.23, б, представлены осевые распределения давления для различных электродов (нормированные к единице). Видно, что при увеличении радиуса электрода зона пониженного давления расширяется пропорционально диаметру активного электрода. Зона пониженного давления находится в области заряженного кольца, однако она несимметрична относительно оси электрода. Эта область несколько сдвинута по ходу течения жидкости и имеет заостренный выступ.

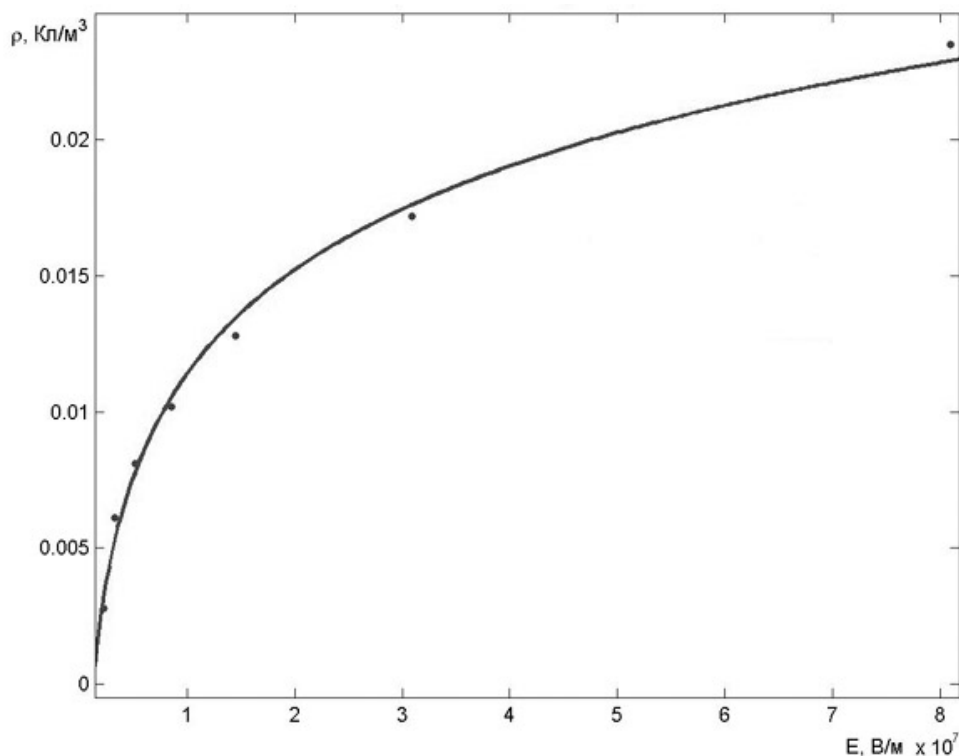


**Рисунок 3.23.** Распределение давления при ЭГД-течении: *a* – карта линий уровня для случая  $r=1\text{мм}$ , *b* – распределение давления вдоль оси  $x=0$ , для различных диаметров электродов.

В области около электрода ускорение жидкости определяет равнодействующая электрических сил и сил давления. На крутизну горба ускорения и местоположение его максимума сильно влияет структура приэлектродной зоны пониженного давления. В свою очередь, эта структура определяется характером отека жидкостью цилиндрического электрода. Чем больше радиус электрода, тем обширнее эта зона и, следовательно, более пологий рост ускорения. В дальней области электрод не оказывает влияния, и ускорение жидкости определяется электрическими силами.

Зона повышенного давления у пассивного плоского электрода находится в месте соударения центральной струи течения с электродом и имеет вид похожий на треугольник. В нашей модели, учитывающей только униполярное зарядообразование на поверхности активного электрода, структура этой зоны обусловлена чисто гидродинамическими причинами.

На рис.3.24 представлена зависимость плотности пространственного заряда в приэлектродной зоне от напряженности электрического поля на поверхности активного электрода. Зависимость построена по данным моделирования с различными электродами. Поскольку величины и распределения скоростей ЭГД-течений компьютерного и натурального экспериментов совпадают, можно утверждать, что представленная зависимость отражает процесс приэлектродного образования заряда на активном электроде в режиме развитого ЭГД-течения. Полученные значения хорошо аппроксимируются логарифмической зависимостью. Следует отметить, что значение напряженности поля  $E$  определяется с учетом объемного заряда в приэлектродной зоне.



**Рисунок 3.24.** Зависимость плотности объемного заряда от напряженности электрического поля в приэлектродной области. Точки – вычисленные значения, сплошная линия - аппроксимирующая кривая.

Таким образом, в соответствии в этой части можно сделать следующие выводы:

1. Представленная модель зарядовой структуры ЭГД-течений в виде тонкого кольца, опоясывающего активный электрод, и тонкой заряженной струйки, пересекающей межэлектродный промежуток вдоль центральной силовой линии поля, достаточно хорошо описывает ранее выявленные в натуральных экспериментах особенности зонной структуры ЭГД-течений.
2. В приэлектродной заряженной зоне жидкость обтекает электрод в режиме ползучего течения, вынося заряд в виде тонкой струйки в центральную струю течения. Относительная скорость обтекания незначительна. Давление жидкости в приэлектродной зоне понижено.
3. ЭГД-течения имеют зонную структуру, определяемую единой природой течения в слабо и сильнонеоднородных электрических полях, характеризующуюся единой распределенной силовой нагрузкой и описанной зарядовой структурой.
4. Переход электрической энергии в кинетическую осуществляется в пределах зоны ускорения. Размеры зоны ускорения невелики: при длине межэлектродного промежутка  $l_0=1$  см зона ускорения составляет около  $0,1 \cdot l_0$ , т.е.  $\sim 1$  мм.
5. Распределение ускорений имеет экстремальный характер, местоположение и величина максимума ускорения зависят от размеров активного электрода.

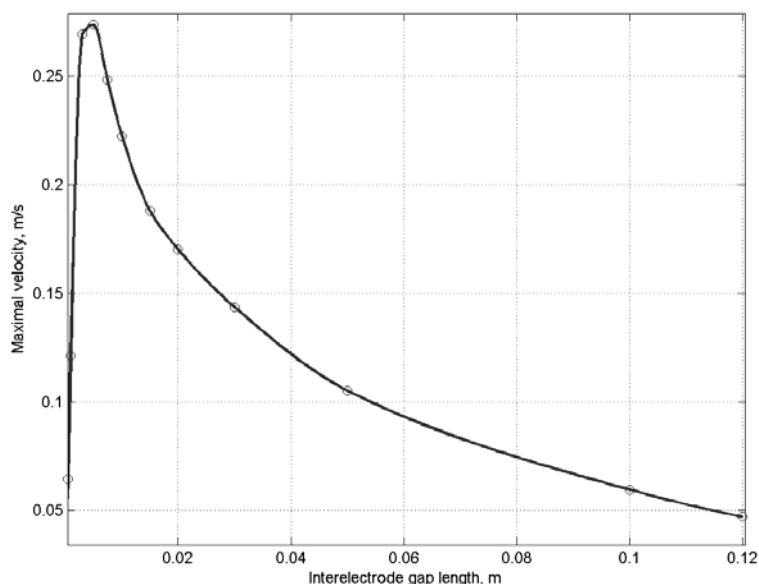


Экстремальный характер ускорений связан с наличием зоны пониженного давления в приэлектродной области.

### **Исследование влияния размеров межэлектродного промежутка на кинематику ЭГД-течений [15,23]**

При конструировании ЭГД-устройств обычно используются малые межэлектродные промежутки, составляющие 1÷5 мм. В тоже время представленные экспериментальные исследования обнаружили существенный спад скорости течения при уменьшении размеров межэлектродного промежутка менее 5мм. С научной и практической точки зрения представляет интерес исследования процесса формирования течений, когда размеры зон ускорения жидкости близки к размерам межэлектродного промежутка. Это позволит оценить влияние приэлектродных зон на структуру течения. В данной части представлены результаты численного моделирования ЭГД-течений в системе электродов провод над плоскостью. Представлены результаты численного исследования изменения структуры течения при изменении межэлектродного расстояния  $l_0$  от 0,5 мм до 12 см, что охватывает диапазон изменения относительных расстояний  $d=l_0/r_0$  от 1 до 240.

Как и ранее, рассматривается система электродов провод над плоскостью, размеры модели совпадают с размерами экспериментальной кюветы. В качестве исследуемой жидкости выбрано трансформаторное масло. Радиус активного электрода  $r_0 = 0,5$  мм, приложенное напряжение 20кВ.



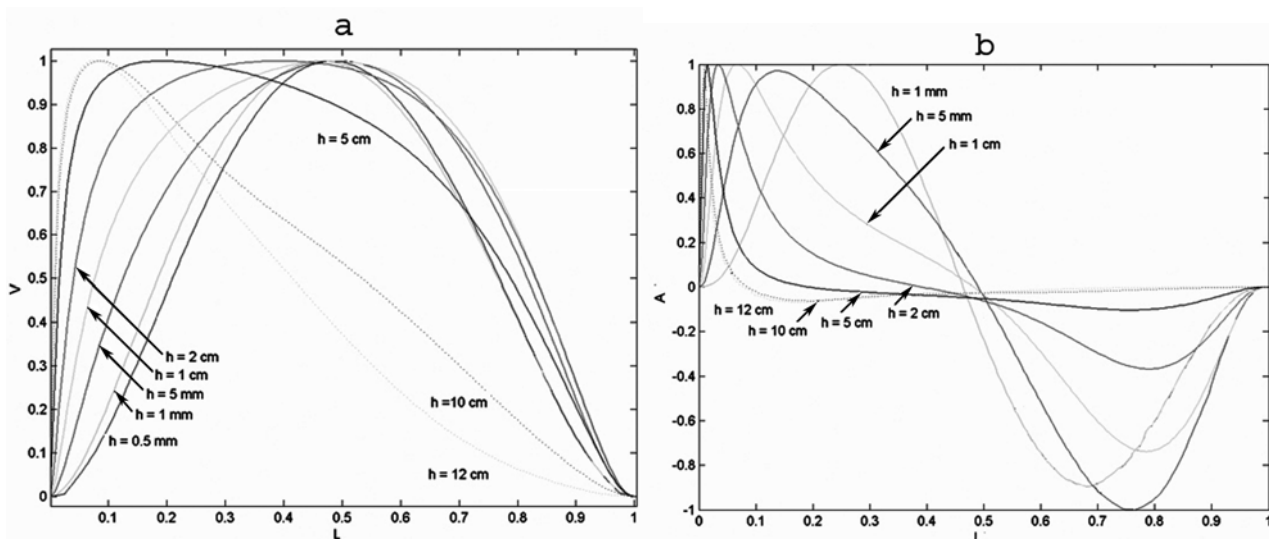
**Рисунок 3.25.** Зависимость максимальной скорости ЭГД-течения от величины межэлектродного промежутка.

Распределение заряда имеет следующую структуру: вокруг цилиндрического электрода имеется тонкий, порядка 0,1 мм, слой заряженной

жидкости, внутри межэлектродного промежутка оно имеет вид тонкой полоски, простирающейся от цилиндрического электрода к плоскому. Имеется небольшое спадание плотности заряда внутри полоски по мере его продвижения к плоскому электроду.

На рис.3.25 представлена зависимость максимальной скорости в центральной струе ЭГД-течения от размера межэлектродного промежутка при постоянном напряжении. Эта зависимость имеет максимум при  $l_0 = 5$  мм ( $l_0$  – длина межэлектродного промежутка).

Аналогичная экстремальная зависимость скорости течения от размера межэлектродного промежутка обнаружена ранее экспериментально [11]. Совпадение касается не только характера кривых, но и местоположения максимума. Разобьем зависимость на две части: *аномальную область* малых межэлектродных расстояний  $l_0 < 5$  мм, и *нормальную область*:  $l_0 > 5$  мм. В нормальной области спад скорости обусловлен падением средней напряженности электрического поля при увеличении длины межэлектродного промежутка, а в аномальной области спад скорости происходит на фоне роста средней напряженности поля. Следует заметить, что в аномальной области происходит также спад эффективности ЭГД-преобразования, то есть отношения кинетической энергии ЭГД-течения к затрачиваемой электрической энергии. Для объяснения особенностей зависимости (рис.3.25) проанализируем результаты моделирования. На рис.3.26 представлены нормированные распределения скорости и ускорения вдоль центральной оси течения.

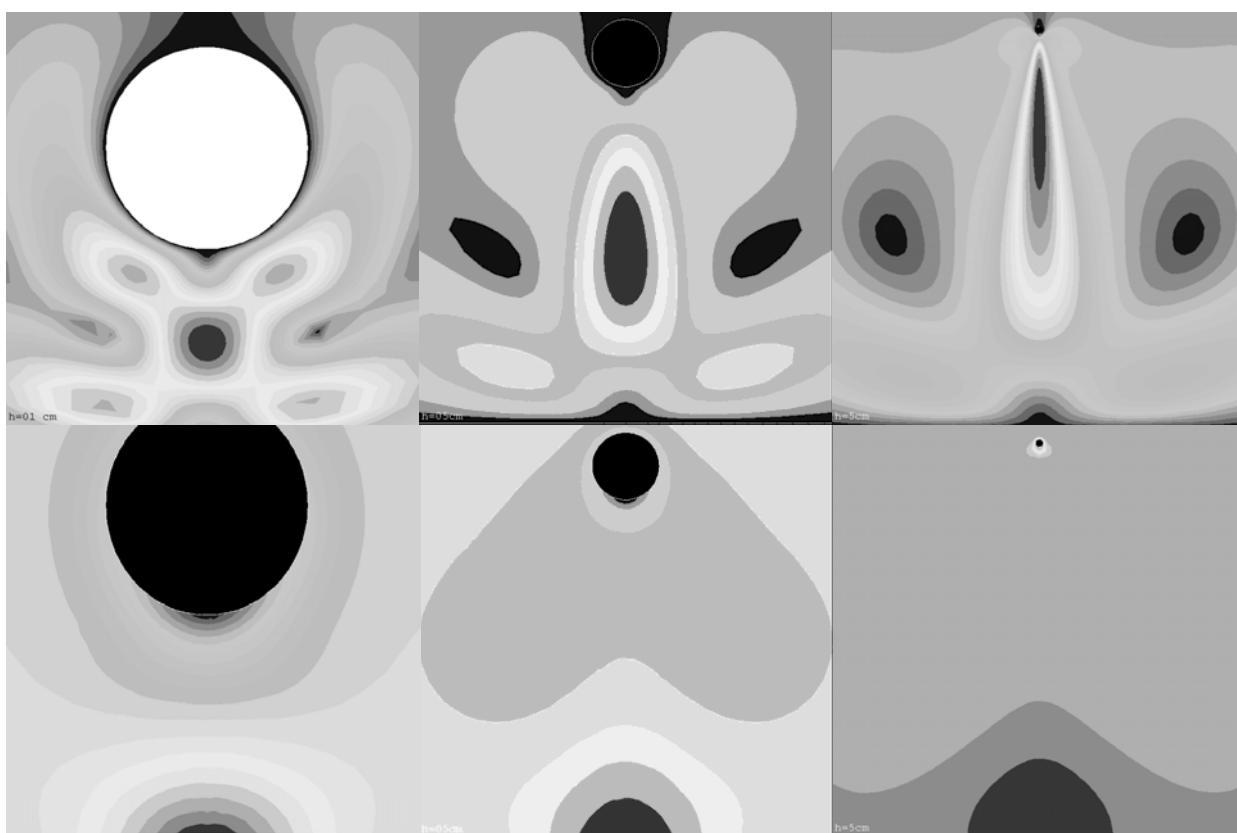


**Рисунок 3.26.** Нормированные распределения скорости (а) и ускорения (б) вдоль центральной оси течения.

Значения скорости и ускорения нормированы к их максимальным значениям, а расстояния к длине межэлектродного промежутка. Для больших межэлектродных промежутков зоны ускорения и торможения разделены промежуточной зоной слабоизменяющегося течения. При больших

межэлектродных расстояниях, зона ускорения занимает менее 5 % межэлектродного промежутка. При малых межэлектродного промежутка зоны ускорения и торможения перекрываются. Это особенно отчетливо видно на рис.3.26,b. Поскольку преобразование электрической энергии в гидродинамическую в основном происходит в зоне ускорения, то это приводит к уменьшению эффективности ЭГД-преобразования.

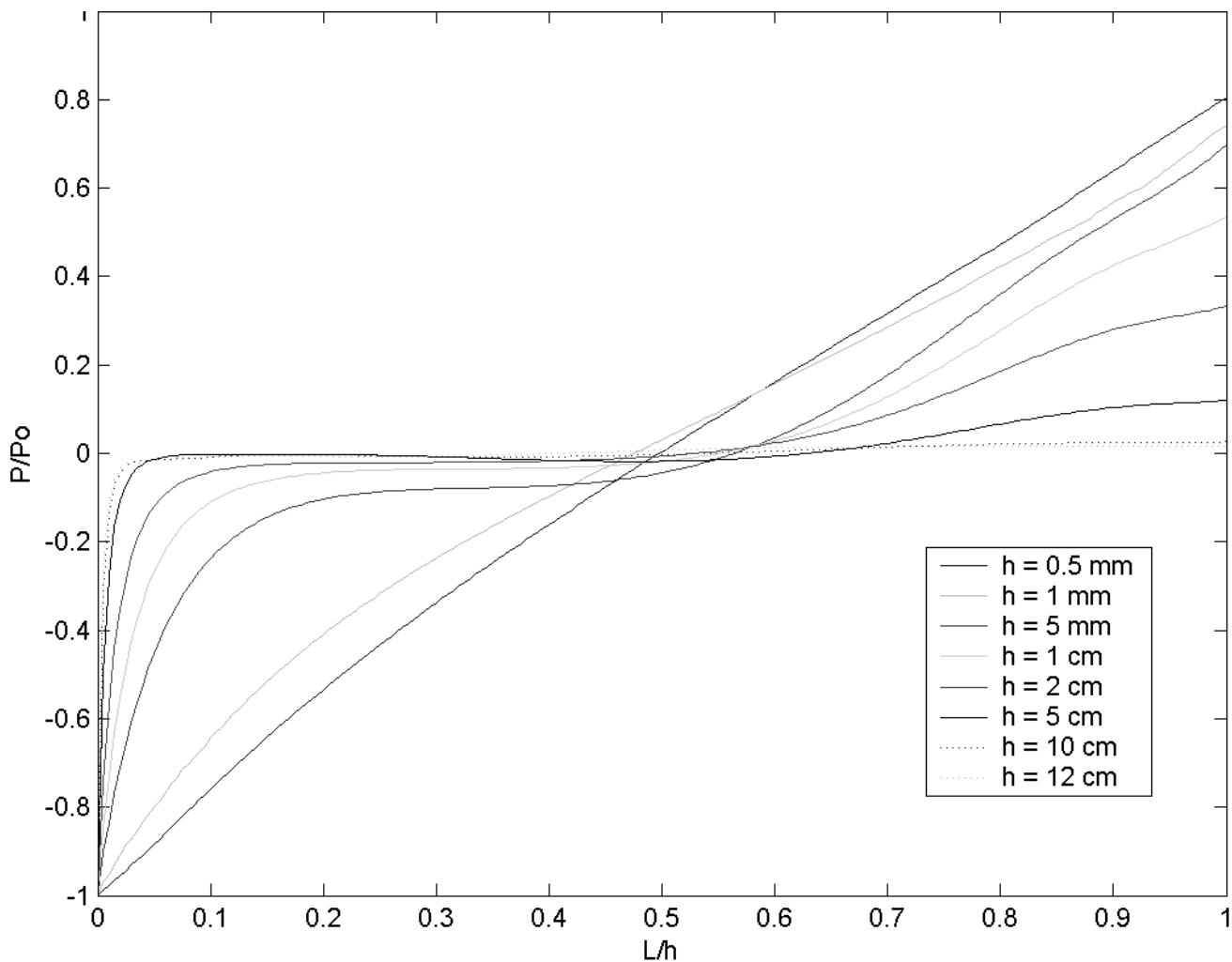
Ниже (рис.3.27) представлены контурные графики распределения скоростей и давлений для различных межэлектродных расстояний. На них хорошо просматривается качественное изменение зонной структуры течений. Сначала происходит расширение зоны равномерного течения, а затем эта зона, по мере увеличения промежутка, располагается всё ближе к электроду, нарушая симметрию.



**Рисунок 3.27.** Зависимости скорости (вверху) и давления (внизу) ЭГД-течений для разных размеров межэлектродного промежутка 1, 5 и 50мм, соответственно.

Влияние приэлектродных зон на кинематику ЭГД-течения при малых межэлектродных расстояниях объясняется характером распределения давлений, представленных на рис.3.28. Видно (рис.3.28), что при больших межэлектродных расстояниях, давление на большей части промежутка постоянно. Имеются лишь локальные области пониженного давления у активного электрода и повышенного давления у плоского электрода. Размеры зоны пониженного давления практически не зависят от размеров

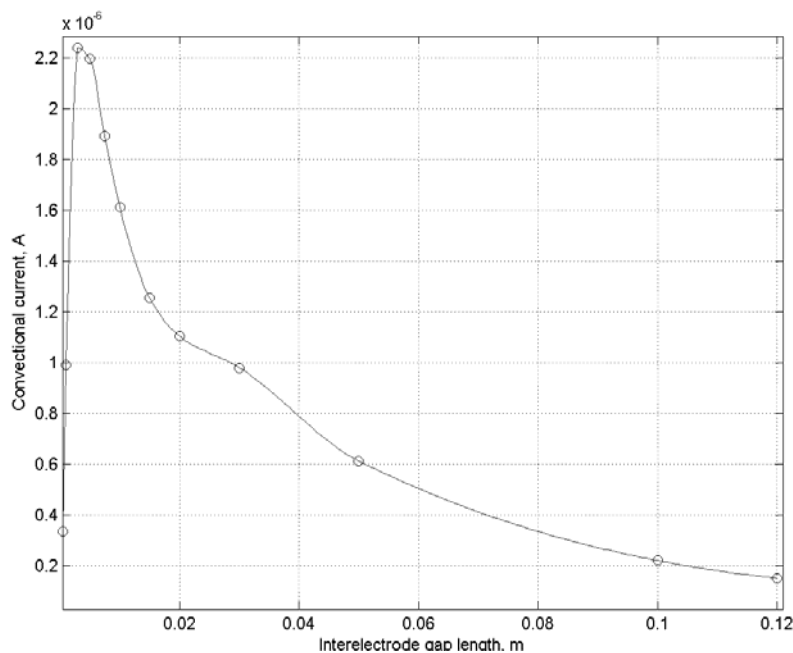
межэлектродного промежутка, а определяются, в основном, размерами активного электрода. При уменьшении размеров межэлектродного промежутка обе эти зоны захватывают все большую часть его, а при достаточно малых расстояниях перекрываются в середине межэлектродного промежутка. Как уже отмечалось в работе [10], местоположение максимума ускорения жидкости определяется размерами зоны пониженного давления. У активного электрода ускорение жидкости определяется равнодействующей электрических сил и сил давления. Кулоновские электрические силы имеют монотонно ниспадающий характер, а отрицательное давление в приэлектродной области максимально у поверхности электрода. Эта структура и определяет характер ускорения в приэлектродной зоне. Местоположение максимума ускорения определяется структурой приэлектродной зоны пониженного давления и ее размерами. В свою очередь, эта структура определяется размерами и характером обтекания цилиндрического электрода и не связана с размерами межэлектродного промежутка.



**Рисунок 3.28.** Изменение распределения давления в жидкости при разных межэлектродных расстояниях.

На рис.3.18 приводились характерные линии тока ЭГД-течения. Видно, что в окрестности активного электрода картина обтекания электрода несимметрична, а именно, под электродом линии тока в приэлектродной области быстро сужаются, формируя узкую заряженную струйку. Это связано с наличием зоны пониженного давления в приэлектродной области, локализованной под активным электродом. Чем меньше величина межэлектродного промежутка, тем обширнее, относительно размера межэлектродного промежутка, эта зона и, следовательно, наблюдается более пологий рост кривой ускорения. В дальней части приэлектродная область уже не оказывает влияния, и ускорение жидкости определяется только электрическими силами. Заметим, что преобразование электрической энергии в кинетическую происходит на протяжении всей зоны ускорения. При малых размерах межэлектродного промежутка, когда зоны ускорения и торможения перекрываются, степень этого преобразования оказывается ниже, несмотря на рост электрических сил, что и определяет аномальную ветвь кривой (рис.3.28). Можно предположить, что при уменьшении размеров межэлектродного промежутка ниже определенного значения ЭГД-течения возникать вообще не будут. Судя по характеру спада скорости, этот порог лежит на уровне 0,1мм. На наш взгляд именно этим можно объяснить изменение различных электрофизических характеристик диэлектрических жидкостей в малых зазорах.

В результате численного моделирования мы обладаем полной информацией об ЭГД-течении. В частности, мы можем вычислить изменение конвективной составляющей тока в центральной струе ЭГД-течении при различных межэлектродных расстояниях (рис.3.29).



**Рисунок 3.29.** Зависимость конвективного тока от величины межэлектродного промежутка.

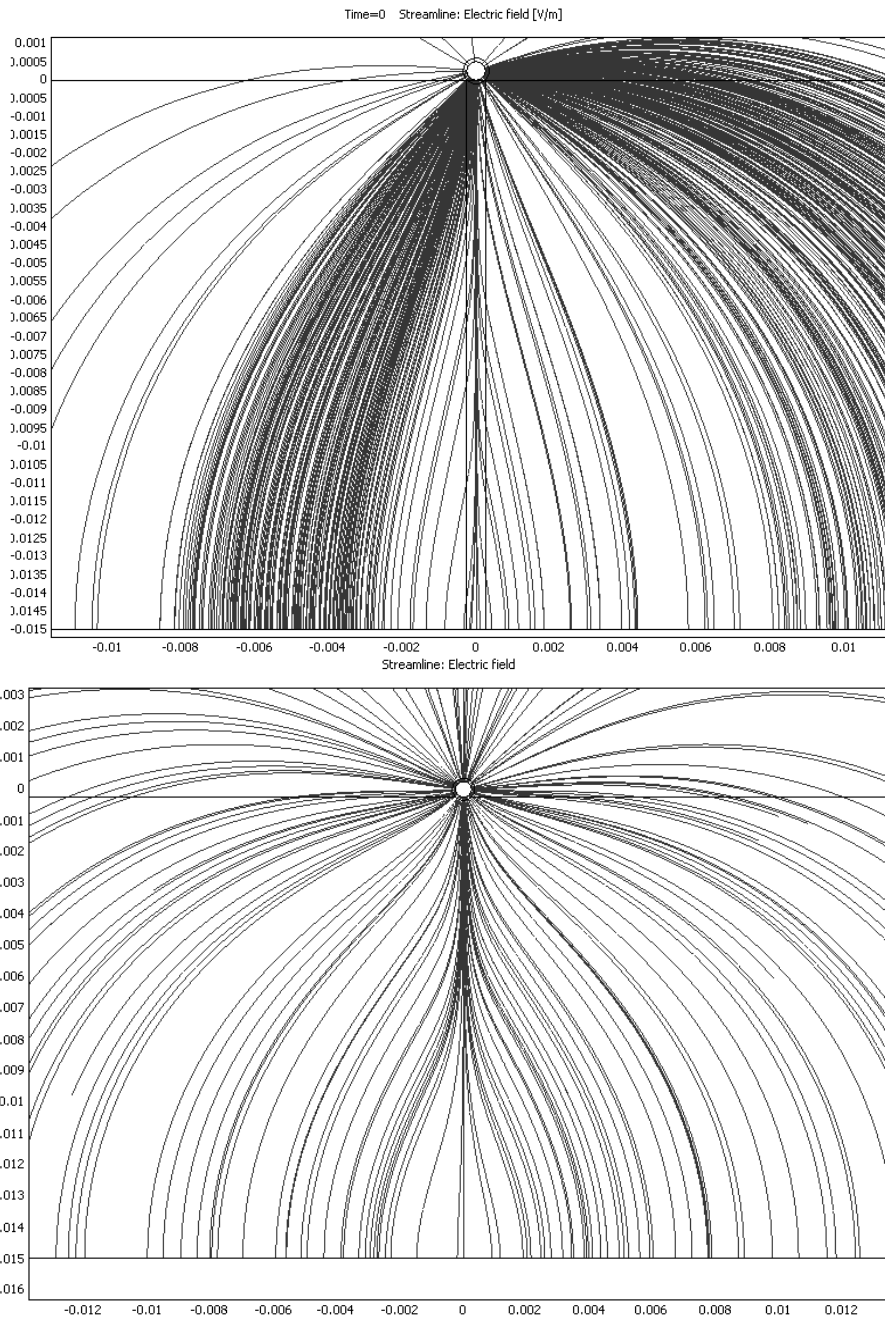
Сравнивая рис.3.29 и рис.3.25 можно сделать вывод, что графики зависимости скорости течения и конвективного тока от длины межэлектродного промежутка повторяют друг друга. Зная распределение электрического тока, мы можем определить характер изменения проводимости жидкости. Эта зависимость также имеет экстремальный характер, достигая максимума при  $l_0=5\text{мм}$ . В то же время в экспериментальных исследованиях получена монотонная зависимость проводимости от размеров межэлектродного промежутка. Это можно объяснить тем, что в нашей модели не рассматривается заряд, образующийся у плоского электрода и не учитывается движение ионов относительно жидкости. При сближении электродов заряженные области около двух электродов перекрываются, и основной вклад в ток дает миграционная составляющая. В дальней зоне эта составляющая незначительна, и ход полученной численно зависимости совпадает с полученной экспериментально.

В результате проведенного исследования установлено, что предложенная физическая модель ЭГД-течения позволяет рассчитывать поля скоростей ЭГД-течения при различных межэлектродных расстояниях, описать и объяснить особенности ЭГД-течений в малых промежутках. Показано, что при малых расстояниях между электродами на кинематику ЭГД-течения значительное влияние оказывает перекрытие приэлектродных зон повышенного и пониженного давления. Описан механизм снижения эффективности ЭГД-преобразования при малых значениях межэлектродного промежутка и оценен пороговый размер межэлектродного промежутка, в котором возможно возникновение ЭГД-течений в трансформаторном масле. Для расчета тока и проводимости жидкости при малых расстояниях необходимо учитывать миграционную составляющую тока и биполярный характер инжекции. При конструировании ЭГД-устройств необходимо учитывать описанную структуру ЭГД-течений и наличие приэлектродных зон пониженного давления.

### ***Сравнительный анализ течений с функциональной и постоянной нагрузкой***

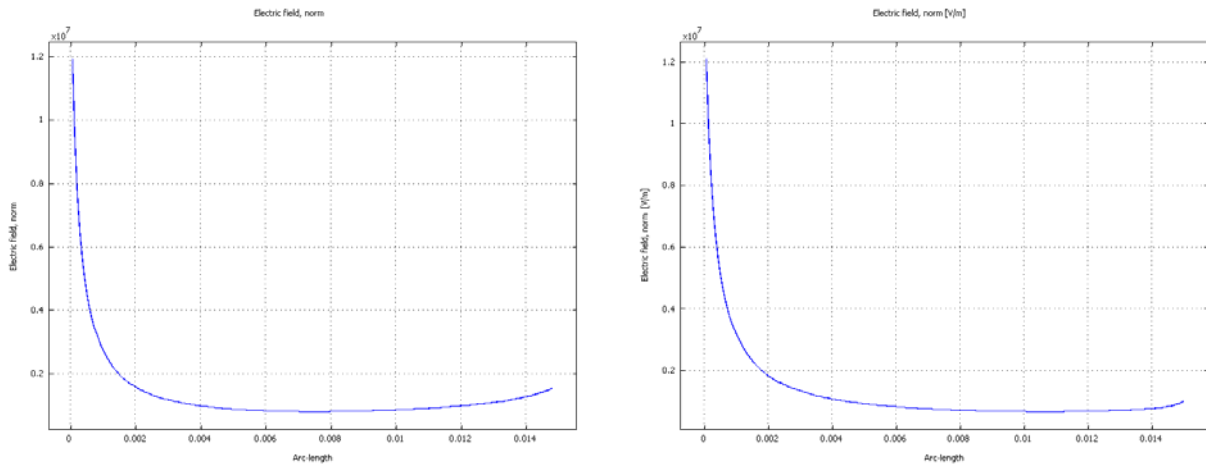
Рассмотрим два случая ЭГД-течения, полученные разными методами. В первом случае плотность объёмного заряда задается функционально (далее – 1-й случай), а в другом задается однородное распределение в виде прямоугольной полосы между электродами (далее – 2-й случай).

На рис.3.30 представлены соответствующие силовые линии электрического поля для обоих случаев. Видно, что во втором случае линии концентрируются в заряженной полоске на протяжении всего межэлектродного промежутка. В обоих случаях видно заметное влияние объёмного заряда на картину электрического поля (по сравнению с обычной электростатической задачей провод над плоскостью без объёмного заряда).



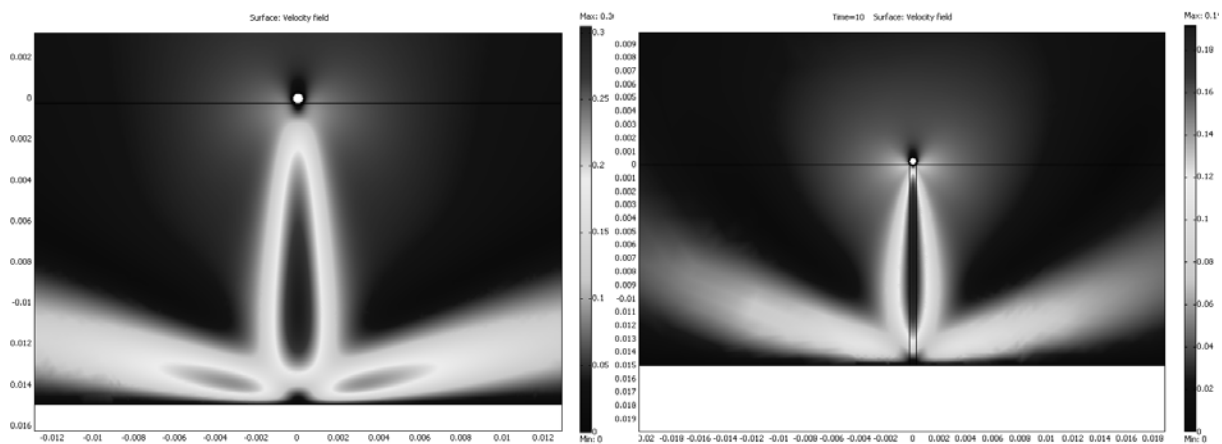
**Рисунок 3.30.** Силовые линии электрического поля для 1-го и 2-го методов задания объёмного заряда, соответственно.

По рис.3.31 можно проследить поведение поля по осевой силовой линии. Различия заключаются в небольшом смещении местоположения точки минимума и скорости возрастания вблизи плоского электрода. Перечисленные различия влияют на структуру ЭГД-течения.



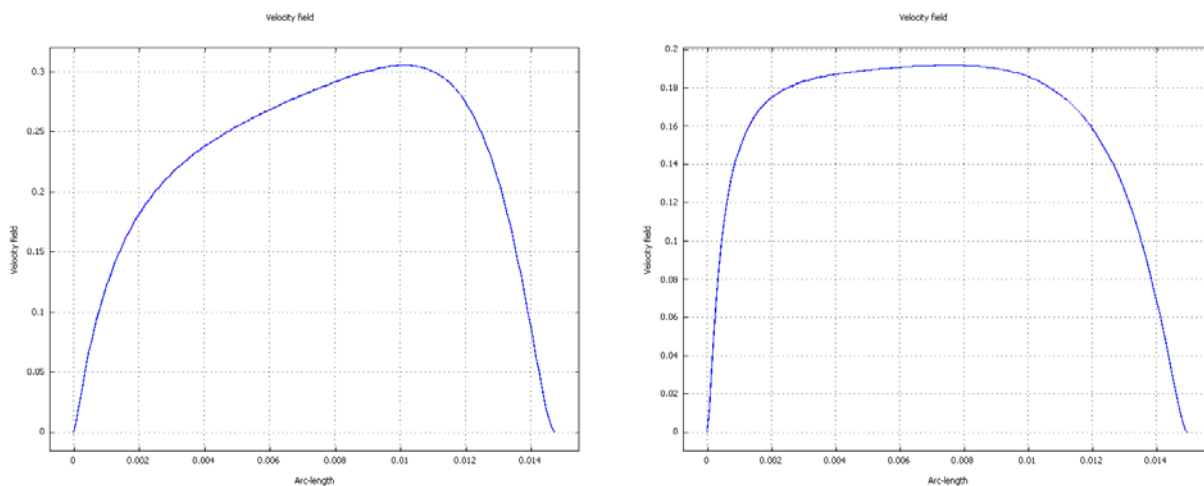
**Рисунок 3.31.** Осевой график напряжённости электрического поля.

Как видно (рис.3.32 и 3.33), во 2-м случае течение имеет четкое разделение на три зоны: ускорения, равномерного течения и торможения, тогда как в 1-м случае жидкость в зоне равномерного движения всё-таки испытывает небольшое ускорение, вплоть до зоны торможения. Профили же скорости (рис.3.34) идентичны по своему характеру, имеют форму Гауссова профиля и зависят только от ширины области действия сил, а спад по оси  $x$  определяется только вязкими силами.

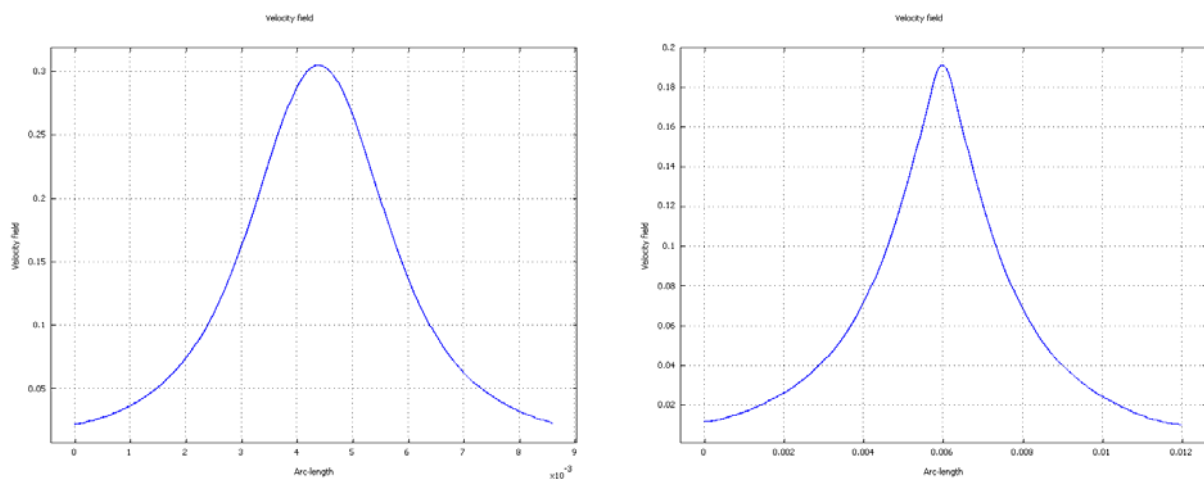


**Рисунок 3.32.** Контурные распределения скоростей, слева – функциональное распределение, справа – в виде полоски (полоска видна на графике).



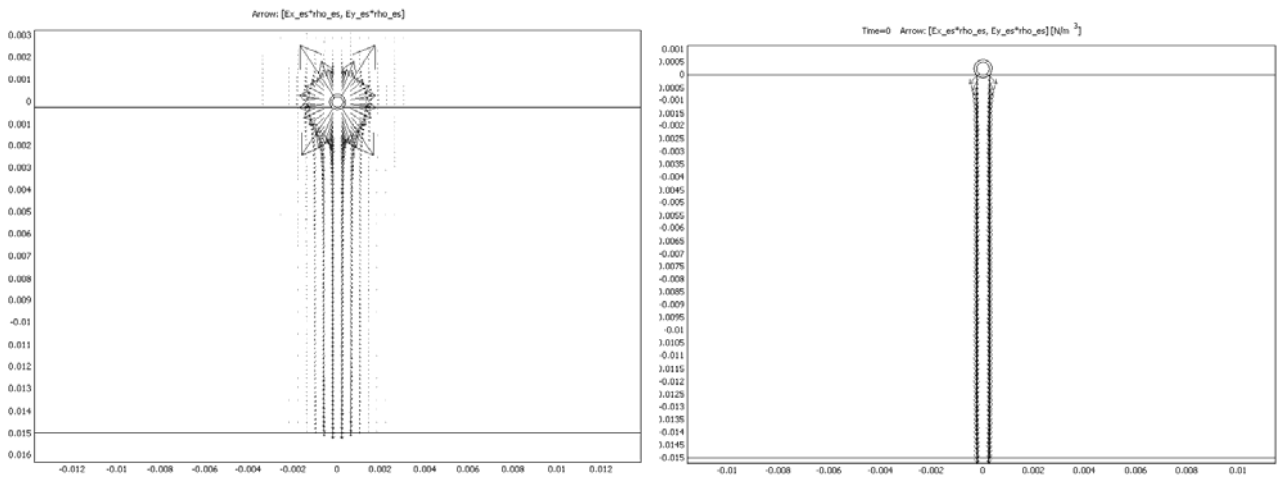


**Рисунок 3.33.** *Осевые распределения скорости: слева – функциональное распределение, справа – в виде полоски.*



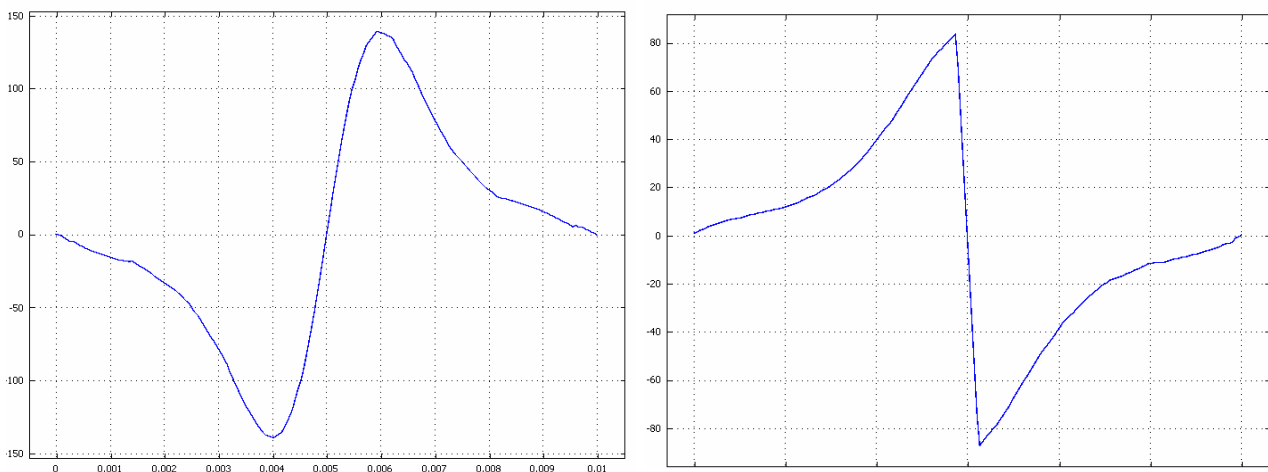
**Рисунок 3.34.** *Профили скорости: слева – функциональное распределение, справа – в виде полоски.*

Рассмотрим силы, действующие на жидкость (рис.3.35). В 1-м случае мы видим что область действия сил гораздо больше, при удалении от центральной линии векторы начинают поворачиваться от центра струи, вследствие чего струя захватывает гораздо большее пространство чем во 2 случае.



**Рисунок 3.35.** Векторные графики сил.

Если построить графики производных скорости по пространственным координатам (рис.3.36), то можно заметить что они испытывают излом на границе области с объёмным зарядом (для 2-го случая). В 1-м случае заряд задается функционально, и поэтому четкой границы нет, но производная все равно испытывает перегиб, хотя и не такой резкий.



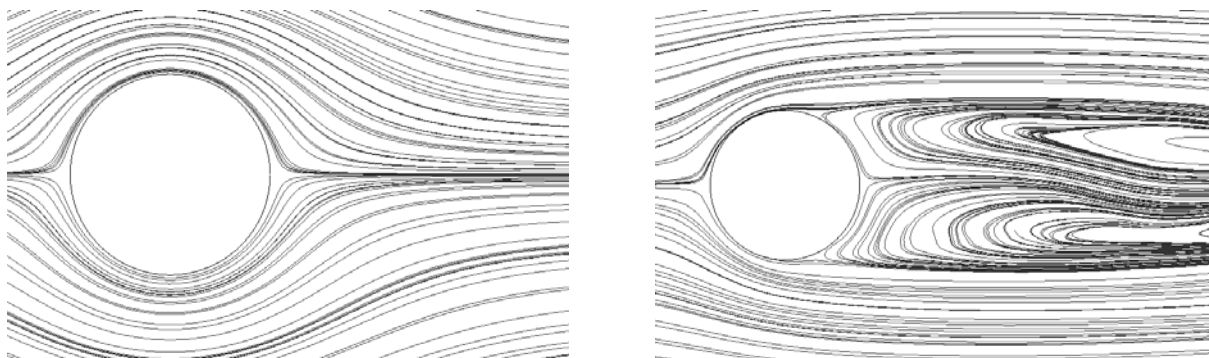
**Рисунок 3.36.** Производная скорости по координате  $x$  (1-й случай слева, 2-й – справа).

Поскольку данные о профиле скорости доступны непосредственно из экспериментов, то возможно по таким производным определить область локализации заряда в ЭГД-струе.

При сравнении течений при разных методах задания распределения плотности объёмного заряда, по структуре ЭГД-течений можно судить о различиях в зарядовой структуре.

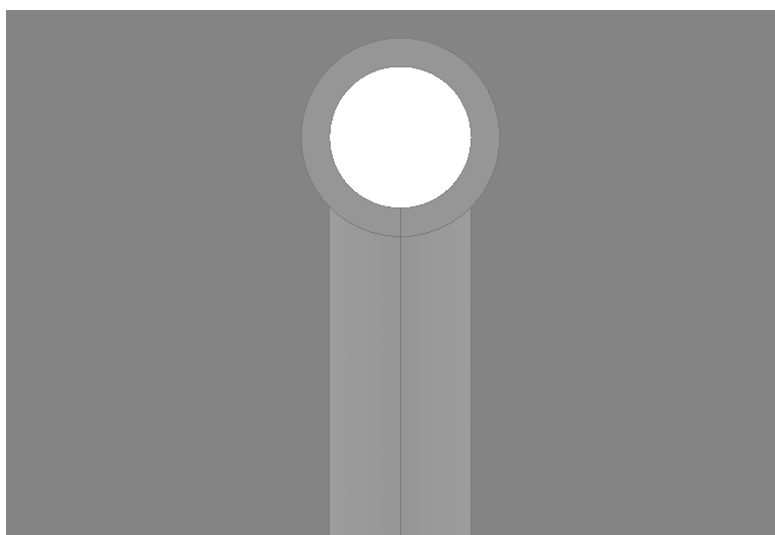
## Решение ЭГД-задачи итерационным методом в FEMLAB [10,16,20,24,25,31]

Итерационный метод решения ЭГД-задачи состоит в пошаговом перестроении области объемного заряда на основе полученного решения на предыдущем шаге. Рассмотрим этот метод подробнее.



*Рисунок 3.37. Линии тока жидкости обтекания шара при ползучем (слева) и отрывном (справа) характере течения.*

Решим следующую гидродинамическую задачу – обтекание шара и посмотрим на линии тока жидкости (рис.3.37). На представленных течениях видно, что линии тока при ползучем характере течения симметричны относительно центра цилиндра, а при отрывном не расходятся на расстояние более чем диаметр шара. Даже при увеличении скорости потока, когда появляется дорожка Кармана, выше сказанное утверждение не перестает выполняться.

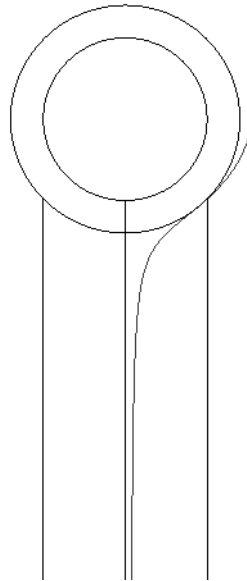


*Рисунок 3.38. Распределение объёмного заряда на первой итерации (увеличенная область цилиндрического электрода).*

Так как в ходе выполнения работы предполагается «вмороженность» заряда в жидкость, то вышесказанное приводит к тому, что в первом

приближении можно ограничить область объёмного заряда полосой в межэлектродном промежутке, ширина которой равна диаметру электрода. Таким образом, на первом шаге в качестве объёмной нагрузки для электростатической задачи задавалась область заряда, показанная на рис.3.38.

После решения первого шага для продолжения итерационного процесса необходимо выбрать линию тока, которая касается заряженного кольца вокруг электрода и сносит заряд в межэлектродный промежуток, и тем самым определяет границу заряженной области (рис.3.39).



**Рисунок 3.39.** "Граничная" линия тока.

Для этого, решение переносится в *Matlab* (*File* → *Export* → *FEM Structure...*), где извлекаются данные о координатах точек, принадлежащих линии тока, с помощью следующих команд *Femlab*:

```
h=postplot(fem, ... //название структуры экспортированной из Femlab
'poststreamoldcode','on', ...
'flowdata',{'u','v'}, ... //переменные для построения линий тока
'flowcolor',[1.0,0.0,0.0], ...//цвет линий тока
'flowstart',{[Xo],[Yo]}, ... //начальная точка линии тока
'flowmaxsteps',1260, ... //количество шагов построения
'flowback','off', ...
'title','Streamline: Velocity field [m/s]', ...
'refine',2);
x=get(h( ... ), 'XData'); //координаты по оси X
y=get(h( ... ), 'YData'); //координаты по оси Y
x1=x(1,:);
y1=y(1,:);
x1_small=0;
y1_small=0;
```

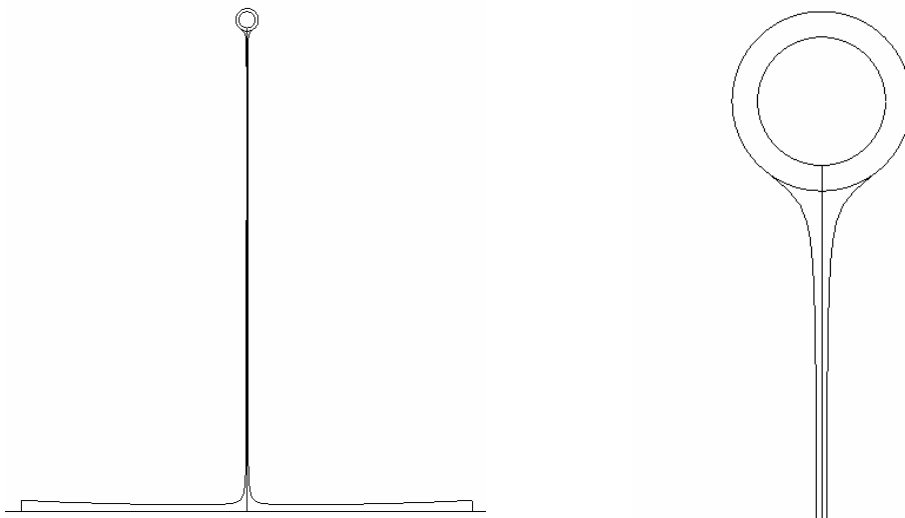
```

n=length(x1);           //количество точек линии тока
k=1;
x1_small(k)=x1(1);
y1_small(k)=y1(1);
for I = 2:1:n,
    a=x1(I)-x1_small(k);
    a1=y1(I)-y1_small(k);
    L=sqrt(a^2+a1^2);
    if (L>0.00007)
        k=k+1;
        x1_small(k)=x1(I);
        y1_small(k)=y1(I);
    end
end
end

```

Далее идет уменьшение количества точек. Точки удаляются таким образом, чтобы расстояние между оставшимися точками не превышало заданной величины.

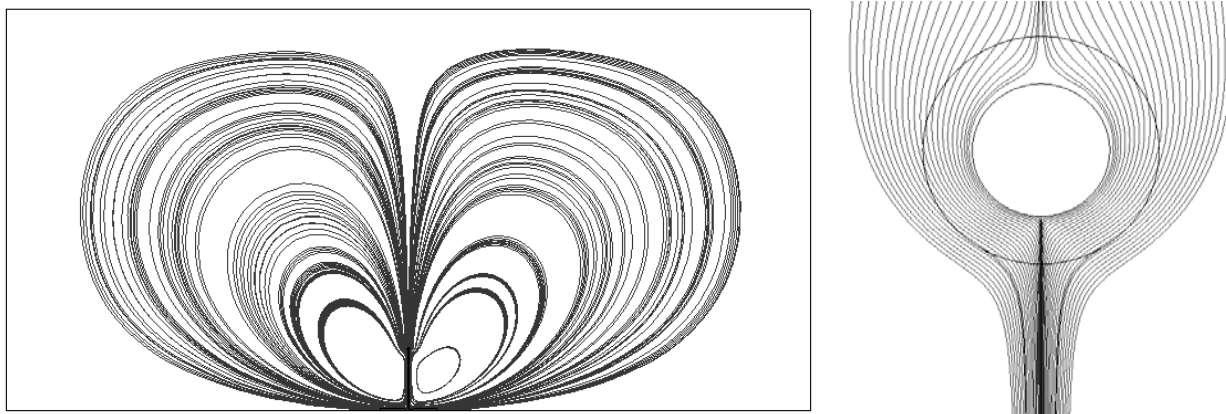
После этого начинается вторая итерация. Необходимо построить новую область объемного заряда. Для этого в меню построения линий (*Draw* → *SpecifyObjects* → *Line...*), поля *Coordinates* необходимо ввести полученные координаты  $X$  и  $Y$ . После чего получим кривую, повторяющую линию тока. Теперь для получения области необходимо её отразить симметрично оси  $Y$  (*Draw* → *Modify* → *Mirror...*), построить линии, соединяющие начальную и отражённую кривые в области плоского и цилиндрического электрода, выделить все 4 кривые и выполнить команду *Solid* (*Draw* → *Soerce to* → *Solid*). После чего задать в области заряд и решить электрогидродинамическую задачу (рис.3.40).



**Рисунок 3.40.** Область существования заряда на втором шаге, справа – увеличенное изображение цилиндрического электрода.

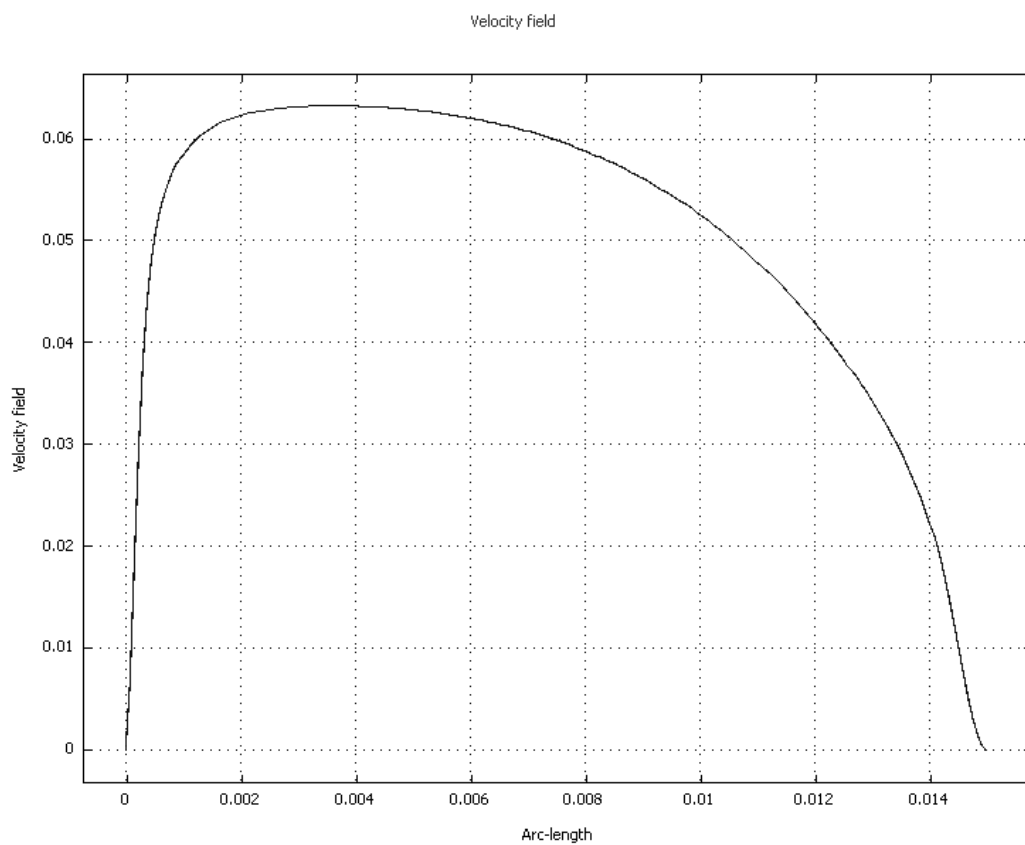
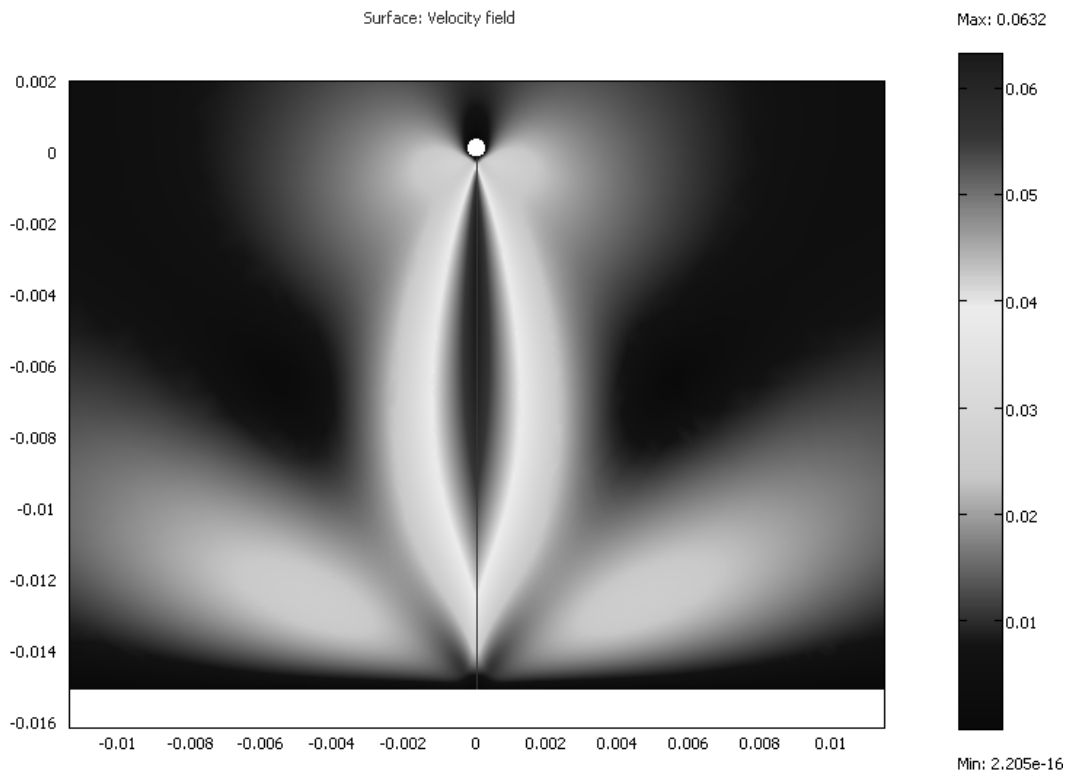
Повторением вышеописанной процедуры осуществляется итерационный процесс. С каждым шагом отклонение новой линии тока от границы "заряженной области" уменьшается. Когда от шага к шагу результат перестает изменяться, с заданной величиной погрешности, считается, что итерационный процесс завершен. Ниже представлены результаты решения.

На рис.3.41 представлены линии тока ЭГД-течения на последней итерации. ЭГД-течение имеет ламинарный параллельно-струйный характер и направлено от проволочного электрода к плоскому. Видно (рис.3.41), что линии тока в приэлектродной зоне имеют воронкообразный характер и хорошо соответствуют форме заряженной струйки. Этот эффект противоположен эффекту отрыва течения при обтекании цилиндра и характерен для формирования течения с объемной нагрузкой. Сужение происходит на расстоянии порядка радиуса цилиндра, а далее линии тока взаимнопараллельны.



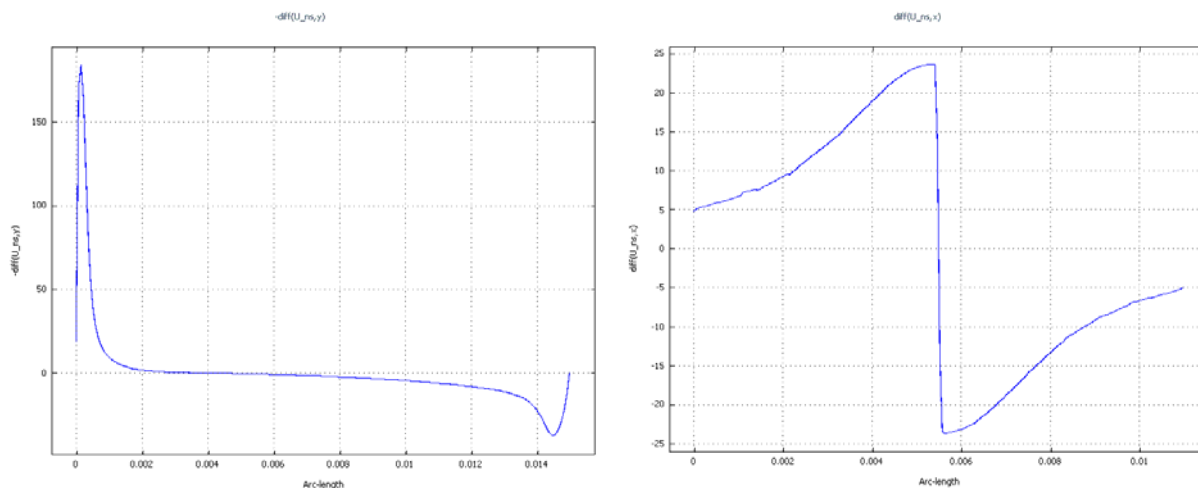
*Рисунок 3.41. Линии тока. Слева – вся кювета, справа – область у цилиндрического электрода.*

Это соответствует зонной структуре (рис.3.42): практически неподвижные области около электродов, зона ускорения, лежащая у электрода в области сужения линий тока, зона слабоизменяющегося течения, соответствующая области взаимно параллельных линий тока, и зона слабого торможения, соответствующая области раздвоения центральной струи течения. Зонная структура течения очень хорошо прослеживается на осевом распределении скорости (рис.4.33, снизу).



*Рисунок 3.42. Контурный график (сверху) и осевое распределение (снизу) скорости.*

Зависимость производной скорости по продольной координате (рис.3.43, слева), позволяет точно оценить пространственное расположение характерных зон ЭГД-течения. Это распределение имеет выраженную двугорбую структуру: выраженный пик ускорения в малой окрестности активного электрода и менее выраженная ямка торможения у противозэлектрода.

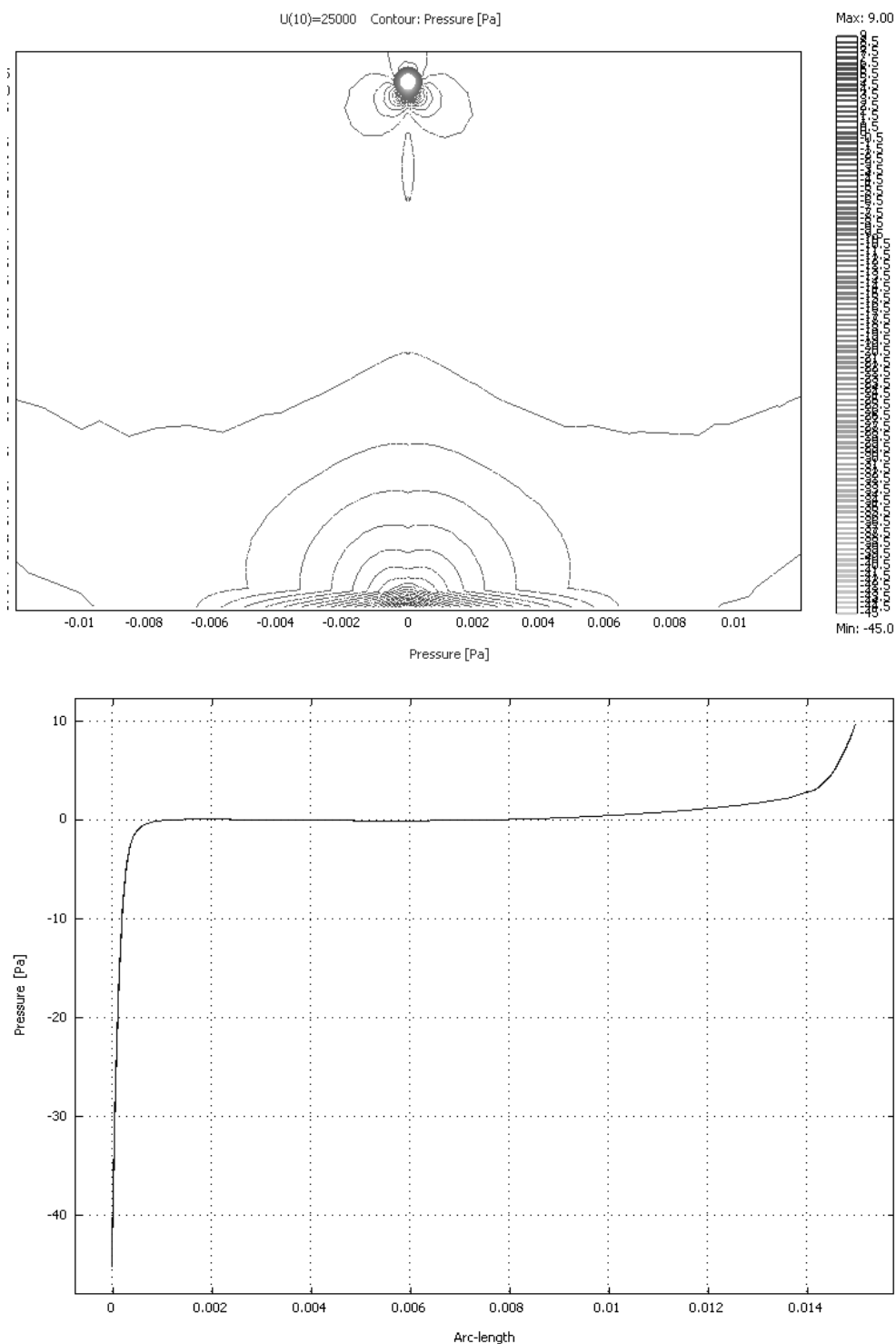


**Рисунок 3.43.** Осевое распределение ускорения (слева) и производная осевой составляющей скорости по поперечной координате (справа).

Производная продольной скорости по поперечной координате имеет два излома на границах области приложения объемного заряда, т.е. на боковых границах заряженной струйки (рис.3.43, справа).

ЭГД-течения также характеризуется двумя характерными зонами давления (рис.3.44), расположенными на различных концах заряженной струйки: зоны пониженного давления, лежащей в приэлектродной области и сосредоточенной в основном в области заряженного кольца, окружающего активный цилиндрический электрод и зоны повышенного давления, лежащей в области соударения центральной струи ЭГД-течения с пассивным плоским электродом, имеющей полукруглую форму. Зона пониженного давления имеет выраженный «максимум» у поверхности активного электрода, отрицательное относительное давление быстро спадает от поверхности электрода в жидкость. Область локализации зоны пониженного давления – это в основном неподвижный заряженный приэлектродный слой, имеется небольшое понижение давления в области заряженной струи.

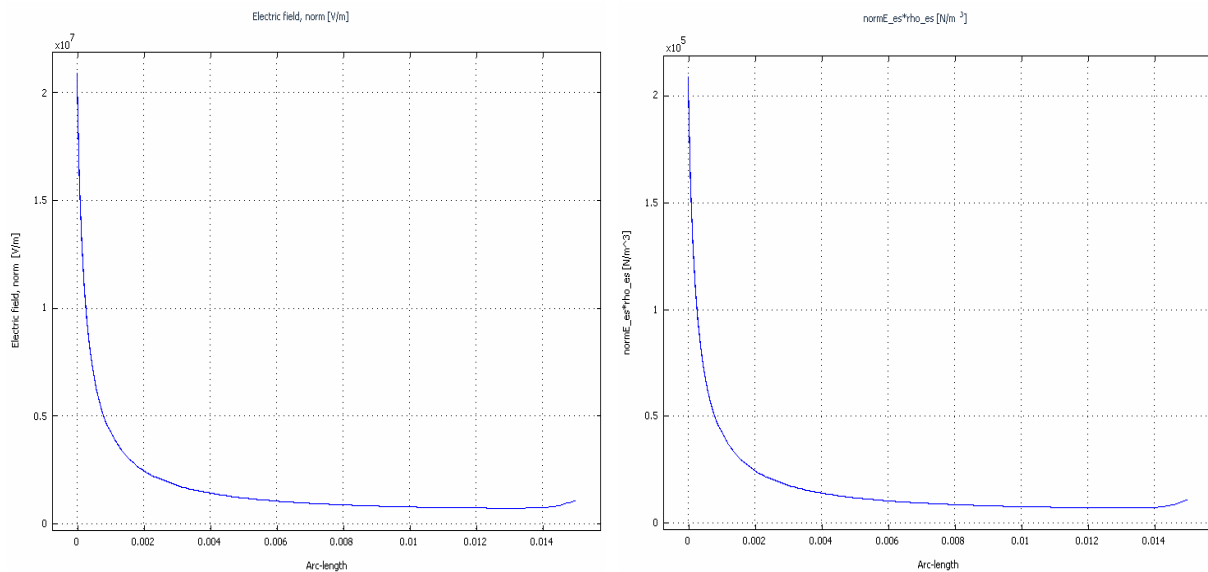




**Рисунок 3.44.** *Контурный (сверху) и осевой (снизу) графики давления.*

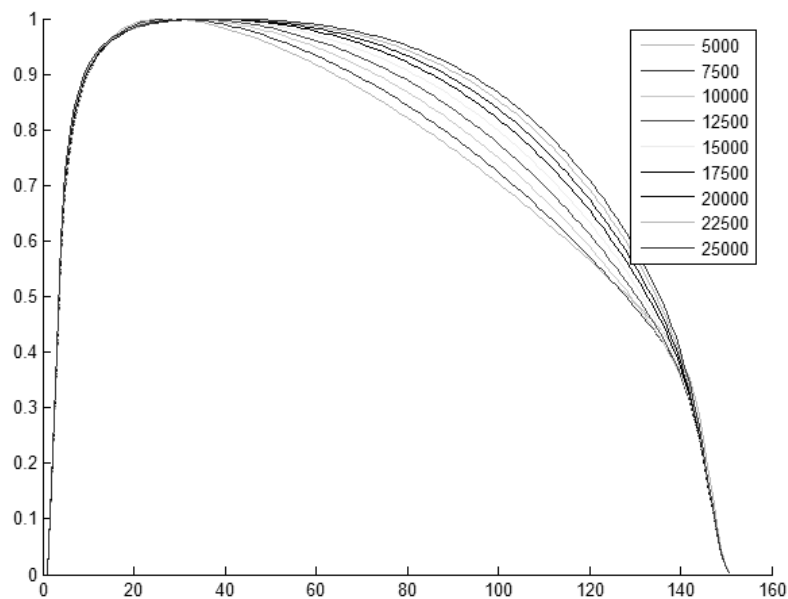
Электрические силы локализованы в пределах заряженной струйки и монотонно спадают от поверхности электрода в жидкость (рис.3.45) и, в отличие от ускорений, не имеют экстремума. Непосредственно в приэлектродной области кулоновские силы создают зону пониженного давления и только на некотором расстоянии от поверхности электрода ускоряют жидкость. Подобная структура создает характерный воронкообразный вид линий тока ЭГД-течения, образующий чрезвычайно

тонкую заряженную струйку в межэлектродном промежутке. Зона ускорения жидкости локализована у активного электрода, непосредственно под ним и имеет размеры сравнимые с диаметром активного электрода.



**Рисунок 3.45.** Осевые распределения электрического поля [В/м] (слева) и плотности объемной силы [Н/м<sup>3</sup>] (справа).

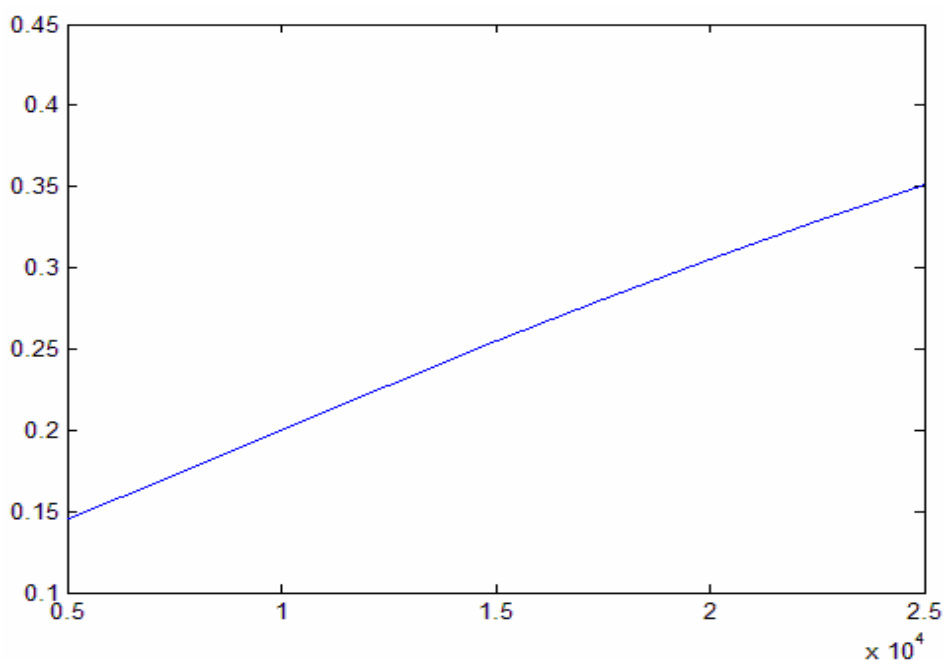
В ходе численных экспериментов получены решения при различных условиях задачи, таких как приложенное напряжение, максимальная плотность заряда в центральной струе. На рис.3.46 представлена зависимость осевого распределения скорости от напряжения ( $U$ ), которое изменялось, как и в первом методе решения, от 5 до 25кВ.



**Рисунок 3.46.** Распределение скорости [м/с] ЭГД-течения вдоль осевой линии для различных напряжений [В].

Начало координат соответствует поверхности цилиндрического электрода, значения нормированы на максимальное значение. Видно, что ЭГД-течения изменяют свою структуру в зависимости от напряжения, причем изменения не затрагивают область ускорения жидкости. При малых напряжениях структура течений имеет неразвитый характер, с увеличением напряжения  $U$  начинает формироваться зона равномерного движения.

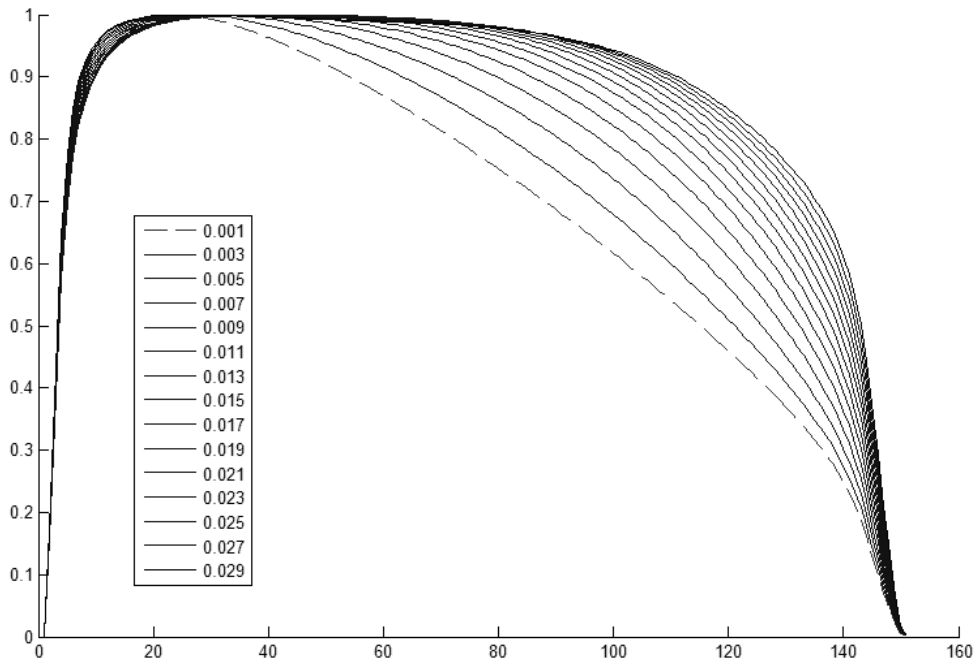
На рис.3.47 представлена зависимость максимума скорости от напряжения. Видно, что она является линейной.



**Рисунок 3.47.** Зависимость максимальной скорости [м/с] от напряжения [В].

Также было рассмотрено влияние величины заряда на ЭГД-течение. Плотность заряда изменялась в диапазоне от 0,001 до 0,029 Кл/м<sup>3</sup>.

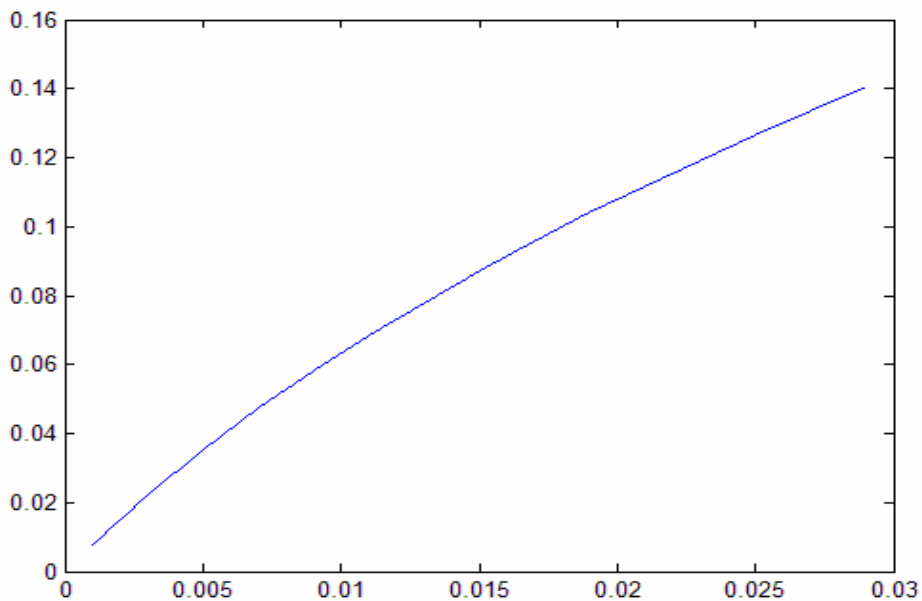
Полученные осевые распределения скорости, нормированные на максимальное значение скорости, представлены на рис.3.48. Видно, что величина плотности заряда не оказывает влияния на структуру зоны ускорения ЭГД-течения, а влияет только на области торможения и равномерного течения, характер зоны ускорения остается неизменным. При малых плотностях заряда после короткой зоны ускорения у активного электрода следует плавная зона торможения. Это характерно для так называемого неразвитого течения. При росте максимальной плотности объемного заряда увеличивается зона равномерного течения. При максимальных значениях плотности заряда в струе достигается наилучшее качественное совпадение с экспериментальными данными по исследованию развитого ЭГД-течения.



**Рисунок 3.48.** Распределение скорости ЭГД-течения [м/с] вдоль осевой линии для различной плотности заряда [Кл/м<sup>3</sup>].

Отметим, что верхняя граница значений плотности объемного заряда строго определена. Увеличение плотности заряда сверх критической величины невозможно, так как влияние заряда на электрическое поле становится слишком велико, и приводит к нефизичным результатам.

Зависимость максимума скорости от плотности объемного заряда (рис.3.49) отличается от линейной и имеет скорее полулогарифмический характер.



**Рисунок 3.49.** Зависимость скорости течения [м/с] от плотности объемного заряда [Кл/м<sup>3</sup>] в струе.

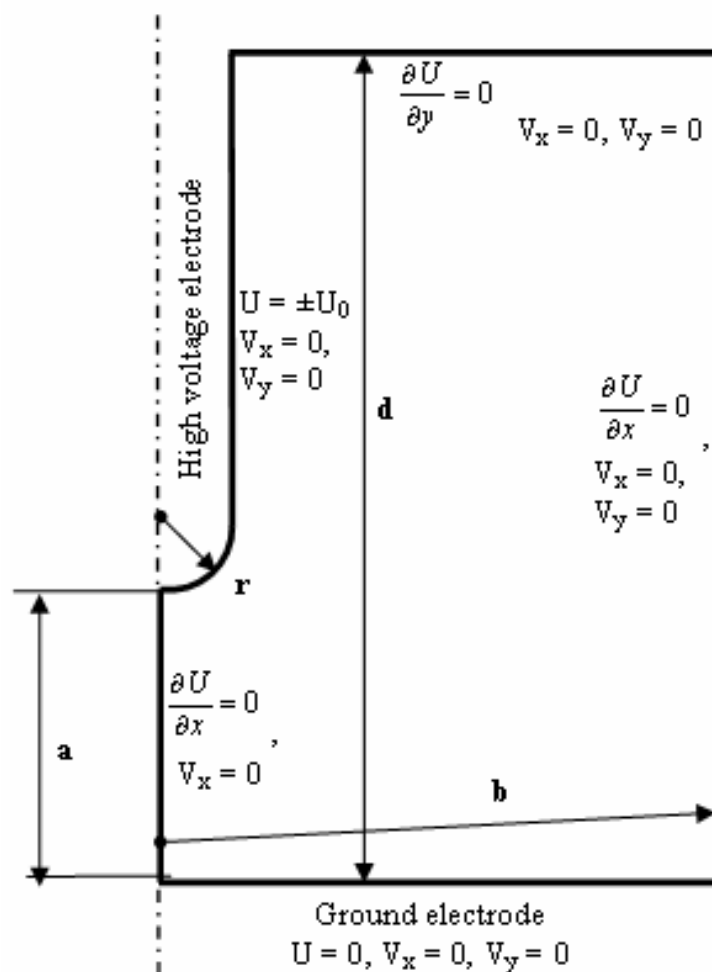
Таким образом, моделирование стационарных ЭГД-течений в системе провод над плоскостью выявило все свойства течений с объемной нагрузкой:

- течение направлено вдоль полосы действия силы, имеет короткую зону ускорения и область квазиоднородного течения,
- торможение жидкости при отсутствии преград начинается на уровне окончания силовой нагрузки, а при наличии преграды непосредственно перед ней,
- профиль скорости течения имеет Гауссов характер, производная продольной составляющей профиля скорости по поперечной координате испытывает излом на уровне границ области приложения силы,
- у начала полосы приложения сил имеется область пониженного давления, а в конце – область повышенного давления, наличие твердых препятствий на торцевых границах полосы приложения сил усиливает эффект.

Отличительной особенностью ЭГД-течений является существенно неоднородное распределение движущих сил вдоль полосы их приложения: силы быстро спадают вдоль заряженной струйки. Это определяет асимметрию полученных распределений. Область ускорения имеет узкий выраженный пик, а область торможения – размытый провал. Область пониженного давления у активного электрода более выражена и локализована, чем область повышенного давления у противоэлектрода.

### **Моделирование стационарных течений в системе игла над плоскостью [24,30]**

Задача моделирования ЭГД-течений в системе игла-плоскость проводилась в системе *АНСИС*. моделирование разделено, как обычно, на две подзадачи, решение которых производится последовательно. Соответствующий алгоритм, заключается в последовательном решении электростатической и гидродинамической задач. Учитывая осевую симметрию исследуемой системы, при моделировании реализуется двухмерная осесимметричная конечно-элементная модель. Геометрия модели (рис.3.50) близко соответствует использованной в эксперименте: цилиндр с высотой  $d=20$  мм и диаметром  $2b=30$  мм, внутри которого расположена игла с диаметром основания  $0,2$  мм и радиусом закругления кончика  $r=0,1$  мм, межэлектродное расстояние  $a=7$  мм. Исследуемая жидкость – трансформаторное масло, его свойства: электрическая проводимость  $\sigma=10^{-12}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=2,2$ , плотность  $\gamma=850$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\eta=0,02$  Па·с (или 20 сПз). Входными данными программы моделирования являются напряжение на электродах, условия на стенках модели, величина плотности объёмного заряда и его начальное распределение. Граничные условия показаны на рис.3.50. Разность потенциалов между электродами составляет 5 кВ.



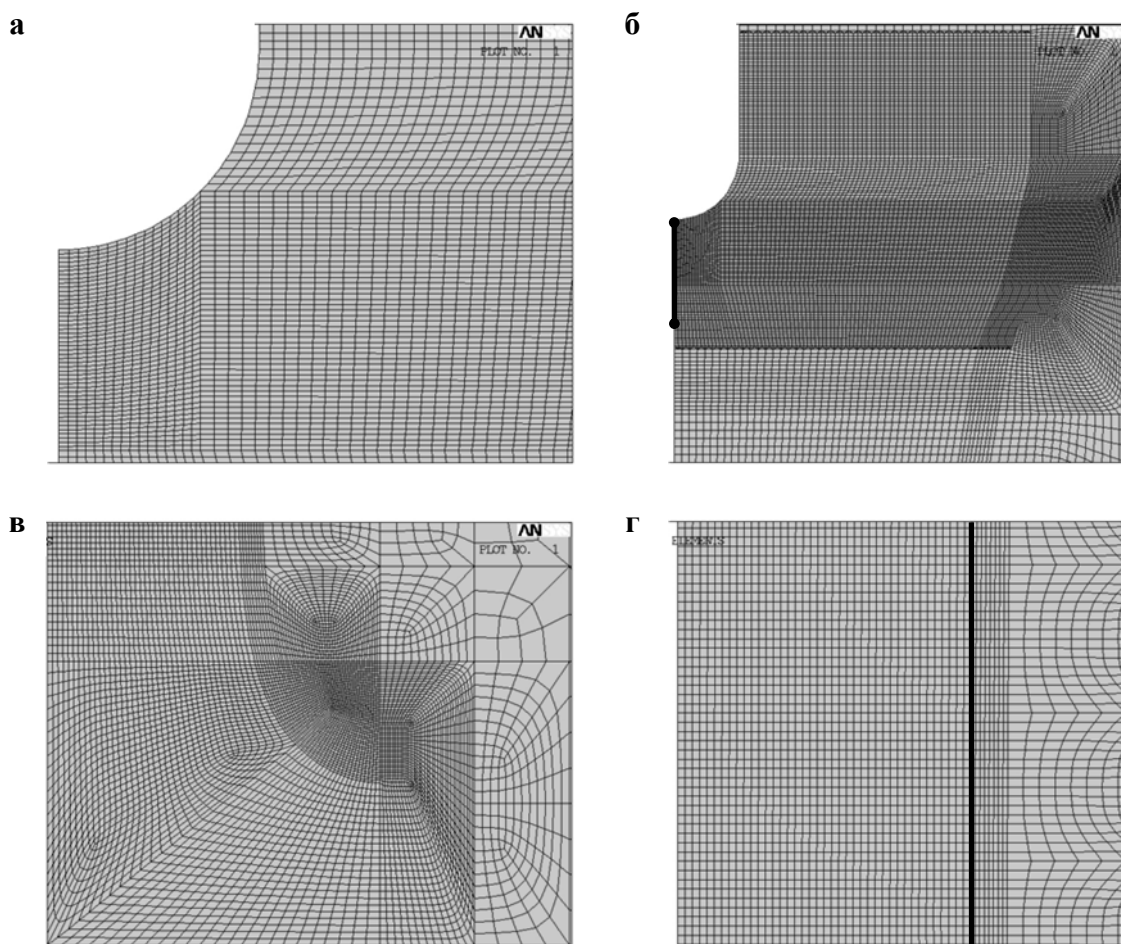
**Рисунок 3.50.** Граничные условия и геометрия компьютерной модели.  
 Обозначения:  $U$  – потенциал,  $V_x$ ,  $V_y$  –  $x$ -я и  $y$ -я компоненты скорости.

Одним из главных вопросов при моделировании является определение распределения объёмного заряда в жидкости. Для этого, как правило, используются некоторые экспериментальные факты, модельные представления и качественные рассуждения. Как обычно предполагается, что непосредственно около активного электрода наблюдается малоподвижная приэлектродная область, заряженная одноименно с электродом. При обтекании электрода жидкостью из приэлектродной зоны заряд смещается вглубь межэлектродного промежутка в виде тонкой струйки. Так как при развитом ЭГД-течении электрическое число Рейнольдса больше 10, то дрейф заряда относительно линий тока жидкости на протяжении межэлектродного промежутка должен быть незначительным. Предполагается, что поперечный размер заряженной струйки сопоставим с радиусом активного электрода. Таким образом, начальную геометрию заряженной области в пределах межэлектродного промежутка разумно задавать в виде цилиндра, радиус которого, как и само значение объёмной плотности заряда, являются параметрами задачи и могут быть изменены на основании сравнения результатов моделирования и эксперимента.

В отличие от качественных представлений, достоверную информацию о размерах заряженной области, ввиду относительно слабой изученности кинетики приэлектродных процессов, можно получить лишь из экспериментальных исследований, а именно на основе анализа особенностей кинематической и динамической структур ЭГД-течения.

При использовании метода конечных элементов важным этапом решения задачи является построение сетки, в узлах которой производятся вычисления, в остальной области решение получается путём интерполяции. Размер и форма элементов сетки непосредственно влияют на точность вычислений. Для уменьшения погрешности решения форма элементов должна быть такой, чтобы стороны каждого элемента имели по возможности одинаковую длину, т.е. для четырёхугольных элементов оптимальной формой является квадрат, а для треугольных – равносторонний треугольник.

В области больших градиентов вычисляемых величин размер элементов должен быть уменьшен по сравнению с размерами элементов из остальной части модели.



**Рисунок 3.51.** Сетка в характерных областях модели: а, б – около поверхности иглы, в – в центре электрода-плоскости, г – в области с объёмным зарядом. Левый край всех фрагментов соответствует оси симметрии модели.

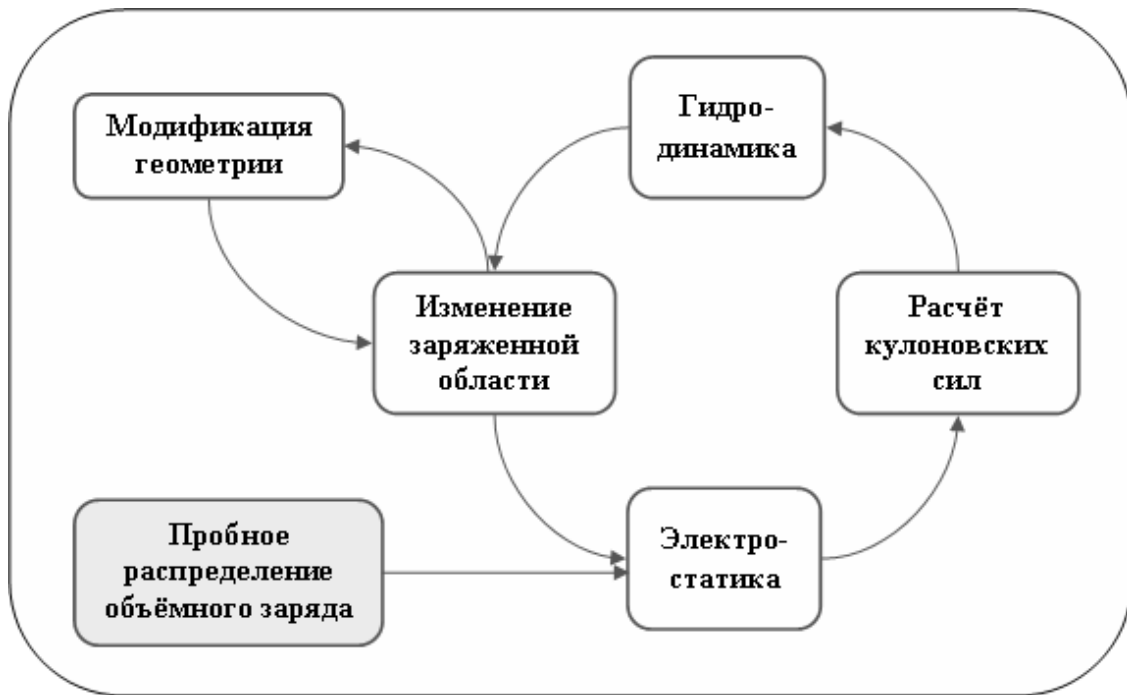
Все указанные требования учитываются при построении конечно-элементной модели, используемой для решения поставленной задачи. Общее количество элементов составило 110 тысяч, из которых 30 тысяч принадлежит заряженной области в межэлектродном промежутке. Наиболее качественная сетка строится вокруг кончика электрода-иглы и в центре электрода плоскости, где жидкость испытывает наибольшие ускорения (рис.3.51,а,в). На промежутке от поверхности иглы и до характерной точки, соответствующей максимуму ускорения жидкости (рис.3.51,б, «жирная» линия), расположено более 50 элементов.

Сетка на 99.98% является упорядоченной и состоит из четырёхугольных элементов, что является существенным при решении гидродинамических задач в *ANSYS*. Учтена особенность, связанная с интерполяцией нагрузок, задаваемых в узлах сетки, на всю поверхность прилегающих элементов: вдоль всей области с объёмным зарядом построены элементы, имеющие одинаковую ширину на всём протяжении межэлектродного промежутка (рис.3.51,г, граница области отмечена «жирной» линией). Для расчёта электростатики использовался элемент *plane121*, для гидродинамики – элемент *fluid141*. Сетки полностью совпадают.

### **Подробное описание алгоритма моделирования**

В данном разделе применен итерационный процесс моделирования заряженной струйки. В первом приближении она задавалась в виде тонкой однородно заряженной области, огибающей поверхность электрода и простирающейся вдоль оси течения до противозэлектрода. Алгоритм решения (рис.3.52) на каждой итерации состоял в решении электростатической задачи с объёмным зарядом и переносом объёмных сил в гидродинамику и решении гидродинамической задачи с объёмной нагрузкой. На второй итерации строились линии тока рассчитанного ЭГД-течения, и область задания заряда корректировалась: заряд задавался между центральной осью течения и линией тока, касательной к внешней границе заряженной области, окружающей игольчатый электрод. Процедура решения повторялась, и следующая итерация вновь включала коррекцию области задания заряда вдоль оси течения с границей по линии тока, полученной на предыдущей итерации.





*Рисунок 3.52. Итерационный алгоритм моделирования.*

Начальное распределение объёмного заряда на первом шаге задавалось в области вокруг электрода-иглы и в межэлектродном промежутке. Область с объёмным зарядом в межэлектродном промежутке представляла собой цилиндр, соосный с осью симметрии модели, с радиусом  $R_3 = s \cdot R_u$ , где  $R_u$  – радиус кончика иглы,  $s$  – параметр, отвечающий за ширину заряженной области. Между итерациями область объёмного заряда корректировалась только в межэлектродном промежутке, а вокруг электрода–иглы оставалась неизменной. Основным критерием оценки решения являлось сохранение конвективного тока в профильных сечениях модели. Сила конвективного тока вычислялась по формуле:

$$I = \int_0^{R_3} v \rho \cdot 2\pi r dr = \rho \int_0^{R_3} v \cdot 2\pi r dr ,$$

где  $v$  – проекция скорости жидкости на ось симметрии, а  $\rho$  – объёмная плотность заряда. Интеграл вычислялся по линии, лежащей в профильном сечении от оси симметрии до границы области объёмного заряда. Учитывая сделанное предположение о неизменности объёмной плотности заряда  $\rho$  в плоскости поперечного сечения, её (плотность) можно вынести за знак интеграла. В таком случае сила тока представляет собой произведение расхода жидкости через поперечную площадку радиуса  $R_3$  на значение плотности  $\rho$ . Следовательно, сохранение силы тока в профильных сечениях эквивалентно сохранению расхода жидкости. Поэтому для улучшения решения, в соответствии с заданным критерием, необходимо совпадение границы области

объёмного заряда с линией тока жидкости, полученной непосредственно для данного распределения заряда.

Основываясь на вышеизложенных рассуждениях, для поиска оптимального решения выполнялась следующая последовательность действий. После решения первого шага задачи, определялись координаты линии тока с фиксированной начальной точкой на границе области с объёмным зарядом, которые записывались в файл. Точка на границе области объёмного заряда, по которой выбиралась линия тока, а точнее говоря, расстояние  $R_z$  от этой точки до оси, является свободным параметром задачи, но этот параметр может изменяться только до начала всего решения и остаётся неизменным между итерациями. На втором шаге решения (вторая итерация) объёмная плотность заряда задавалась в области между осью симметрии модели и полученной линией тока. С учетом этого при определении значения силы тока в сечениях, т.е. при вычислении соответствующего интеграла, значение  $R_z$  определялось уровнем конкретного сечения и зависело от координат линии тока, полученной на предыдущей итерации. При получении нового решения и новой конфигурации линий тока, описанная последовательность действий повторялась.

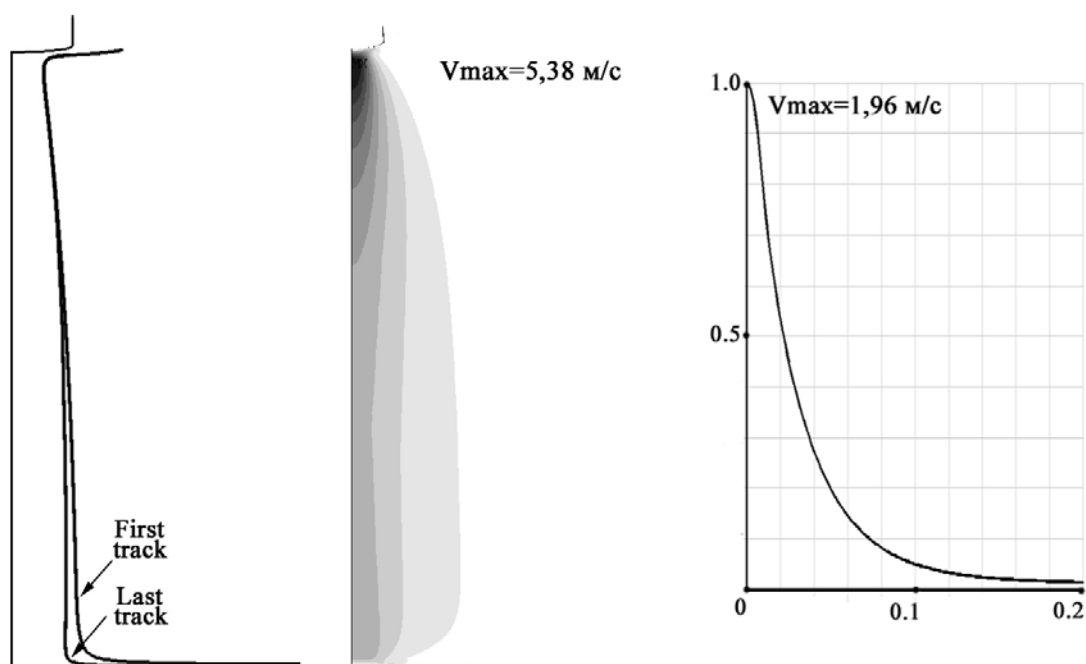
Если линия тока не совпадает с рабочей линией геометрии конечно-элементной модели, то при изменении линии тока на очередной итерации при движении вдоль межэлектродного промежутка область с объёмным зарядом может увеличиваться не меньше, чем на ширину элемента модели. Т.е. область с объёмным зарядом, в общем случае, будет иметь ломаную границу, что может привести к скачкам напряженности поля в окрестности изломов границы заряженной области. В результате ухудшится качество и снизится точность решения. Для устранения подобной ошибки в разработанном алгоритме между каждой глобальной итерацией осуществляется перестроение рабочих линий геометрии. Граница цилиндрической области локализации заряда, заданная на первой глобальной итерации, заменяется на совокупность сплайнов, построенных по координатам линии тока, полученной в результате решения. Для соответствующей интерполяции сплайнами достаточно 10 точек, принадлежащих линии тока и взятых через равные интервалы. Поскольку практически во всей модели реализована *упорядоченная* сетка, то перестроение рабочих линий геометрии происходит за очень малый промежуток времени, и практически не сказывается на общем времени решения задачи (построение *неупорядоченной* мелкой сетки занимает значительное время).

Для контроля описанного выше критерия оценки сходимости решения в ходе расчётов использовались профильные сечения на уровнях 0,1, 0,2, ..., 0,9 межэлектродного расстояния. Разработанный алгоритм позволяет получать решение с неизменным расположением линий тока уже после пятой итерации. При этом выбранный критерий сохранения силы тока после 5-й итерации для сечения на уровне 0,7 межэлектродного промежутка выполнялся на 99%, а для уровня 0,9 – на 96% (при напряжении 5кВ).

### Результаты решения и их анализ

На рис.3.53 представлены границы заряженной области после первой и четвертой итераций.

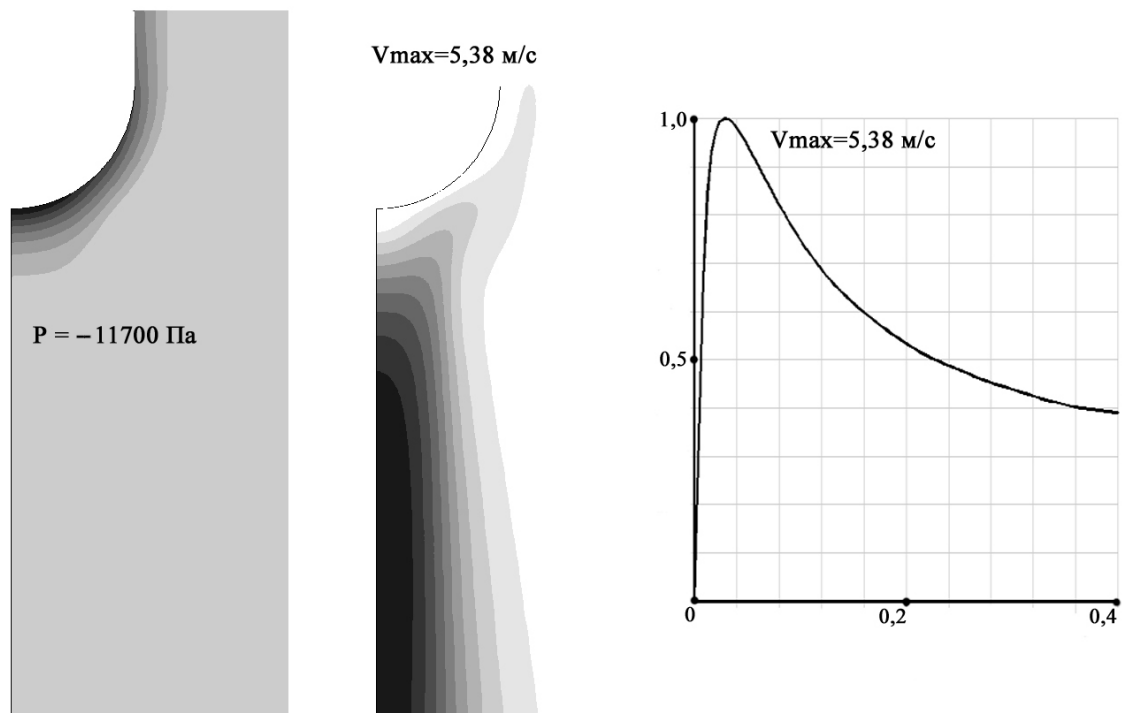
Итерационный процесс достаточно быстро сходится и различие между последними двумя итерациями незначительно. Размер заряженной струйки на последней итерации имеет сужение непосредственно под игольчатым электродом, а в дальней зоне представляет собой цилиндр с радиусом равным радиусу электрода. На рис.3.53, в середине, представлен контурный график уровней скорости в центральной струе ЭГД-течения на последней итерации, справа профиль скорости на уровне 5мм. Видно, что зона ускорения расположена у поверхности игольчатого электрода, далее имеется длинный участок спада скорости. Как видно (рис.3.53, справа), толщина центральной струи невелика, спад скорости в поперечном направлении происходит достаточно быстро, на расстоянии порядка размера игольчатого электрода.



**89**Рисунок 3.53. Слева границы заряженной области, в середине контурный график скорости, справа профиль скорости на уровне 5 мм

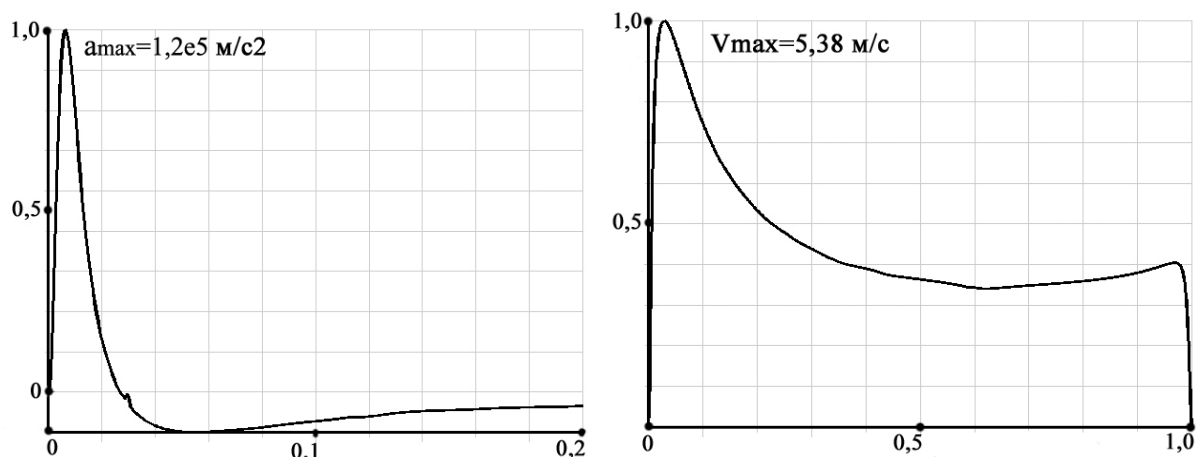
На рис.3.54, слева, представлен контурный график давления под игольчатым электродом, зона пониженного давления локализована в пределах заряженной области, окружающей электрод. На протяжении остальной части межэлектродного промежутка давление практически постоянно и незначительно понижено (рис.3.54, слева). В средней части рис.3.54 представлена карта линий уровня скорости ЭГД-течения и линейный график распределения скорости вдоль оси течения (справа). Видно, что у поверхности

электрода в пределах заряженного слоя жидкость неподвижна, несмотря на максимальную плотность кулоновских сил. Далее скорость течения очень быстро возрастает, так же как и в для электродов типа провод-плоскость, протяженность зоны ускорения порядка диаметра электрода. Далее наблюдается спад скорости течения, а, начиная с середины межэлектродного промежутка, наблюдается вновь небольшое повышение скорости течения. Непосредственно у поверхности противоэлектрода наблюдается существенный спад скорости (рис.3.55). Как видим картина значительно сложнее, чем в системе провод над плоскостью. Однако при анализе распределений ускорения мы наблюдаем практически ту же картину, что и для двумерного случая.



**Рисунок 3.54.** *Контурный график давления (слева), скорости (в середине), распределение скорости вдоль оси течения (справа).*

На рис.3.55 представлены распределения ускорений (слева) и скоростей (справа) в приэлектродной области. График ускорений имеет выраженный максимум, в приэлектродной области, размеры зоны интенсивного ускорения порядка радиуса электрода. Далее следует зона квазиоднородного течения, на которой ускорения изменяются слабо. У противоэлектрода имеется небольшая область торможения. Максимальные ускорения жидкости достигают огромных значений – более  $10000g$ .



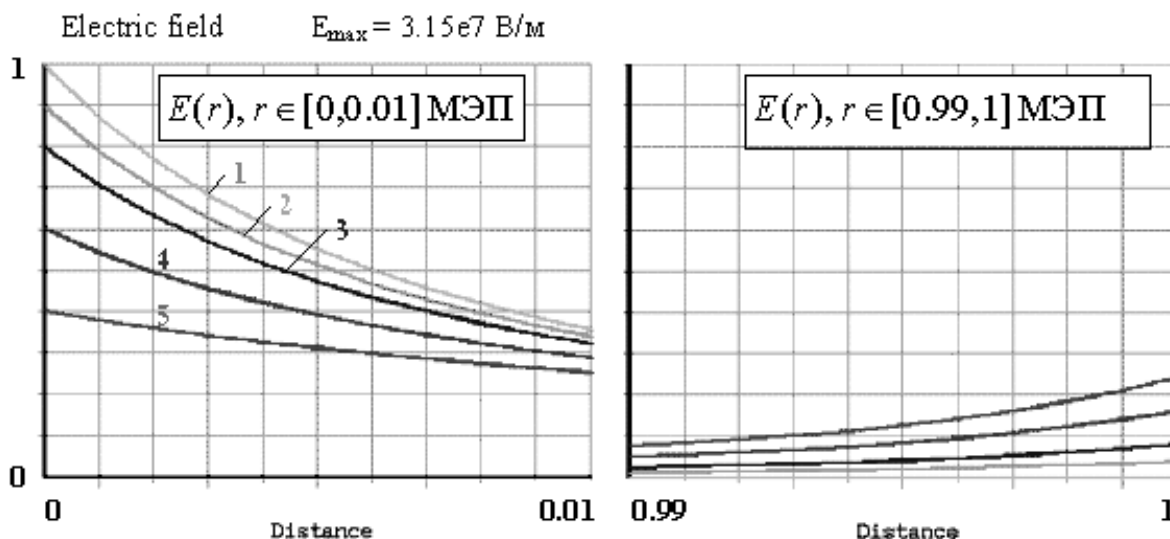
**Рисунок 3.55.** Распределение ускорения (слева) и скорости (справа) вдоль оси симметрии.

Сопоставление изложенных результатов с опубликованными ранее для системы электродов провод над плоскостью показывает их качественное соответствие, однако в случае игла над плоскостью полученные ЭГД-эффекты значительно сильнее, скорости течения достигают нескольких метров в секунду, ускорения превышают  $10000g$ , а в приэлектродной зоне при весьма скромных напряжениях, отрицательное давление составляет  $0,1$  атмосферного.

Основываясь на общих представлениях о возможной толщине заряженной области, в компьютерной модели были реализованы несколько случаев:  $R_3=0,5r$ ,  $1,5r$  и  $2,5r$ , где  $r$  – радиус электрода–иглы.

Напомним, что процесс инжекции заряда в приэлектродные области жидкости зависит от приэлектродной напряженности поля. Поскольку максимальные значения напряженности электрического поля в системе игла над плоскостью значительно выше, чем в системе электродов провод над плоскостью, и достигает  $30\div 50$  мВ/м уже при весьма скромных напряжениях  $5\div 10$  кВ, то следует ожидать весьма значительных плотностей объемного заряда в жидкости. Как уже отмечалось, максимально возможная плотность объемного заряда в жидкости ограничена, причем в диапазоне плотностей близких к критической, объемный заряд существенно изменяет распределение напряженности поля в жидкости. Именно такие случаи представляют наибольший интерес, т.к. являются существенно нелинейными. При меньших значениях плотности заряда задача квазистатическая, т.к. заряд практически не влияет на электрическое поле в жидкости. Поэтому при моделировании для каждого значения радиуса заряженного слоя  $R_3$  значение плотности объемного заряда оценивалось по его влиянию на величину напряженности электрического поля у поверхности активного электрода по сравнению с электростатическим случаем. Результаты такого сравнения для случая  $R_3=0,5r$  представлены на рис.3.56; все графики нормированы на максимальное значение поля в случае отсутствия объемного заряда и на длину межэлектродного промежутка. Выбор более высоких плотностей может привести к полной

экранировке поля в приэлектродной области. Из физических соображений понятно, что объёмный заряд, образование которого зависит непосредственно от напряжённости электрического поля, не может полностью его экранировать внутри межэлектродного промежутка и, тем более, изменить его направление на противоположное.

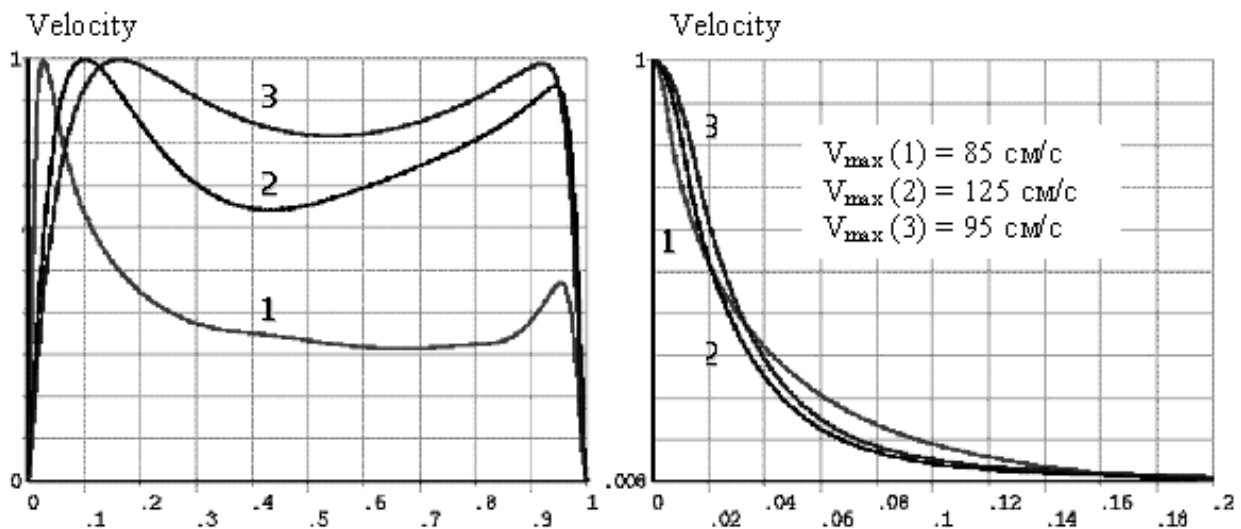


**Рисунок 3.56.** Влияние объёмного заряда на распределение напряжённости электрического поля в МЭП при ширине заряженной области  $R_3 = 0.5 \cdot r$ . 1 – без объёмного заряда; 2 –  $\rho = 0.5$  Кл/м<sup>3</sup>; 3 –  $\rho = 1$  Кл/м<sup>3</sup>; 4 –  $\rho = 2$  Кл/м<sup>3</sup>; 5 –  $\rho = 3$  Кл/м<sup>3</sup>.

При моделировании выбирались значения плотности заряда, приводящие к ослаблению электрического поля у поверхности электрода не более чем на 20÷50%. Были рассмотрены следующие случаи: 1)  $R_3 = 0.5 \cdot r$ ,  $\rho = 1$  Кл/м<sup>3</sup>; 2)  $R_3 = 1.5 \cdot r$ ,  $\rho = 0.9$  Кл/м<sup>3</sup>; 3)  $R_3 = 2.5 \cdot r$ ,  $\rho = 0.5$  Кл/м<sup>3</sup>. Видно, что максимально возможные плотности заряда для данной системы электродов значительно (более чем на два порядка) выше, чем для системы провод над плоскостью.

Рассмотрим полученные результаты для различных толщин приэлектродной области и напряжения на электродах 6 кВ. На рис.3.57 представлены осевые и профильные распределения скорости для трёх рассмотренных случаев. Распределения скорости течения для всех трех случаев имеют общие черты. Осевое распределение скорости, соответствующее самой тонкой заряженной области, имеет резкий максимум в начале межэлектродного промежутка, а затем движение жидкости происходит квазиравномерно со средней скоростью 35 см/с вплоть до противоэлектрода, где наблюдается небольшой пик скорости, переходящий в спад у противоэлектрода. В двух других случаях жидкость движется более равномерно, но в середине межэлектродного промежутка наблюдается плавный минимум, средние скорости движения равны 90 и 75 см/с соответственно. На всех графиках у противоэлектрода наблюдается второй максимум, который объясняется увеличением напряжённости электрического поля вблизи противоэлектрода

(рис.3.56) и, следовательно, возрастанием у противоэлектрода объёмных сил, действующих на жидкость. Вычисленные значения конвективного тока, соответствующие рассмотренным случаям, равны, соответственно: 0,006 мкА, 0,06 мкА и 0,055 мкА. Характерная точка перегиба графика профиля скорости соответствует границе области приложения кулоновских сил – на этом расстоянии от оси происходит переход от силового течения внутри области к вязкому снаружи [10].



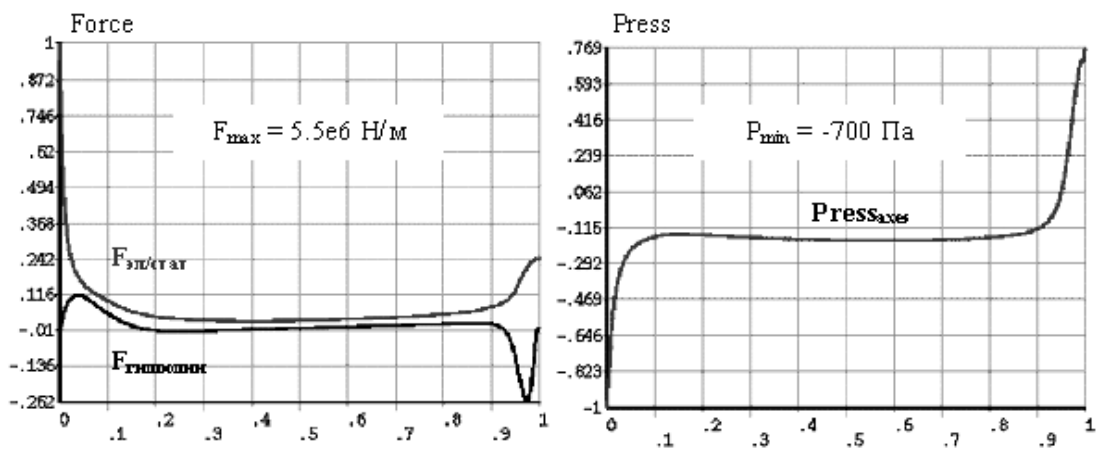
**Рисунок 3.57.** Осевое (слева) и профильное (справа) распределения скорости. Графики нормированы на максимальные значения скорости и длину МЭП (ширину модели).

На рис.3.58, слева, представлены графики плотностей кулоновской и гидродинамической сил для 3-го случая ( $R_3=2,5 \cdot r$ ,  $\rho=0,5 \text{ Кл/м}^3$ ). Плотности сил вычислены по формулам:

$$F_{эл/стат} = \rho \cdot E$$

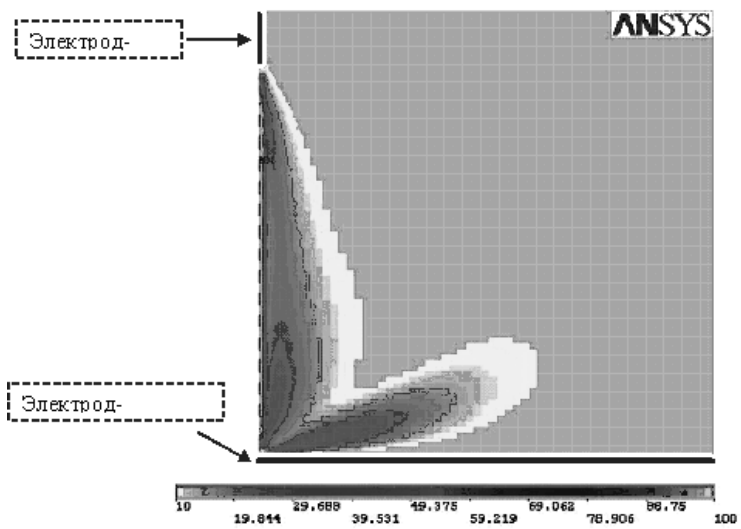
$$F_{гидродин} = \gamma \cdot a$$

где  $\rho$ – объёмная плотность заряда,  $\gamma$ – плотность жидкости,  $E$ – напряжённость электрического поля,  $a$ – ускорение жидкости. На начальном и конечном участках разность сил вызвана большими градиентами давлений: движение жидкости под действием кулоновских сил происходит из области меньшего давления в область большего (рис.3.58, справа). На основной части межэлектродного промежутка разности сил и их абсолютные значения невелики, течение носит вязко-диссипативный характер: движущая сила уравновешена силой вязкого сопротивления. Непосредственно под активным электродом имеется область разряжения. В остальной части межэлектродного промежутка давление практически постоянно и незначительно понижено.



**Рисунок 3.58.** Осевые графики плотностей электростатической и гидродинамической сил (слева) и относительного давления (справа).

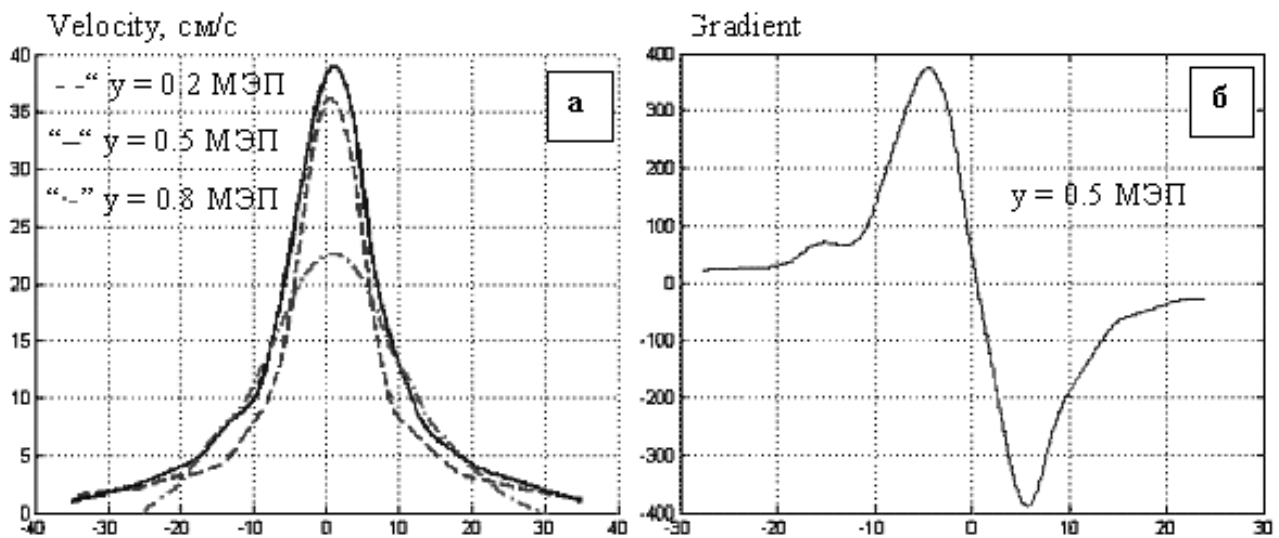
При проведении моделирования было сделано предположение об однородности распределения плотности объёмного заряда в центральной струе течения. Такое предположение оправдано, если средняя скорость дрейфа ионов значительно меньше скорости жидкости, т.е. если заряд «вморожен» в жидкость. Непосредственная проверка данного условия представлена на рис.3.59. На нём представлен контурный график значения электрического числа Рейнольдса в межэлектродном промежутке, полученный как отношение модуля скорости жидкости в каждом элементе сетки к произведению значения электрического поля в этих же элементах на подвижность ионов. На графике выделена область, где скорость жидкости более чем в 10 раз превышает скорость дрейфа ионов. Ширина этой области в несколько раз больше поперечных размеров заряженной струи, и поэтому предположение об однородности распределения плотности заряда в струе можно считать обоснованным.



**Рисунок 3.59.** Контурный график значения числа Рейнольдса в межэлектродном промежутке.



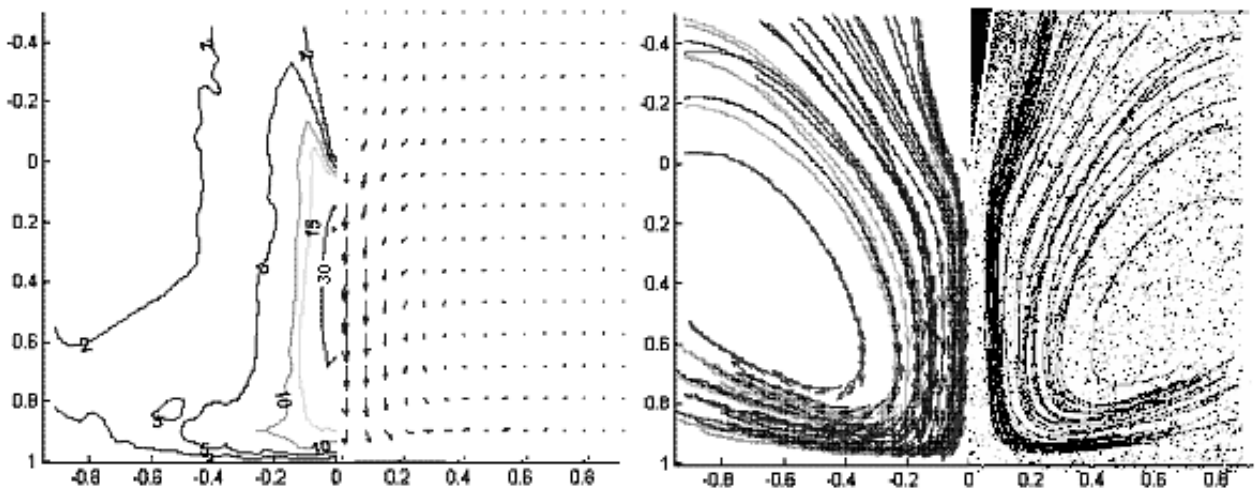
Для напряжения  $U=+5$  кВ произведено сравнение профилей скорости для разных сечений (рис.3.60,а) и определена точка перегиба графика (рис.3.60,б). Излом поперечной производной является характерным признаком перехода от силового течения внутри струи к вязкому снаружи. В данном случае характерный радиус области, где действуют объёмные (кулоновские) силы, составляет величину  $5\pm 1$  радиусов электрода–иглы. Причём, из вида графиков (рис.3.60,а) следует, что размер заряженной области в первой половине межэлектродного промежутка меняется мало, в то время как у противоэлектрода наблюдается заметное уширение. Полученный характерный радиус области локализации объёмного заряда в несколько раз превышает значения, использованные при моделировании в первой части этого раздела.



**Рисунок 3.60.** Сравнение профилей скорости для разных сечений при  $U = +5$  кВ (слева) и поперечная производная от скорости (справа).

Аналогичные результаты были получены при отрицательных напряжениях на активном электроде. Соответствующие графики имеют похожую структуру, и расхождения численных значений не превышают  $5\div 10\%$ .

Общая структура ЭГД-течений близко соответствует течениям в системе провод над плоскостью и хорошо видна на контурном и векторном графиках (рис.3.61, слева). В непосредственной близости от электродов имеется область очень малых скоростей. Основное течение сосредоточено в сравнительно узкой области между электродами. В этой зоне векторы скорости направлены вдоль оси симметрии, и их величина меняется незначительно. В остальной части кюветы скорости в десятки раз меньше, чем в центральной струе. Разгон жидкости начинается на некотором расстоянии выше кончика иглы, и возле активного электрода образуется воронкообразная область. На рис.3.61, справа, представлены обработанные траектории и векторы скорости вдоль них. Для каждого значения напряжения производилась обработка не менее 50 треков.



**Рисунок 3.61.** *Контурный и векторный графики скорости (слева); обработанные траектории и векторы скорости вдоль них (справа).*

Сопоставление результатов моделирования и эксперимента помогает конкретизировать размеры заряженной струйки в условиях эксперимента и определить влияние тех или иных факторов на наблюдаемые явления. В качестве основных критериев сравнения результатов эксперимента и компьютерного моделирования были выбраны: качественный вид осевого графика скорости, средняя скорость в межэлектродном промежутке, ширина профиля скорости и значение конвективного тока. Сопоставление данных эксперимента по исследованию ЭГД-течений в системе игла–плоскость с результатами, представленными выше, показало, что поперечный размер заряженной области превышает значения, выбранные при моделировании, и составляет примерно  $4\div 6$  радиусов электрода–иглы. Поэтому были рассчитаны еще две модели с  $s=3,5\cdot r$  и  $4\cdot r$ . Значения плотностей объемного заряда для рассматриваемых случаев выбраны:  $\rho=0,20$  и  $0,15$  Кл/м<sup>3</sup>, соответственно. Алгоритм моделирования не изменялся.

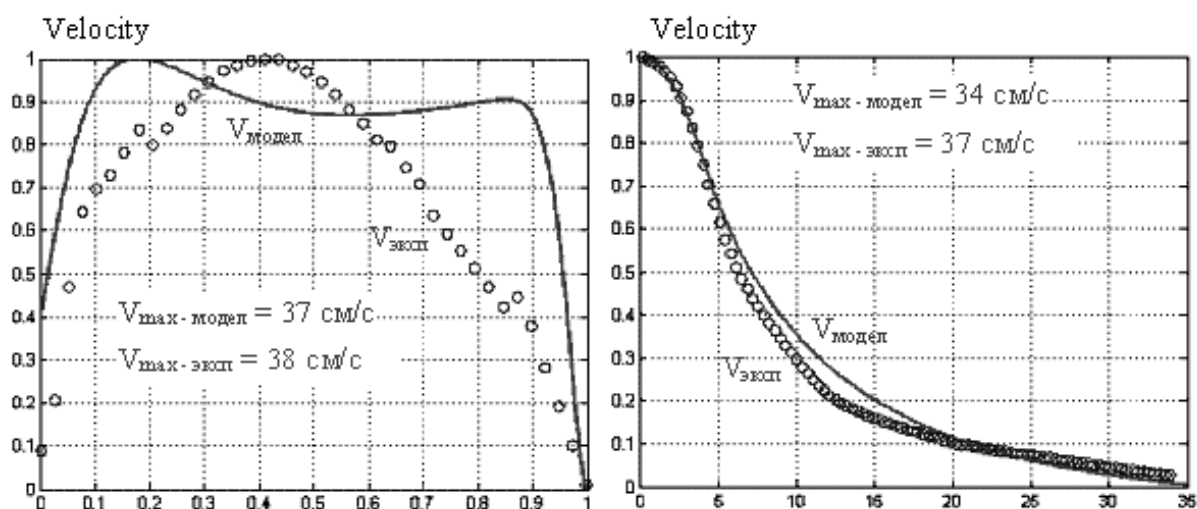
На рис.3.62 представлены осевые и профильные распределения скоростей, полученные в результате моделирования для случая  $s=4\cdot r$  и полученные в эксперименте. При сравнении результатов осевой график скорости, полученный при компьютерном моделировании, как и в эксперименте, выводился вдоль пути, расположенного параллельно оси симметрии модели и смещённого от неё на расстояние одного радиуса электрода. Все графики нормированы на свои максимальные значения, горизонтальная ось нормирована на длину межэлектродного промежутка, для осевого распределения, и на радиус электрода–иглы, для профильного распределения.

Сравнение дает достаточно хорошие результаты.

Профильное распределение скорости (рис.3.62), достаточно точно согласуется с экспериментальными данными: профили обладают схожей

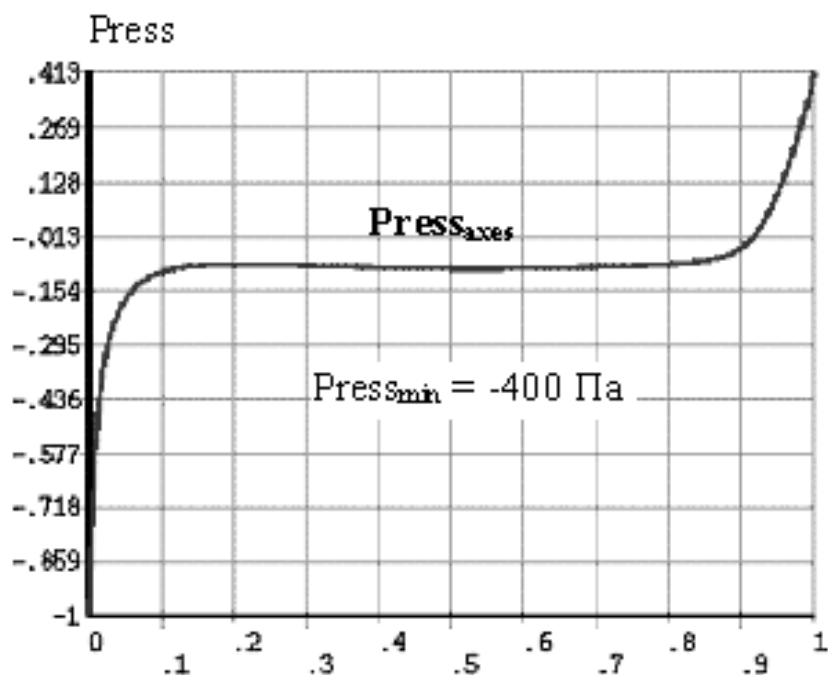
характерной шириной и на начальном участке имеют одинаковую крутизну спада. Небольшие различия наблюдаются на расстояниях порядка  $10 \div 15$  радиусов активного электрода от оси симметрии, возможно, объясняются изменением вязкости заряженных слоев жидкости.

Различия наблюдаются и в осевых распределениях скоростей. Несмотря на совпадение средних значений скоростей, качественный вид сравниваемых графиков несколько отличается: ускорение и торможение жидкости по данным компьютерной модели происходит быстрее, чем это наблюдается в эксперименте. Возможно, это связано с погрешностью, вносимой визуализирующими пузырьками, учитывая огромные ускорения, испытываемые жидкостью в зоне ускорения.



**Рисунок 3.62.** Результаты компьютерного моделирования и эксперимента: осевые графики скоростей (слева) и профиль скорости в середине межэлектродного промежутка (справа).

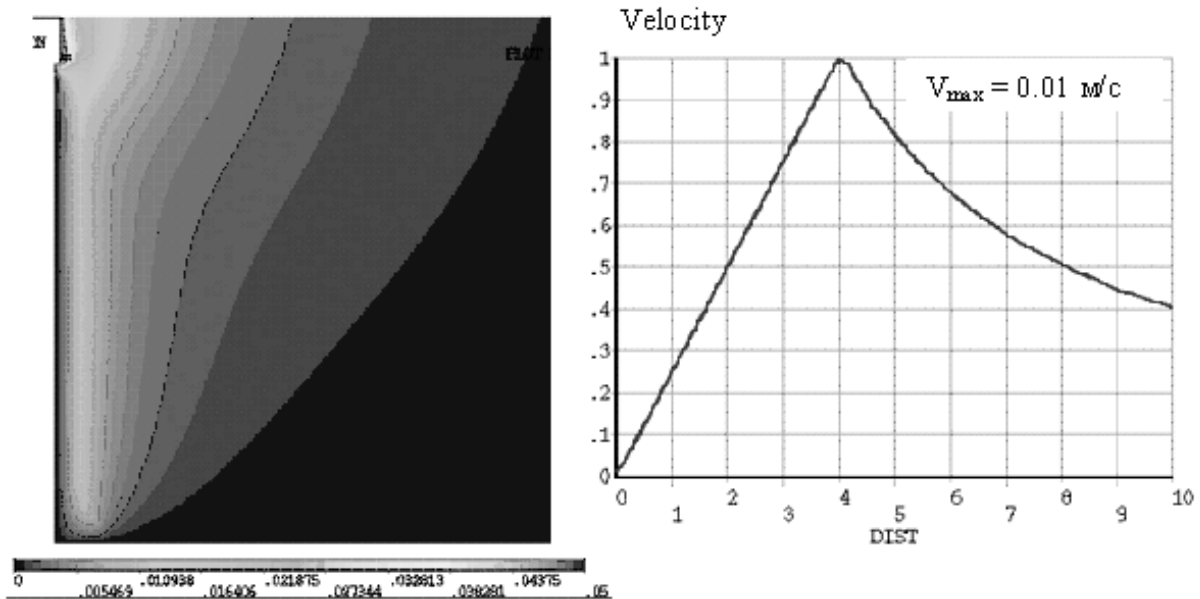
Анализируя спад скорости вдоль оси в экспериментальных данных и график давления при моделировании (рис.3.63), можно сделать вывод, что плавное торможение жидкости происходит по причинам, не связанным с наличием градиента давления. Влияние области повышенного давления прослеживается по увеличению наклона графика на уровне 0,9 межэлектродного промежутка, там же, где начинается зона резкого торможения по данным моделирования. Отдельные численные расчёты показали, что параметры жидкости: вязкость и диэлектрическая проницаемость, не влияют на общий вид осевого графика скорости, и их изменение не может привести к согласованию результатов моделирования с экспериментальными данными.



*Рисунок 3.63. Осевой график относительно давления.*

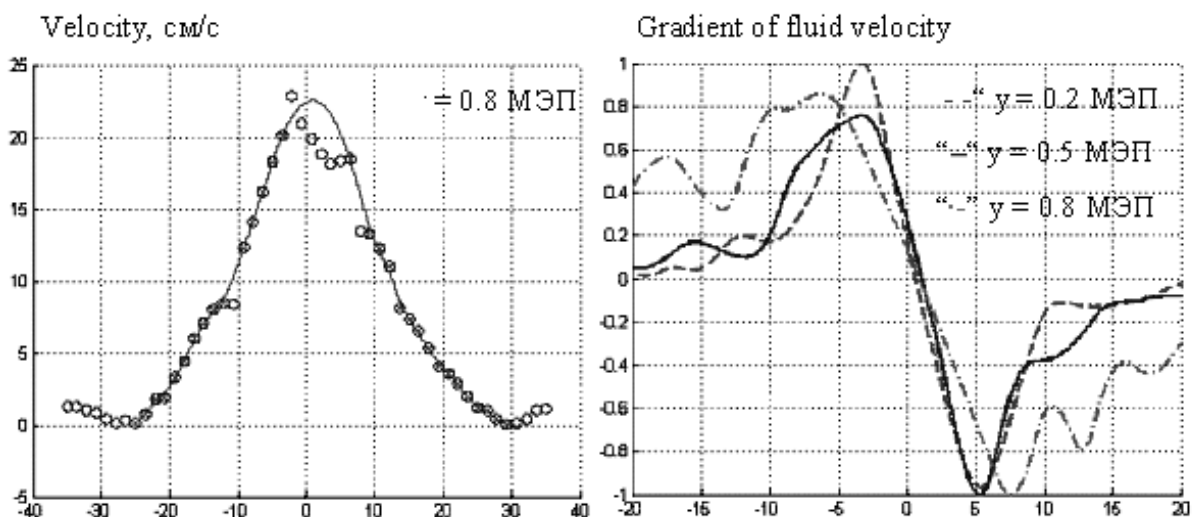
Характерной особенностью ЭГД-течений в системе электродов игла–плоскость, в отличие от системы электродов провод–плоскость, для которой результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом, являются чрезвычайно большие значения плотности объёмного заряда, что приводит к появлению достаточно сильного поперечного электрического поля. В результате возрастает дрейфовая скорость ионов, направленная поперёк движения жидкости. Поэтому полученная в эксперименте зона плавного торможения жидкости может объясняться расплыванием заряженной области в процессе движения жидкости в результате миграции ионов в собственном поле, что, в свою очередь, выражается в снижении плотности объёмного заряда и, следовательно, приводит к уменьшению сил, действующих на жидкость. Для подтверждения сделанного предположения можно привести следующие аргументы. Во-первых, на рис.3.64 представлены графики  $x$ -компоненты дрейфовой скорости (контурный и определённый вдоль поперечного пути), вычисленной как произведение подвижности ионов в трансформаторном масле на напряжённость электрического поля. Характерное время, за которое жидкость, двигаясь со средней скоростью 30 см/с, преодолевает межэлектродный промежуток составляет 0,02 секунды. Следовательно, за это время ион, исключительно за счёт дрейфовой компоненты скорости, должен переместиться на расстояние  $\sim 0,0002\text{м} = 2 \cdot r$ , т.е. на расстояние двух радиусов электрода, при этом толщина заряженной области составляет примерно 4 радиуса иглы. Увеличение толщины области с объёмным зарядом даже на величину одного радиуса иглы приведёт к увеличению площади сечения этой области в полтора раза, и, следовательно, к аналогичному уменьшению плотности объёмного заряда. Таким образом, несмотря на сильное

преобладание скорости жидкости над дрейфовой скоростью ионов, более чем в 30 раз в центральной струе, пренебрежение последней может заметно сказаться на результатах.



*Рисунок 3.64. Контурный (слева) и определённый вдоль поперечного пути (справа) графики  $x$ -компоненты дрейфовой скорости ионов.*

Во-вторых, в качестве аргумента можно привести экспериментальные профили скоростей для разных сечений, точка перегиба на этих графиках соответствует границе области действия объёмной (кулоновской) силы на жидкость, и при расширении заряженной области, она должна располагаться на большем расстоянии от оси модели.



*Рисунок 3.65. Профиль скорости на уровне 0,8 межэлектродного промежутка (слева) и графики производных от профилей для трёх сечений (справа).*

На рис.3.65 представлены графики соответствующих производных, которые подтверждают сделанное предположение: для профиля скорости на уровне 0,8 межэлектродного промежутка, точка перегиба расположена на расстоянии  $2\pm 1$  радиуса иглы дальше от оси модели, чем для сечений на уровнях 0,2 и 0,5 межэлектродного промежутка.

Расширение заряженной области при движении вдоль межэлектродного промежутка приведёт к уменьшению значения плотности заряда у противоэлектрода, и, следовательно, к снижению напряжённости электрического поля у заземлённого электрода, которая определяется только величиной самой плотности. Поскольку скорость движения жидкости связана непосредственно с величиной поля, то при уменьшении поля скорость также уменьшится, и на осевом графике скорости должна будет появиться область плавного торможения.

## **Моделирование процесса установления электрогидродинамических течений в ANSYS**

### **Введение**

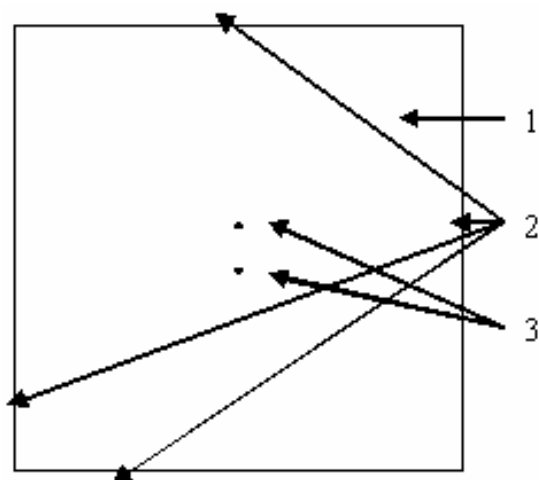
В данной главе приводятся результаты компьютерного моделирования процесса формирования и развития ЭГД-течений в симметричной системе электродов типа провод–провод в двумерном случае, когда длина проводов значительно больше межэлектродного расстояния [22,19,21,26,33]. В электростатическом приближении такая система симметрична относительно центральной плоскости.

### **Метод моделирования**

Моделирование проводится при помощи конечно-элементного пакета программ *ANSYS*. Этот пакет позволяет рассчитывать большой круг физических задач и является одним из ведущих в этой области. Для решения задач используется метод конечных элементов [14]. Для его осуществления необходимо разбить геометрическую модель на элементы, задать необходимые нагрузки и опции решателя. В узлах полученной сетки решаются уравнения, соответствующие заданному типу анализа. Чем мельче сетка, тем точнее получается решение. Естественно, улучшение сетки можно проводить до какого-то предела, когда точность уже не будет значительно меняться.

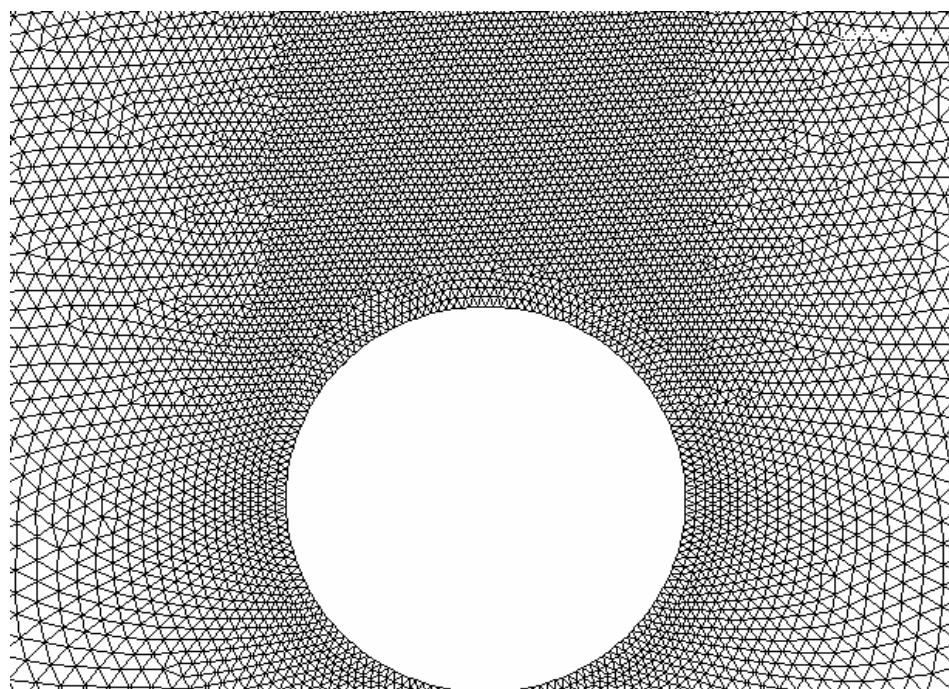
Однако даже в таком мощном пакете программ как *ANSYS* отсутствует опция прямого решения ЭГД-задачи ввиду неразрешимости полной системы соответствующих уравнений. Поэтому для расчета нестационарных задач электрогидродинамики был разработан и осуществлен метод, заключающийся в последовательном решении задач электростатики и гидродинамики, который будет описан ниже.

Геометрия модели в описываемом примере близко соответствует использованной в экспериментах [11] и состоит (рис.3.66) из кюветы квадратного сечения (1), сторона квадрата (2) 10 см, в центре кюветы размещены два параллельных провода (3) диаметром 0,14 см и межэлектродным расстоянием 1 см. Исследуемая жидкость – трансформаторное масло: проводимость –  $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ , относительная диэлектрическая проницаемость – 2,2.



*Рисунок 3.66. Геометрия задачи.*

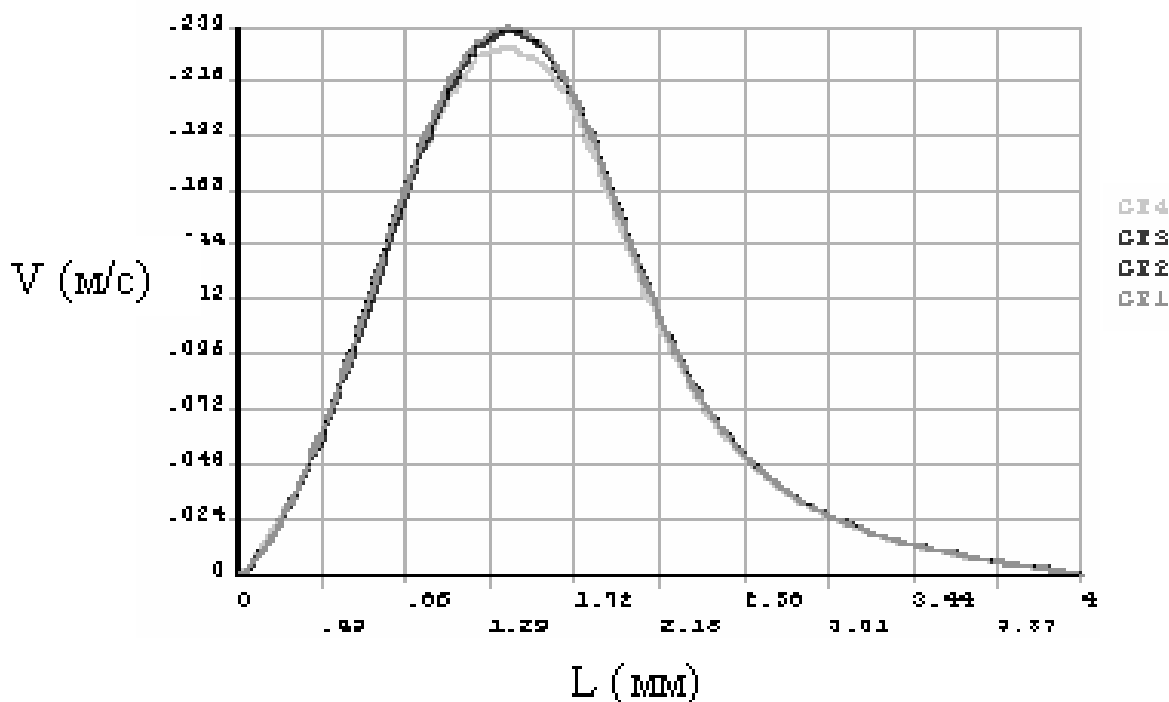
Сетку, на которую разбивается модель, необходимо сделать очень мелкой для достижения хорошей точности решения и ввиду того, что область нерегулярная, и заряд задается в узлах очень узкой зоны, вдоль центральной струи течения.



*Рисунок 3.67. Конечно-элементная модель (в районе нижнего электрода)*

В данном примере используются две разные сетки: одна при моделировании формирования ЭГД-течений и распространения заряженных струй до середины межэлектродного промежутка, вторая – при распространении заряда в боковые струи. Первая сетка содержит 85000 треугольных элементов, наилучшее качество достигается в некоторой полосе от одного электрода к другому (рис.3.67). Вторая сетка содержит 424000 треугольных элементов, по сравнению с первой сеткой измельчены элементы еще и в полосе вдоль оси симметрии, куда распространяется заряд. В обоих случаях на окружностях электродов уместается по 160 элементов, размер которых сохранялся таким же в упоминаемых областях интереса, причем все элементы правильной формы (близки к равносторонним треугольникам).

Для расчета данной задачи в такой геометрии даже первая сетка отличного качества, что подтверждается результатами сравнения этой сетки и еще трех сеток, более грубых: на окружностях электродов 120, 80 и 40 элементов (плавное увеличение размеров элементов в кювете). В дальнейшем эти сетки обозначены порядковыми номерами с 1 по 4 в порядке ухудшения их качества. На этих сетках была решена тестовая задача с одинаковой нагрузкой, сходной с полученной при дальнейшем моделировании ЭГД-течений.

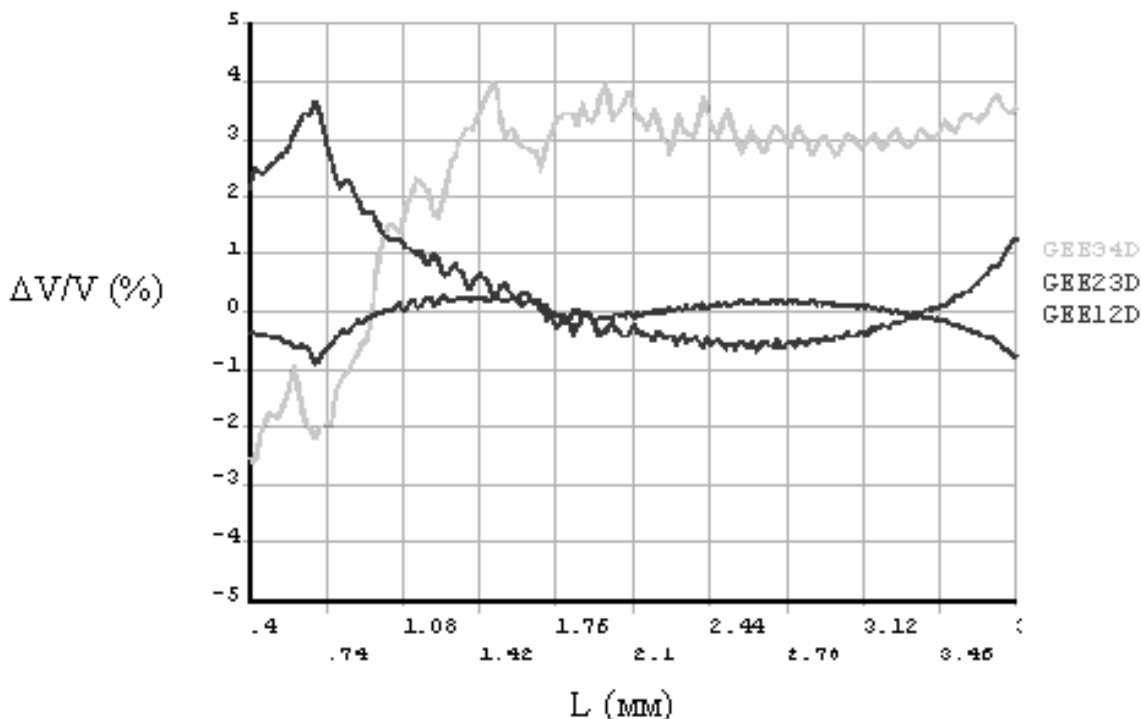


**Рисунок 3.68.** Распределение скоростей вдоль центральной оси в области интереса для разных сеток.

На рис.3.68 представлены графики распределения скоростей вдоль центральной оси в области интереса от нижнего электрода до центра межэлектродного промежутка. На рис.3.69 представлены относительные



разности этих скоростей между сетками 4 и 3, 3 и 2, 2 и 1, то есть разница в решении по мере улучшения сетки.



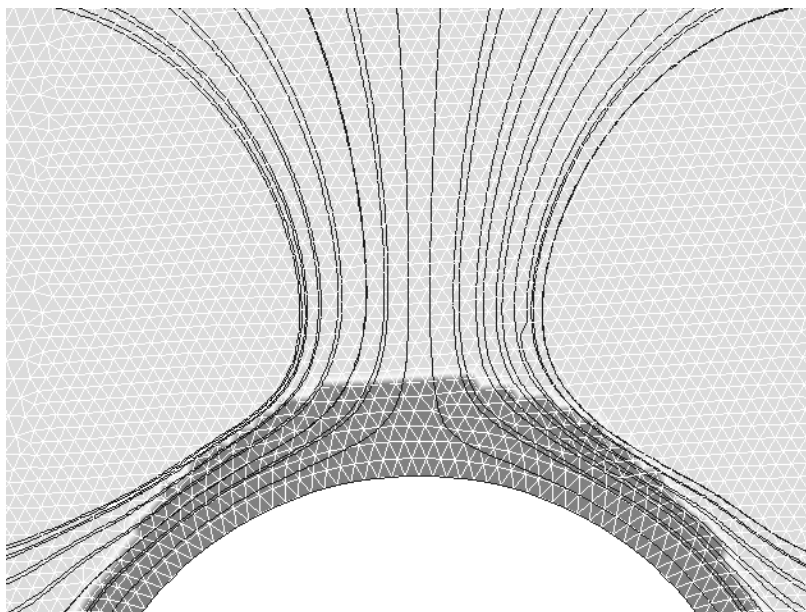
**Рисунок 3.69.** Относительные разности скоростей для разных сеток.

Видно, что по мере улучшения сетки, уменьшается различие в решениях, различие между 1-й и 2-й сетками меньше процента. Поэтому дальнейшее ее улучшение было бы нецелесообразно ввиду значительного увеличения времени расчетов при незначительном улучшении точности расчетов. Сетка, используемая при расчете распространения заряда в боковые струи, еще более мелкая. Все эти усовершенствования сетки необходимы для того, чтобы была возможность задавать плавное распределение заряда вдоль струй, так как заряд можно задать только в узлах или элементах сетки.

Алгоритм моделирования основан на итерационном процессе, а каждая итерация состоит из нескольких шагов:

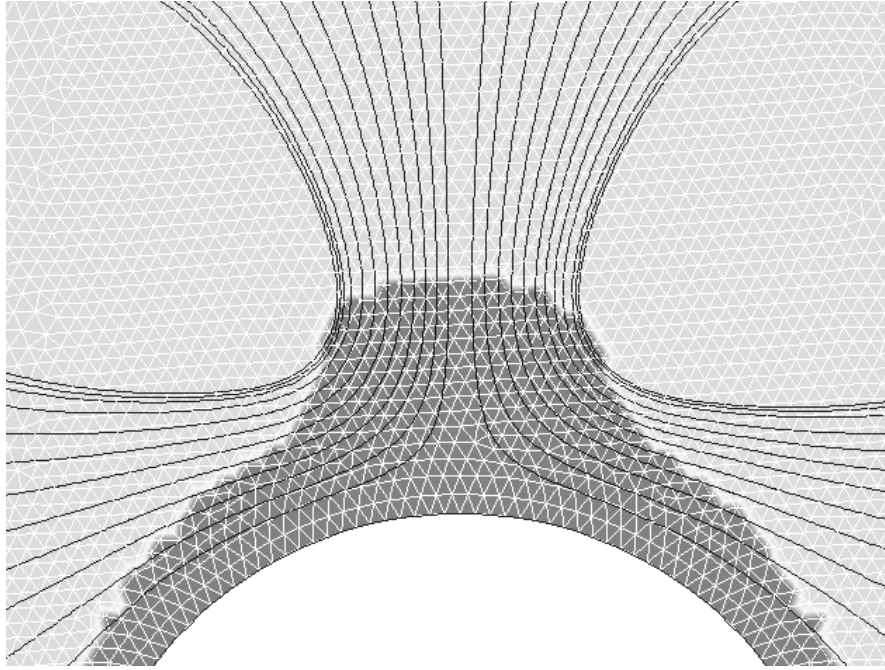
1. На первом шаге рассчитывается электростатическая задача с объемным зарядом  $0,01 \text{ Кл/м}^3$ , заданным в пределах овального кольца толщиной 0,1 радиуса электрода, опоясывающего каждый из электродов и смещённого к противоположному электроду, т.е. в виде кольца овальной формы. На рис.3.70 представлена исходная зарядовая структура у нижнего электрода, часть электрода представлена в виде белой области, ограниченной полуокружностью. Граничные условия следующие: на электродах потенциалы 12кВ, на внешних стенках нормальная компонента электрического поля равна нулю. Из полученного на первом шаге решения находится распределение кулоновских сил в заряженной области, равных

произведению электрического поля на заряд, и записывается в массив для каждого узла сетки.



**Рисунок 3.70.** *Линии тока у нижнего электрода на фоне заряженной области (первая итерация).*

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.
3. После возникновения ЭГД-течений заряд из исходной овальной структуры выносится ЭГД-течением вдоль линий тока жидкости, формируя заряженную струю. Исходя из этих соображений, на третьем шаге с помощью полученных распределений скоростей и линий тока жидкости рассчитывается новая область распределения объемного заряда, которая будет использоваться в качестве исходной на следующей итерации. Для этого из полученного решения гидродинамической задачи строятся линии тока (рис.3.71), 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 промежутки времени на следующую итерацию рассчитываются таким образом, чтобы граница зарядовой области сместилась не более чем на 0,5 толщины кольца. На рис.3.71 представлена область распределения плотности объемного заряда после четвертой итерации и соответствующие линии тока.



**Рисунок 3.71.** *Линии тока у нижнего электрода на фоне заряженной области (четвертая итерация).*

Далее шаги повторяются с использованием новой заряженной области, рассчитывается новая электростатическая задача, новые силы и т.д.

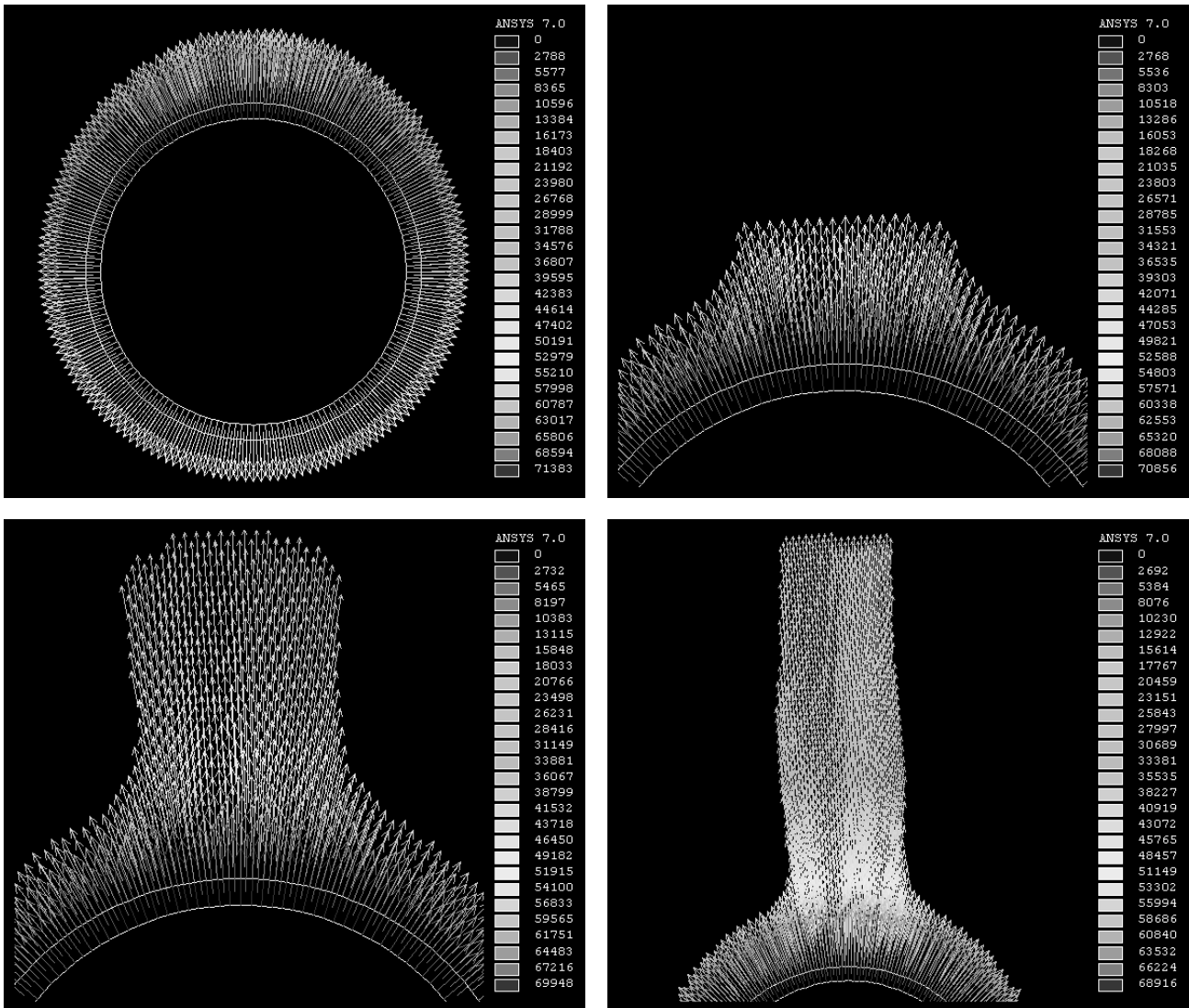
Таким образом, происходит последовательное решение ЭГД-уравнений. Сначала решается электростатика с объемным зарядом (шаг 1) –; рассчитываются Кулоновские силы, которые потом используются в решении гидродинамической задачи (шаг 2) –. Затем, для учета уравнений связи в сделанных приближениях рассчитывается новая область распределения заряда по линиям тока (шаг 3).

Итерационный процесс повторяется пока заряженная область не достигнет середины межэлектродного промежутка, где происходит встреча со струйкой, текущей от противоположного электрода. Затем рассматривается процесс распространения заряженных струй вдоль оси симметрии с учетом рекомбинации, который рассматривается во второй части описания. Необходимо отметить, что разработанный алгоритм работает для данной модели автоматически, необходимо только сначала задать массивы определенного вида, описывающие начальную область распределения заряда. Далее программа сама переходит между задачами, рассчитывая смещение этой области вдоль линий тока. Ограничение на количество выполняемых итераций выставляется вручную.

### **Формирование и развитие ЭГД-течения**

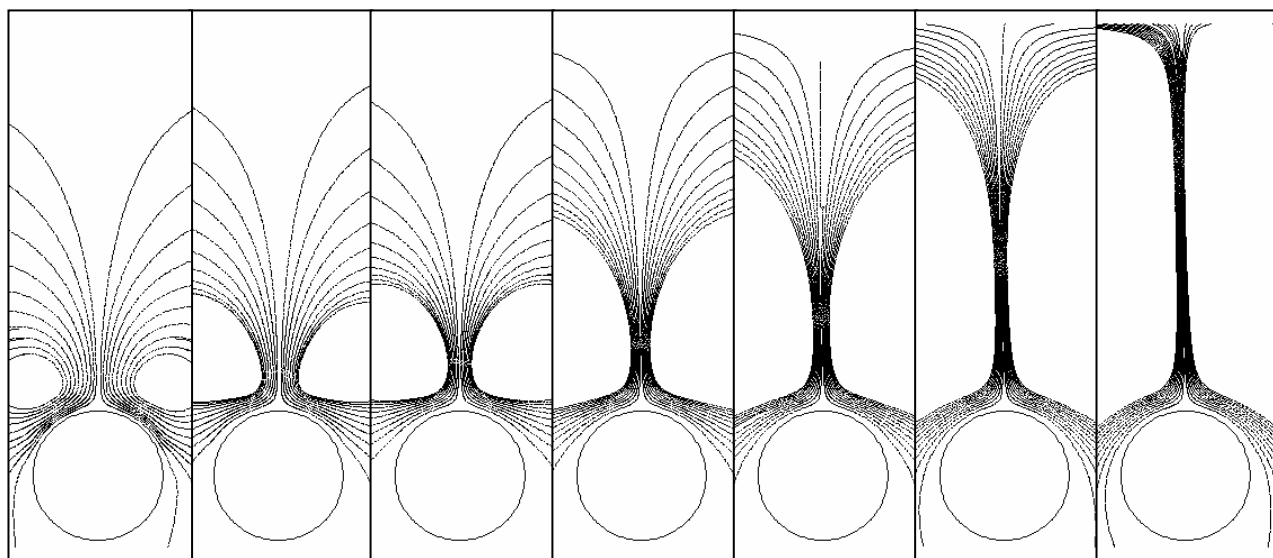
В процессе распространения заряда вглубь межэлектродного промежутка изменяется область действия кулоновских сил (рис.3.72), действующих на

жидкость, они формируют тонкие струи толщиной порядка  $1/3$  диаметра электродов, по которым и распространяется в дальнейшем заряд, не растекаясь в стороны. При этом предполагается, что диффузия заряда мала по сравнению с конвекцией. Формирование струи по толщине происходит в начальные моменты времени, когда заряд из заряженного овального слоя начинает смещаться к центру кюветы [19,21,26]. На каждой итерации выбираются новые граничные узлы, из которых будут исходить новые линии тока. Уже рассчитанная на предыдущих шагах заряженная область считается в дальнейшем неизменной, рассматриваются новые к ней приращения по мере хода итераций. Процесс распространения струй гидродинамического течения со временем по мере распространения заряда представлен в виде динамики изменения линий тока (рис.3.73), которые проводятся через одни и те же точки в различные моменты времени. Здесь нельзя судить о толщине заряженной струйки. Однако здесь хорошо видно влияние объемной силы, которая спрямляет эти линии по мере распространения заряда вглубь кюветы.



*Рисунок 3.72. Динамика изменения кулоновских сил.*

При выборе достаточно малого шага по времени между итерациями заряд не успевает за одну итерацию расходиться в стороны по линиям тока, а на следующей итерации новые силы сужают струи и заряд продолжает распространяться строго параллельно линии, соединяющей электроды. Таким образом, в представленной модели ЭГД-течение формируется в результате образования заряженной центральной струи, переносящий заряд в межэлектродный промежуток. Центральная струя в свою очередь образуется путем сноса заряда ЭГД-течением из первоначально сформированной кольцевой заряженной области. Считается, что плотность заряда, возникающая у каждого из электродов одинакова, равна  $0,01 \text{ Кл/м}^3$  и соответствует знаку полярности электрода. Правомерность такого приближения обсуждалась выше.

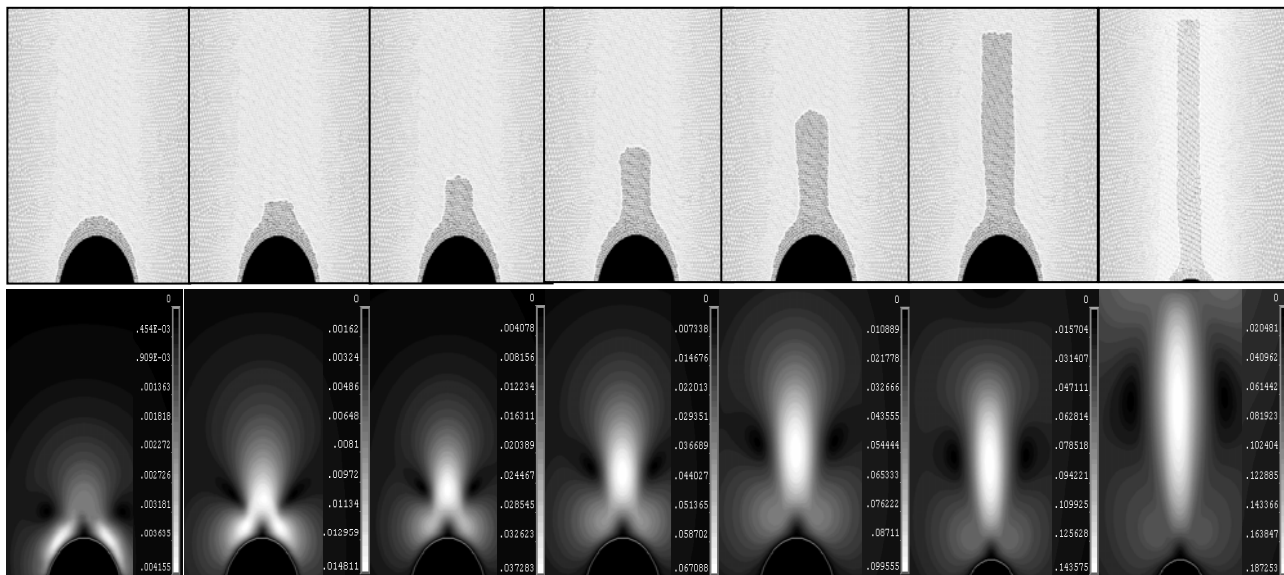


*Рисунок 3.73. Изменение расходимости линий тока по мере распространения заряда к центру межэлектродного промежутка.*

Результаты моделирования формирования и распространения ЭГД-течений к центру кюветы 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 различные моменты времени после подачи напряжения. Все значения на графиках представлены в единицах системы СИ.

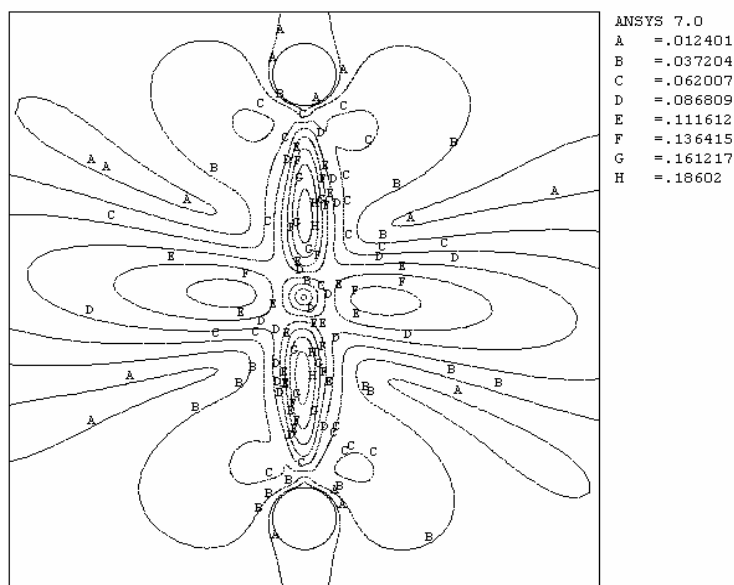
На рис.3.74 представлены результаты моделирования формирования заряженных струй ЭГД-течения и их распространения к центру межэлектродного промежутка: динамика смещения области распределения плотности объемного заряда и соответствующие им контурные графики распределения скоростей [м/с] возникающих течений в моменты времени 0,006; 0,024; 0,036; 0,048; 0,06; 0,078; 0,102с (сверху вниз) после подачи напряжения.

Остальные наборы графиков в этой части работы представлены также для этих моментов времени. Представлена нижняя полуплоскость модели, так как модель симметрична, линейные графики будут рассматриваться для центральной полуоси, от нижнего электрода до центра межэлектродного промежутка.



*Рисунок 3.74. Динамика смещения плотности объемного заряда (сверху) и контурные графики распределения скоростей течений (снизу).*

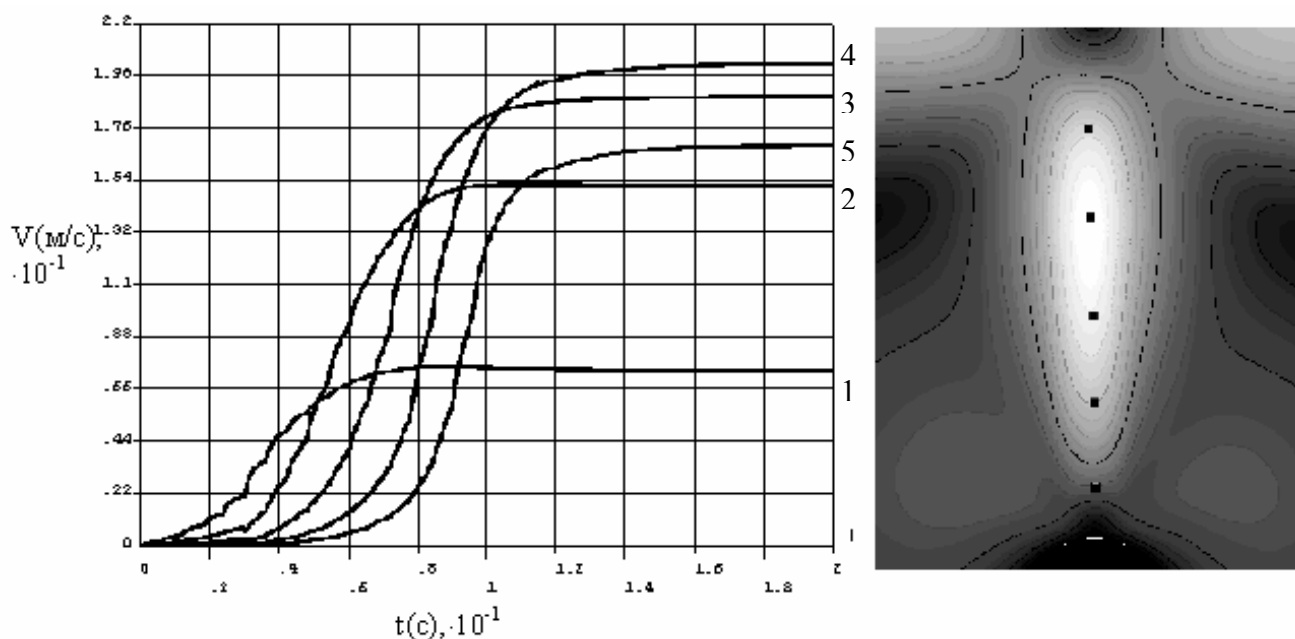
На рис.3.75 представлен контурный график распределения скоростей ЭГД-течений в момент времени 0,102с, соответствующий встрече двух заряженных струй, текущих от противоположных электродов. Как и следовало ожидать, по данным экспериментов [11], в кювете формируются два встречных ЭГД-потока, образующих четырехячеистую структуру.



*Рисунок 3.75. Распределение скоростей в момент времени 0,102 с.*

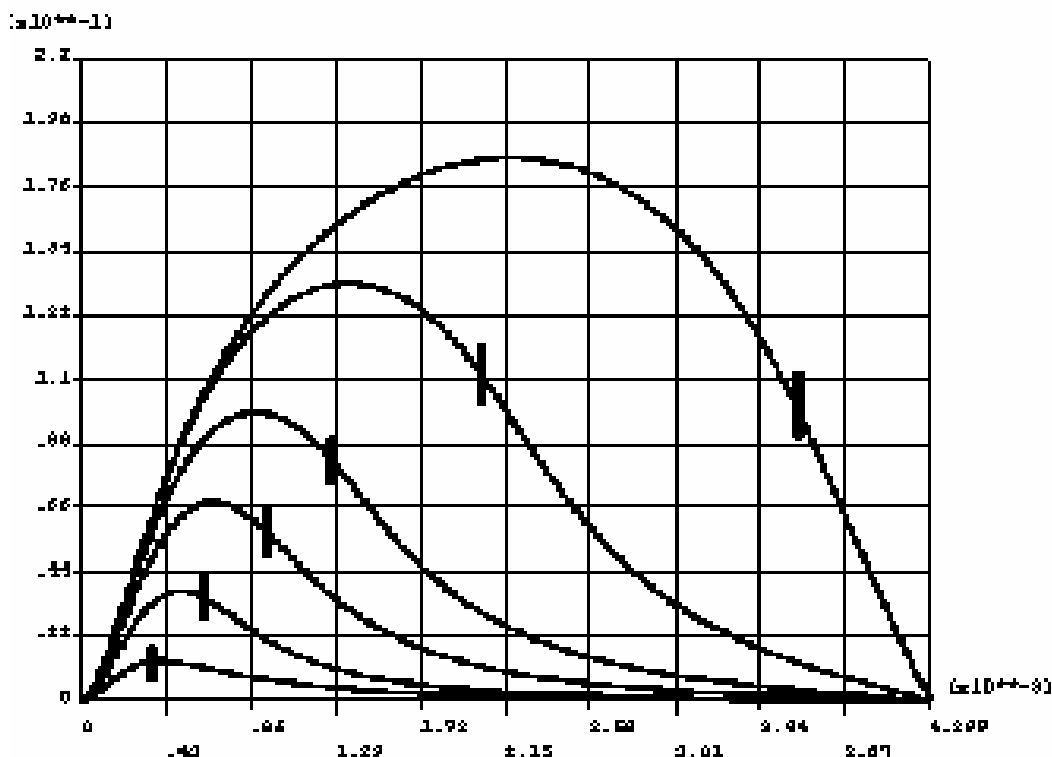
Анализ полученных данных показывает, что каждая из возникающих встречных струй ЭГД-течений имеет характерную зонную структуру, описанную ранее на основе анализа экспериментальных данных. У поверхности каждого из электродов имеется тонкий слой жидкости, в котором скорость течения очень мала. Далее следует зона ускорения, затем имеется область слабоизменяющегося 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.3.76 представлены временные зависимости скорости ЭГД-течения в различных точках, лежащих на прямой, соединяющей центры электродов. Зависимости имеют типичный характер: первоначальная задержка, участок прохождения переднего фронта течения, в пределах которого наблюдается быстрый рост скорости, и выход на плато. Как видно из сопоставления рис.3.74 и рис.3.76, движение фронта скорости соответствует движению фронта заряженной струйки. Таким образом, происходит процесс установления ЭГД-течения во времени по мере распространения заряженных струй, а соответственно и областей действия сил, к центру межэлектродного промежутка. В некоторый момент времени, когда область действия сил перестает меняться вдоль центральной линии, характер течения вдоль этой линии устанавливается и остается в дальнейшем постоянным.



**Рисунок 3.76.** Скорость ЭГД-течений в зависимости от времени (слева) в точках, отмеченных на контурном графике распределения скоростей развитого ЭГД течения (справа). Нумерация точек в порядке возрастания от электрода к середине кюветы.

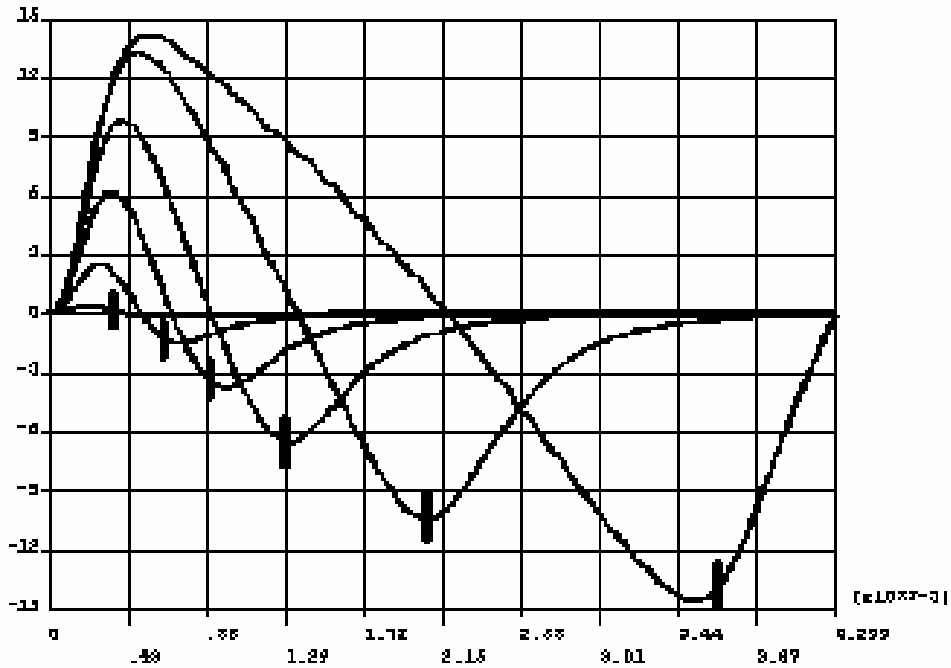
На рис.3.77, представлены последовательные во времени распределения скорости ЭГД-течения вдоль центральной оси течения от нижнего электрода до середины межэлектродного промежутка. Вертикальными штрихами на рисунке помечены соответствующие расположения границы заряженной струйки. Видна область ускорения, за которой следует область торможения жидкости. По мере продвижения заряженной струйки вглубь жидкости продвигается максимум скорости ЭГД-течения. На всех стадиях горб скорости несколько сдвинут к электроду относительно границы заряженной области.



*Рисунок 3.77. Линейные графики распределения скоростей [м/с] вдоль центральной оси [м].*

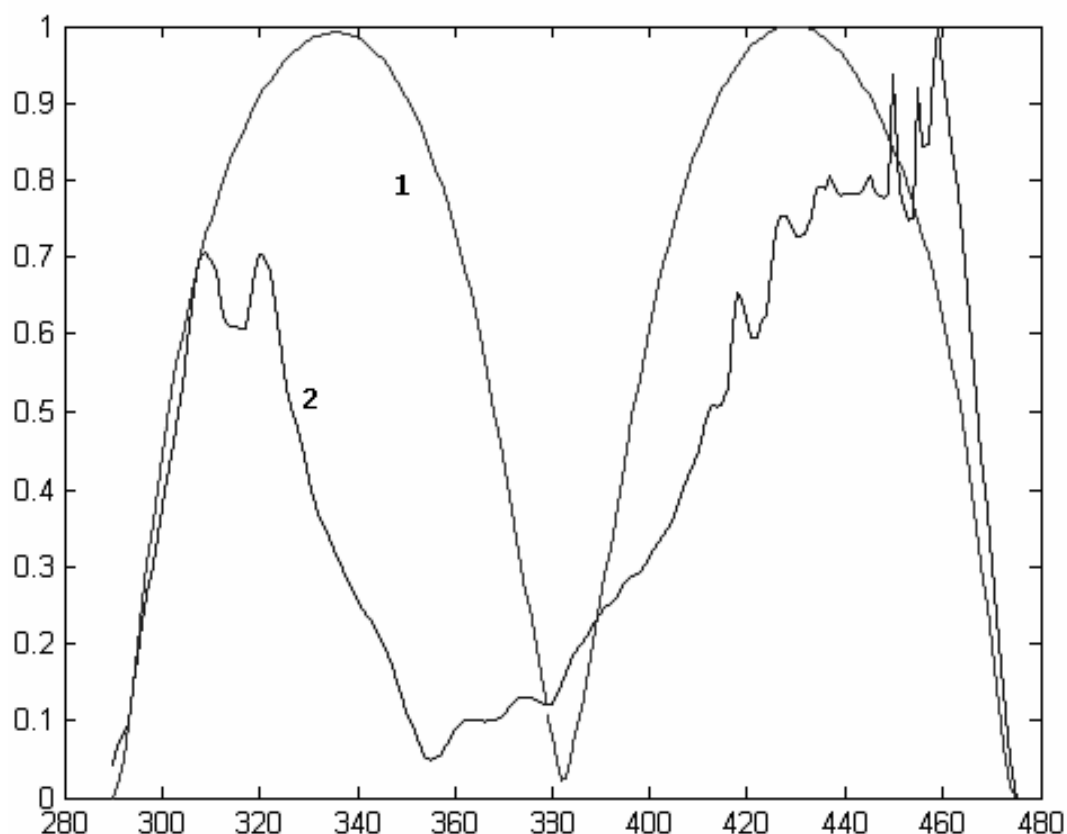
На рис.3.78 представлены соответствующие этим же временам распределения ускорения жидкости. Эти распределения имеют выраженную двугорбую структуру. Зона ускорения жидкости имеет максимум, отстоящий от поверхности электрода на некоторую величину, слабо зависящую от времени. Зона торможения жидкости также 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.





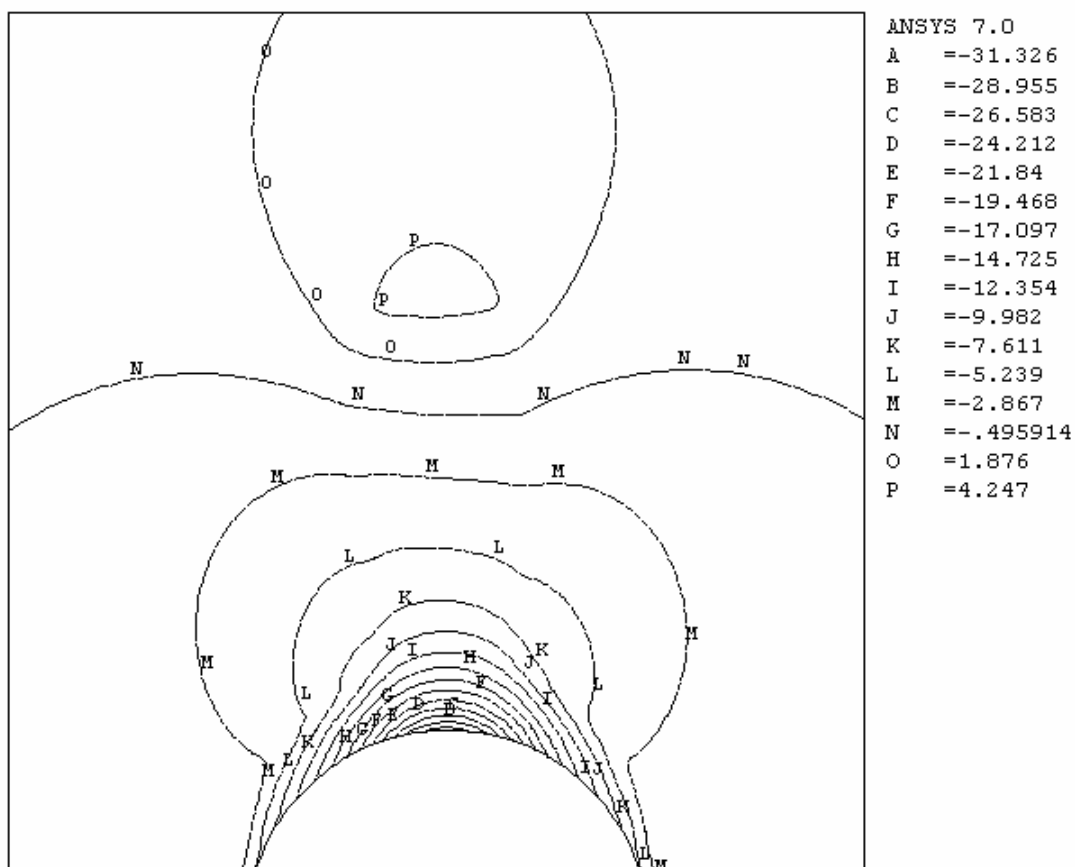
*Рисунок 3.78. Линейные графики распределения ускорений  $[м/с^2]$  вдоль центральной оси  $[м]$ .*

На рис.3.79 представлены сравнительные линейные распределения скорости вдоль центральной оси, полученные экспериментально и по результатам моделирования. Кривые нормированы по скорости и межэлектродному расстоянию. График моделирования получается, естественно, более гладким, так как постановка задачи идеально симметричная, конечно-элементная модель очень хорошая. В эксперименте присутствует большое количество дополнительных факторов, влияющих на течения, идеально симметричные течения получить очень трудно. Также возникают различные трудности и погрешности при обработке экспериментальных данных, в связи с чем, полученные результаты эксперимента содержат в себе некоторые искажения. Однако качественные картины в том и в другом случаях сопоставимы, особенно в приэлектродных областях. Так, например, размер и характер зон ускорения в численном и натурном экспериментах соответствует друг другу.



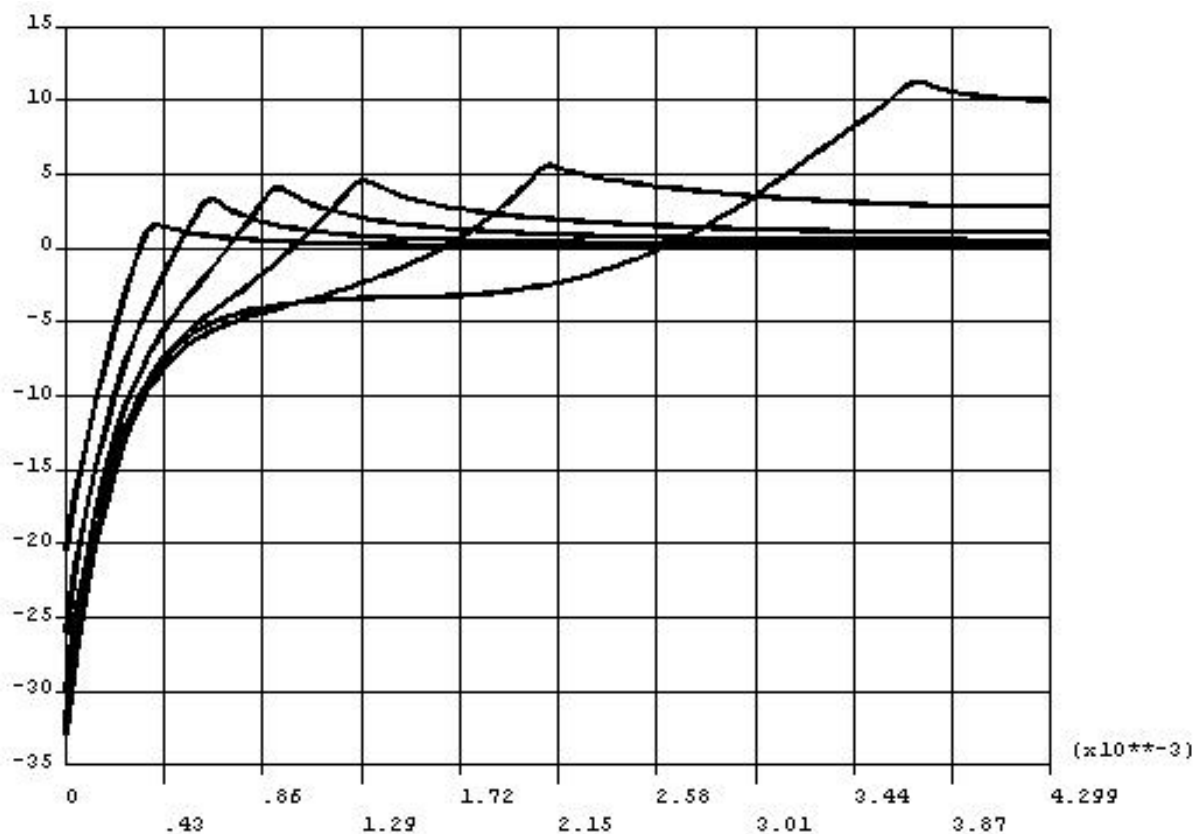
**Рисунок 3.79.** Линейные графики распределения скоростей, полученные в ANSYS (1) и при обработке экспериментальных данных (2) в относительных единицах на полном межэлектродном расстоянии.

На рис.3.80 представлен контурный график распределения давления в межэлектродном промежутке. Динамика развития ЭГД-течения сопровождается формированием двух зон давления, расположенных на различных концах заряженной струи: 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 струи и распространяется вместе с ней до середины межэлектродного промежутка, где она объединяется с аналогичной зоной, следующей от противоположного электрода. В момент времени 0,06 с (Рис.3.80), зона повышенного давления расположена на уровне 0,3 межэлектродного промежутка.



*Рисунок 3.80. Контурный график распределения давлений [Па], относительно нормального давления.*

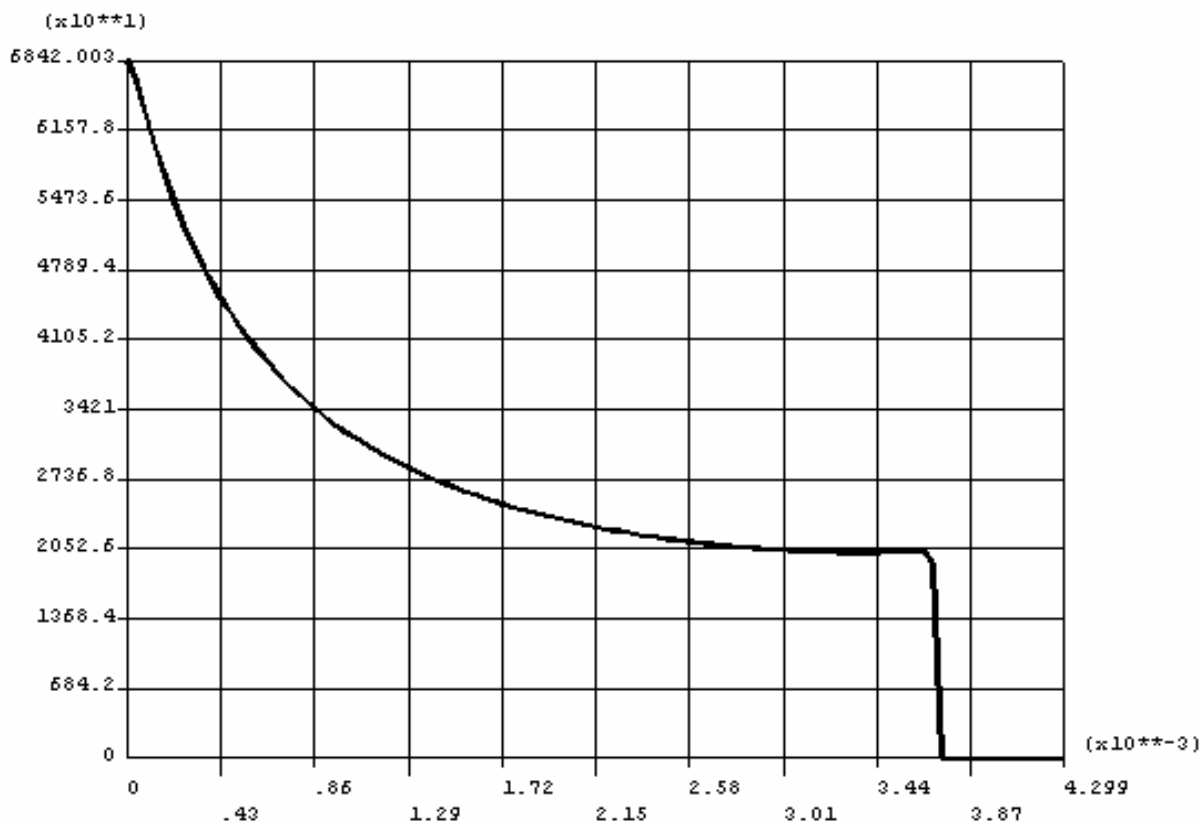
На рис.3.81 представлены линейные графики распределения давлений в жидкости вдоль центральной оси течения от нижнего электрода до середины межэлектродного промежутка. По мере продвижения заряженной струи вглубь межэлектродного промежутка формируются зоны пониженного и повышенного давления. Зона пониженного давления имеет максимум у поверхности электрода, абсолютная величина разрежения возрастает с течением времени. Отрицательное относительное давление быстро спадает от поверхности электрода в жидкость, область локализации зоны пониженного давления – приэлектродный слой. Область повышенного давления имеет максимум, расположенный на внешней границе заряженной струи и продвигающийся вместе с ней к центру межэлектродного промежутка. Динамика зон ускорения (рис.3.78) примерно соответствуют динамике зон локализации пониженного давления, а динамика зон торможения – динамике зон локализации повышенного давления.



*Рисунок 3.81. Линейные графики распределения давлений [Па] вдоль центральной оси.*

Анализ карт линий уровня ускорений показывает, что на начальной стадии, когда зарядовая структура имеет форму кольца, зона ускорения возникающих ЭГД-течений раздвоена и лежит вдоль боковых поверхностей электрода. По мере распространения заряженной струйки вглубь межэлектродного промежутка зона ускорения жидкости смещается вдоль оси течения в область, находящуюся над электродом, в данном случае нижним, и течение приобретает структуру, характерную для режима развитого ЭГД-течения, когда за зоной ускорения следует зона параллельноструйного центрального течения, в пределах которого ускорение практически отсутствует, а вектор скорости направлен вдоль линии, соединяющей электроды. Далее следует зона торможения, вызванного вязкостью жидкости, и застойная зона в области встречи двух струй, текущих навстречу друг другу.

Таким образом, в ЭГД-течении реализован экзотический механизм: благодаря действию объемных кулоновских сил течение жидкости происходит из приэлектродной 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.



**Рисунок 3.82.** Линеиный график распределения сил [Н] вдоль центральной оси [м] в момент времени 0,102 с.

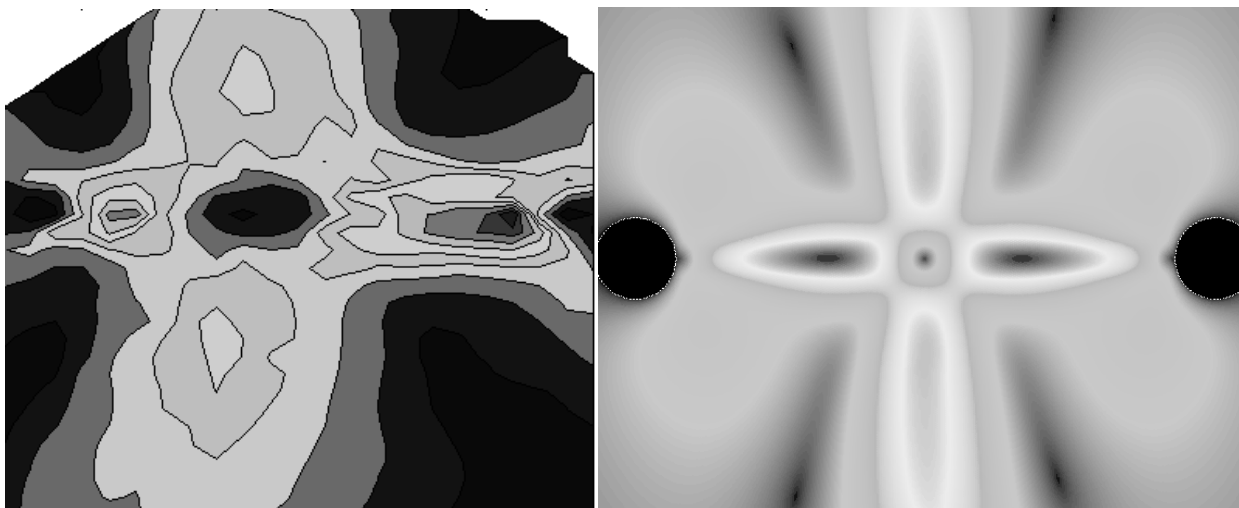
Динамика изменения кулоновских сил состоит в продвижении области их локализации к середине межэлектродного промежутка вместе с заряженной струей жидкости. Силы локализованы в заряженной струйке и монотонно спадают от поверхности электрода в жидкость и в отличие от ускорений не имеют экстремума (рис.3.82). Непосредственно в приэлектродной области кулоновские силы создают зону пониженного давления, и только на некотором расстоянии от поверхности электрода приводят жидкость в движение.

### **Исследование зоны рекомбинации в боковых струях ЭГД течений [26,17]**

Если скорости зарядообразования у каждого из электродов одинаковы, то течения от каждого из электродов реализуются в виде двух встречных потоков одинаковой скорости, направленных навстречу друг другу [11,26]. Вдоль плоскости симметрии течения идут в виде двух параллельных противоположно заряженных струй. В случае ламинарного ЭГД-течения, зарегистрированного в ряде экспериментов, линии тока разнополярных струй в области боковых струй параллельны друг другу. Именно эта область является областью активной рекомбинации зарядов противоположного знака, инжектируемых каждым из электродов. Поэтому исследование структуры боковых струй встречных

течений имеет большое значение. Этой проблеме посвящен ряд экспериментальных исследований.

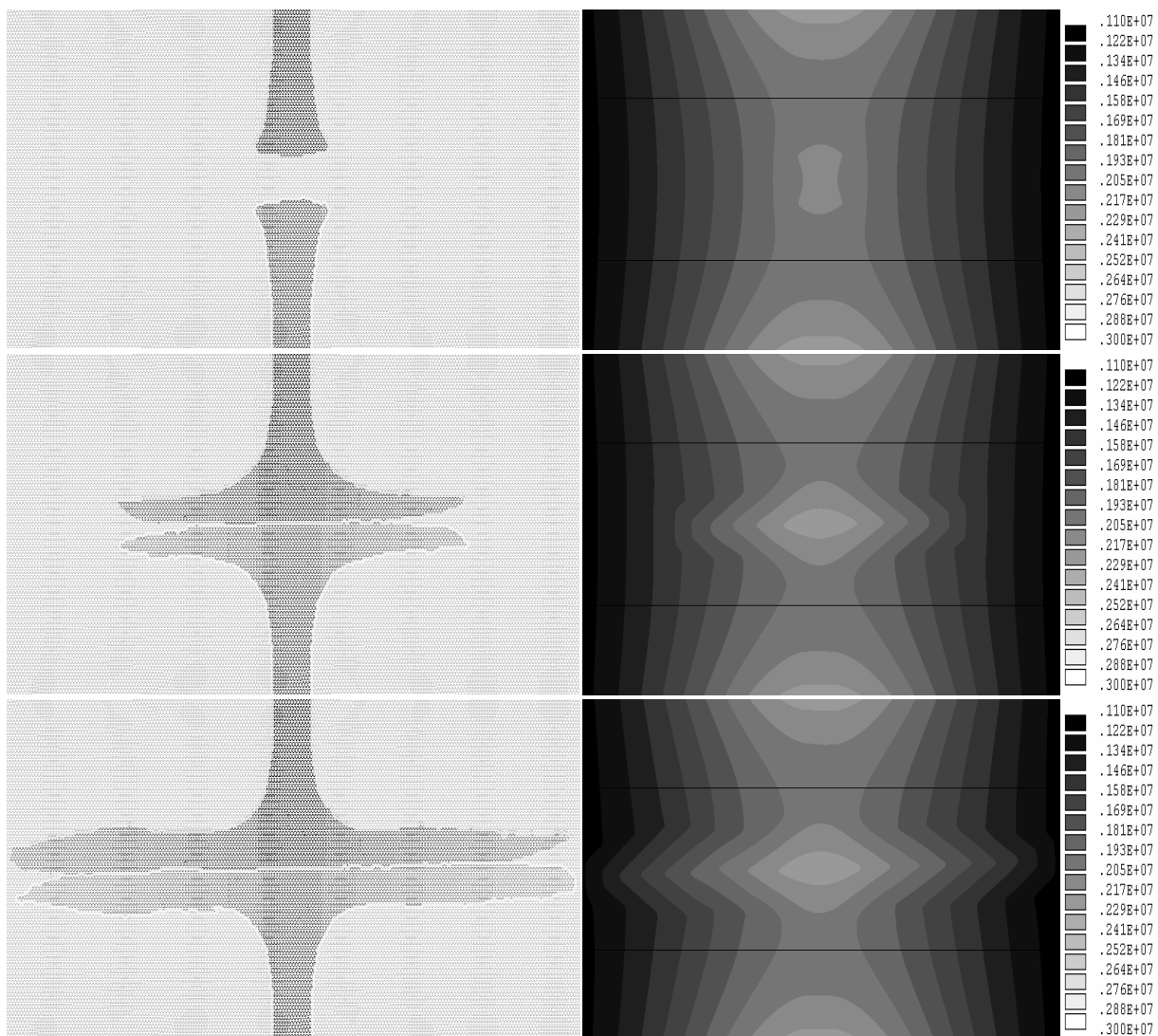
Контурные графики скоростей полученных экспериментально течений и обработанных в *Matlab*, а в частности, их боковых струй, можно наблюдать на рис.3.83, слева. На следующем рисунке (рис.3.83, справа) представлены результаты численного моделирования. Видно, что они имеют хорошее качественное сходство.



*Рисунок 3.83. Контурный график распределения скоростей: эксперимент – слева, моделирование в ANSYS – справа, электроды по бокам.*

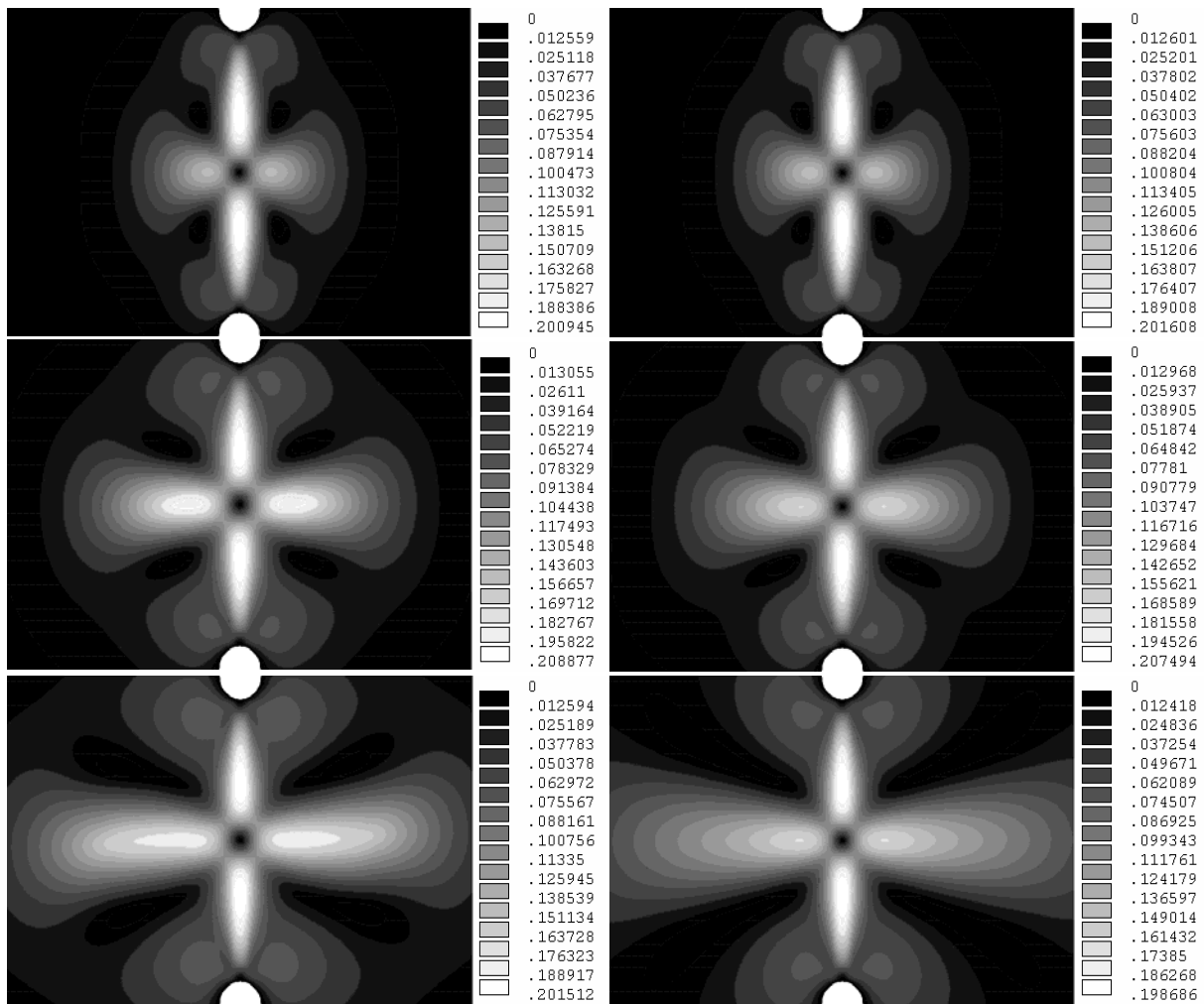
В нашей модели рассмотрены два варианта: очень быстрая рекомбинация заряда, когда он не успевает распространиться в боковые струи, и медленная рекомбинация, когда полная рекомбинация происходит на расстоянии трех межэлектродных промежутков относительно центра кюветы вдоль оси симметрии.

На рис.3.84, (слева) представлены три стадии распространения объемного заряда вдоль боковых струй после встречи в центре межэлектродного промежутка при медленной рекомбинации для моментов времени: 0,025, 0,1, 0,18сек. с момента подачи напряжения. Центр картинке совпадает с центром межэлектродного промежутка. Видно, что противоположно заряженные боковые струи движутся параллельно друг другу и не отклоняются в стороны, что обусловлено действием кулоновских сил, которые действуют в заряженной области и направлены зеркально-симметрично к оси симметрии, притягивая струи друг к другу.



**Рисунок 3.84.** Область распределения заряда (слева) и соответствующее электрическое поле  $E$  [В/м] (справа),  $t=0,025, 0,1$  и  $0,18$  сек.

Фронт заряженной области перемещается вдоль центральной плоскости, образуя зарядовую структуру, напоминающую плоский конденсатор. Объемный заряд существенно влияет на распределение электрического поля (рис.3.84, справа). Видно, что оно направлено перпендикулярно центральной плоскости, причем зона высокой напряженности перемещается вместе с фронтом заряда струй. Следовательно, процесс рекомбинации может быть реализован путем миграции ионов в поле, создаваемом зарядом ионов, поперек течения в струях. В случае быстрой рекомбинации считается, что заряд не успевает распространиться в боковые струи, и после встречи заряженных струй область распределения объемного заряда остается постоянной (рис.3.84, верхний).



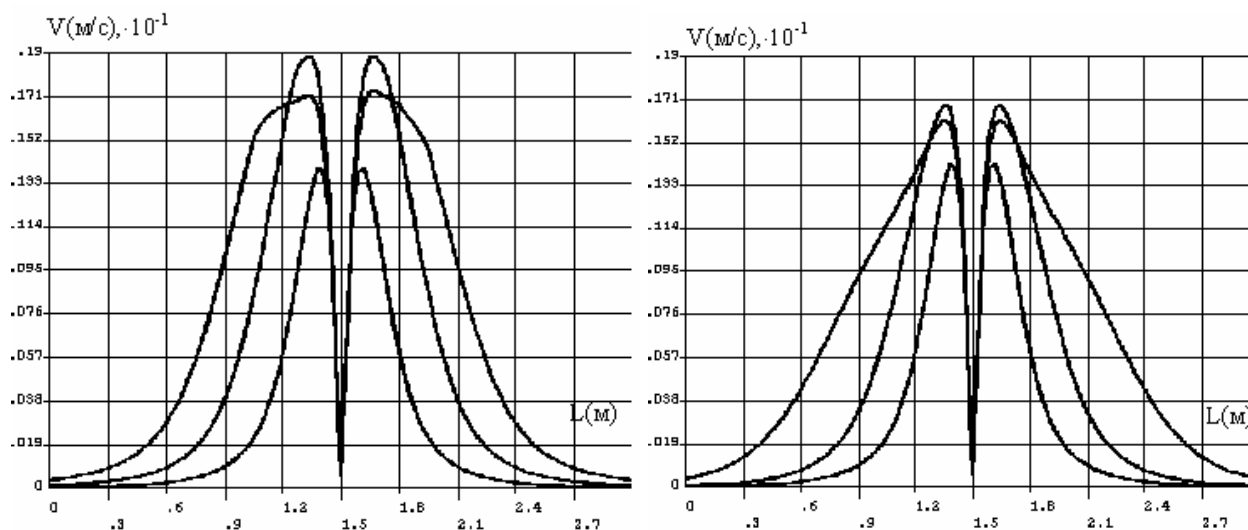
**Рисунок 3.85.** Распределение скоростей  $V$ [м/с], для случая медленной (а) и быстрой (б) рекомбинации, в разные моменты времени:  $t = 0, 0,025, 0,10$  и  $0,18$ с.

Контурные графики распределения скоростей в соответствующие моменты времени представлены на рис.3.85, а, для медленной рекомбинации и на рис.3.85, б, для быстрой. Характерные особенности и различия получившихся течений удобнее рассматривать, используя осевые распределения скорости (рис.3.86).

В первом случае по мере распространения заряженных струй происходит формирование зоны равномерного течения жидкости – симметричные зоны относительно оси, соединяющей центры электродов. Зона ускорения практически не смещается, занимая небольшой промежуток в области центра кюветы. Зона торможения смещается в соответствии с изменением расположения области равномерного течения, незначительно при этом размываясь. Во втором случае на жидкость в боковых струях электрические силы не действуют, она подчиняется гидродинамическим законам. Видно (рис.3.86), что по мере развития течения не происходит образования зоны равномерного течения жидкости, есть лишь узкий максимум скорости, который практически не смещается. Зона ускорения схожа с зоной в первом случае. Зона

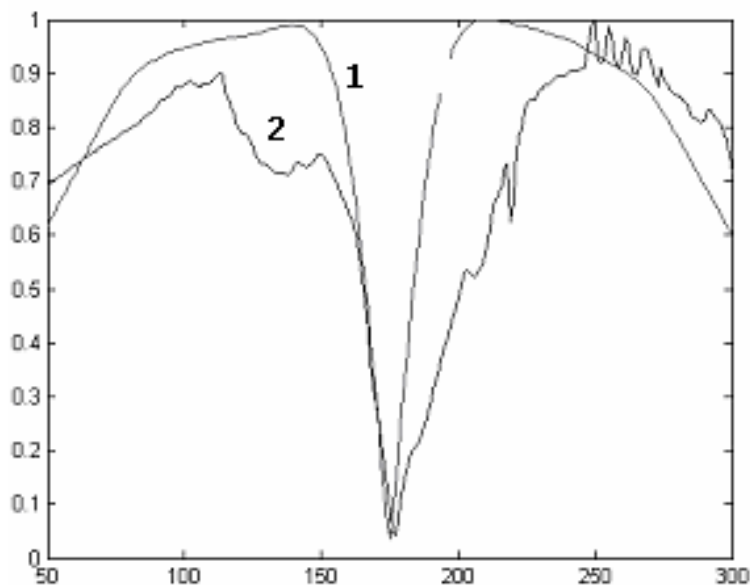


торможения с течением времени сильно размывается, занимая большую часть области интереса.



**Рисунок 3.86.** График распределения скоростей вдоль оси симметрии для случаев медленной (а) и быстрой (б) рекомбинации. Центр графика по оси абсцисс совпадает с центром кюветы.

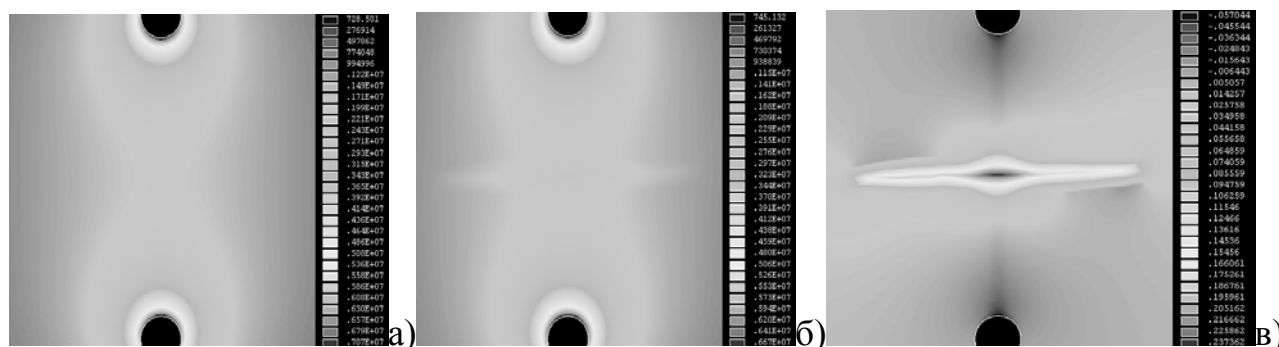
На рис.3.87 представлены сравнительные линейные распределения скорости вдоль оси симметрии, полученные экспериментально и по результатам моделирования для случая медленной рекомбинации. Кривые нормированы по скорости.



**Рисунок 3.87.** Линейные графики распределения скоростей вдоль оси симметрии, полученные в ANSYS (1) и при обработке эксперимента (2), в относительных единицах, центр графика по оси абсцисс совпадает с центром кюветы.

По этому графику можно сказать, что заряд действительно распространяется в боковые струи, имеется довольно хорошее качественное совпадение эксперимента и случая медленной рекомбинации. В дальнейшем предстоит выяснить, какой же закон рекомбинации наиболее точно описывает экспериментально полученные данные.

Изменение электрического поля при распространении заряда в кювете оказывает заметное влияние на характер течений, оно особенно сильно искажается в центральной области кюветы вдоль оси симметрии. На рис.3.88, представлены распределения электрического поля в кювете без внесения объемного заряда (а) и с распространившимся зарядом в боковые струи (б).

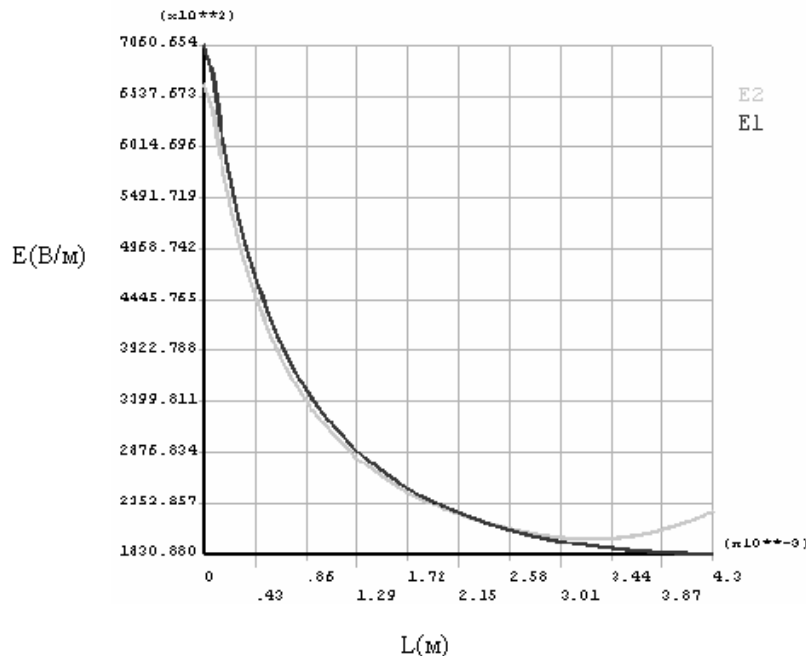


**Рисунок 3.88.** Электрическое поле  $E$  [В/м] без объемного заряда (а), с объемным зарядом в боковых струях (б) и относительная разность этих электрических полей (в).

На рис.3.88, в, представлена относительная разность этих (рис.3.88,а,б) полей. Видно, что максимальные искажения поля при внесении заряда  $0,01 \text{ Кл/м}^3$  составляют 23,7 % в центральной области, заряд увеличивает поле. По мере рекомбинации заряда в боковых струях искажения электрического поля уменьшаются. В области максимальной напряженности поля (у электродов) заряд снижает поле на 5,7 %. Линейные графики напряженностей электрического поля вдоль центральной полуоси в обоих случаях представлены на рис.3.89.

Таким образом, 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 струи 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 зона повышенного давления, распространяющаяся в объем жидкости вместе с границей заряженной струи.

Эти особенности определяют характерную зонную структуру ЭГД-течения: зону ускорения, имеющую экстремум, находящийся в приэлектродной области, и зону торможения жидкости, распространяющуюся в межэлектродный промежуток и приводящую к формированию боковых струй четырехячейистого ЭГД-течения.



**Рисунок 3.89.** Напряженность электрического поля  $E$  [В/м] вдоль центральной оси,  $E1$  – без заряда,  $E2$  – с зарядом.

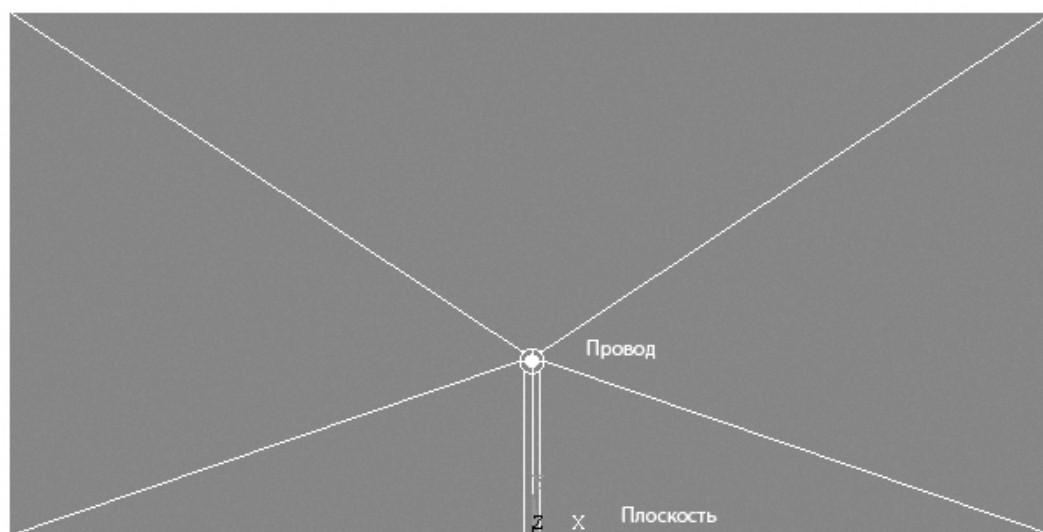
Анализ боковых струй позволил описать особенности механизма рекомбинации противоионов в электрическом поле, наведенном противозарядами встречных струй.

Сопоставляя результаты моделирования рекомбинации с экспериментальными данными, можно отметить хорошее сходство случая медленной рекомбинации с экспериментальными данными по исследованию встречных ЭГД-течений в боковых струях. Рассмотренный случай быстрой рекомбинации заряда не подходит для описания реально полученных данных. Таким образом, характерные особенности ЭГД-течения определяются распространением тонких заряженных струй с объемным зарядом от электродов вглубь межэлектродного промежутка и их дальнейшим взаимопараллельным движением вдоль оси симметрии в области боковых струй.

### **Моделирование нестационарных ЭГД-течений в несимметричной системе электродов типа провод-плоскость [21,22,33]**

Для изучения процесса формирования, развития и особенностей движения объемного заряда в межэлектродном промежутке в несимметричной

системе электродов типа провод-плоскость разработан алгоритм и создан пакет программ в системе *АНСИС*. Геометрия задачи представлена на рис.3.90.



**Рисунок 3.90.** Геометрия задачи

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. Естественно предположить, что в начальный момент заряд распределен в слое, имеющем форму кольца, соосного с активным электродом. Однако, как показали численные эксперименты, при таком распределении возникающие электрические силы симметричны относительно цилиндрического электрода и возникающие течения не имеют определенного направления. Поэтому в модели следует выделить приоритетное направление распространения течений и определить начальную форму заряженной области, как кольцевую, слегка смещённую в направлении к противоэлектроду.

С течением времени из первоначально неподвижного заряженного слоя под действием кулоновских сил возникает ЭГД-течение, которое перемещает электрический заряд вдоль линий тока жидкости. В результате этого заряженная область принимает форму узкой полоски, простирающейся от проволочного электрода к плоскому. Распределение плотности электрического заряда в области заряженной струи считается однородным.

Такие допущения правомерны, если ионы, образующие область объемного заряда «вморожены» в жидкость, т.е. электрическое число Рейнольдса значительно больше 10.

Для решения данной задачи моделирование проводилось при помощи конечно-элементного пакета *ANSYS*. При решении использовались электростатический, и гидродинамический типы анализа. Алгоритм,

реализованный в виде пакета программ, состоит в следующем. На первом шаге решается электростатическая задача с однородным распределением объёмного заряда, заданным в пределах приэлектродного кольца и определенной разностью потенциалов на электродах. Из полученного на первом шаге решения находится распределение кулоновских сил в заряженной области. Плотность электрических сил вычисляется как произведение плотности объёмного 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 процесс развития течения в динамическом режиме, причем учитывать не только продвижение заряда вглубь межэлектродного промежутка, но и отслеживать изменения толщины заряженной области.

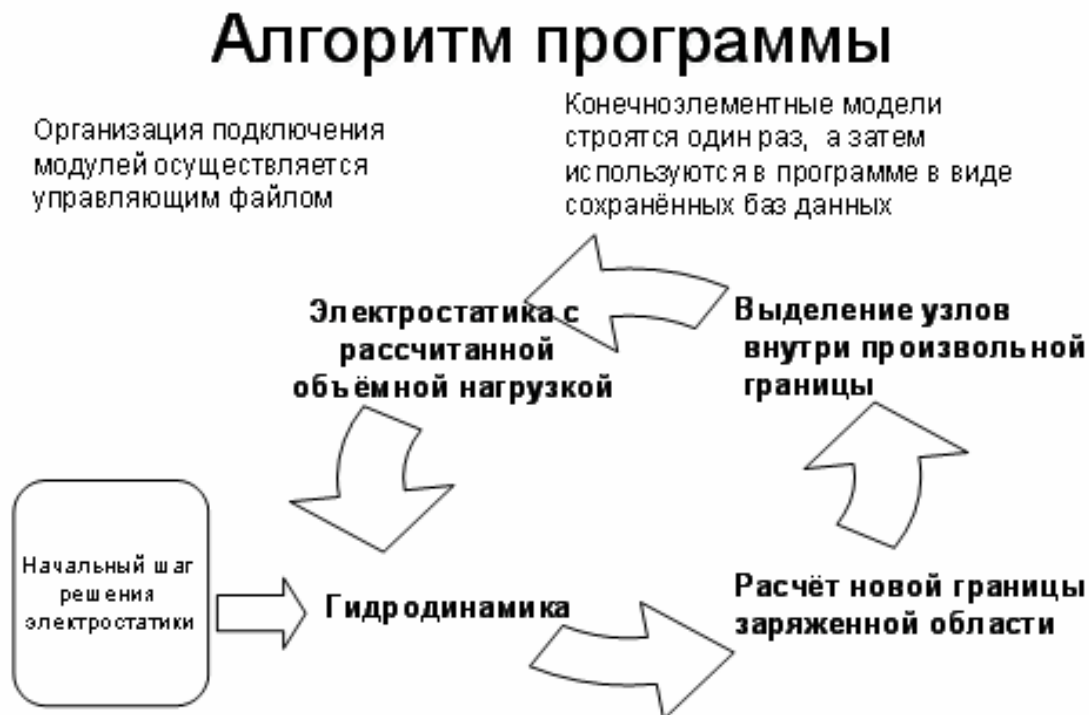
Задача решается в приближении к тому, что заряд “вморожен” в жидкость, тогда в режиме ламинарного течения можно считать, что он переносится только вдоль линий тока жидкости. Миграция заряда в собственном и внешнем поле не учитывается, поэтому конфигурация формы заряженной области определяется при помощи построения линий тока жидкости, которое производится после расчёта гидродинамической части задачи.

Результатами расчетов гидродинамической части задачи являются базы данных о напряженности электрического поля, скорости и давлении, на основе которых могут быть построены: векторное поле скоростей и их распределение, распределение давления и собственно линии тока ЭГД-течения. Смещение заряженной области и форма области занятой объемным зарядом на последующем шаге рассчитывается с помощью специального набора процедур, написанного на языке интерпретатора *ANSYS*.

Рассмотрим подробнее алгоритм решения задачи. 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 следующих обстоятельств: форма переднего фронта нам известна и мы считаем, что первоначальная форма заряженного кольца, локализованного вокруг активного электрода, остается неизменной.

На второй итерации новое распределение объёмного заряда передается в электростатическую задачу, рассчитывается новая плотность электростатических сил. Рассчитывается распределение электрических сил на второй итерации, по которому рассчитывается гидродинамическая задача. Таким образом, организуется итеративный процесс. Между итерациями задачи

переносится геометрия внешней границы заряженной области. Схематически описанный алгоритм представлен на диаграмме (рис.3.91).



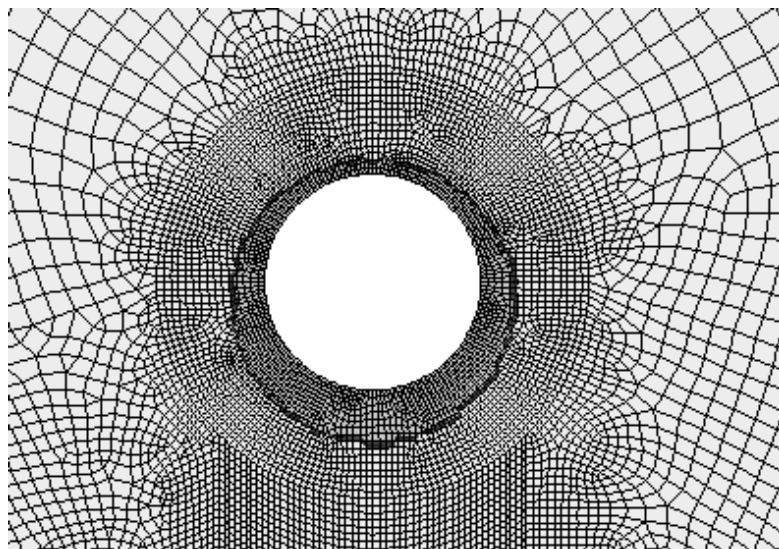
*Рисунок 3.91. Алгоритм программы*

Такой алгоритм позволяет достигнуть сравнительно высокой скорости работы программы.

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

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

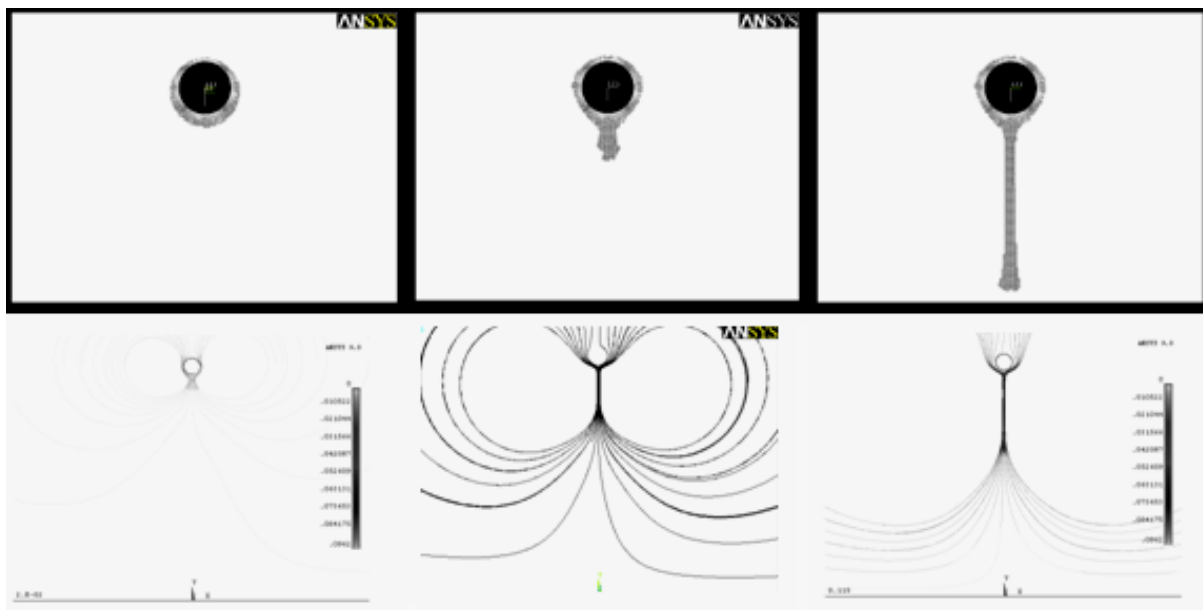
В разработанной программе входными данными для автоматического расчёта являются напряжение на электродах, величина плотности объёмного заряда и его начальное распределение – геометрия заряженного кольца вокруг активного электрода и размер кольца. В области интереса – области распространения объёмного заряда – сетка значительно уменьшается (рис.3.92).



*Рисунок 3.92. Сетка в приэлектродной области, темной «кольцевой» линией выделена заряженная область у провода.*

### **Результаты расчетов**

Исходные данные для проведения расчета: система электродов провод над плоскостью, двумерный случай, ширина кюветы 0,09м, высота кюветы 0,03м, радиус провода 0,35мм, длина межэлектродного промежутка 1см. Начальная плотность объёмного заряда в кольце:  $0,01 \text{ Кл/м}^3$ , радиус начальной заряженной области:  $1,3 \cdot r$  ( $r$  – радиус электрода), приложенное напряжение 25кВ. На рис.3.93, вверху, представлены последовательные стадии формирования заряженной струи в моменты времени 0,005с, 0,055с, 0,090с после включения напряжения, время задержки, необходимое для формирования заряженного кольца вокруг активного электрода не учитывается. В нижней части рисунка представлены линии тока течения в области заряженной струйки. Течение носит ламинарный, параллельноструйный характер. Непосредственно под электродом на начальных стадиях процесса наблюдается существенное сгущение линий тока жидкости, что приводит к распространению достаточно тонкой заряженной струи.



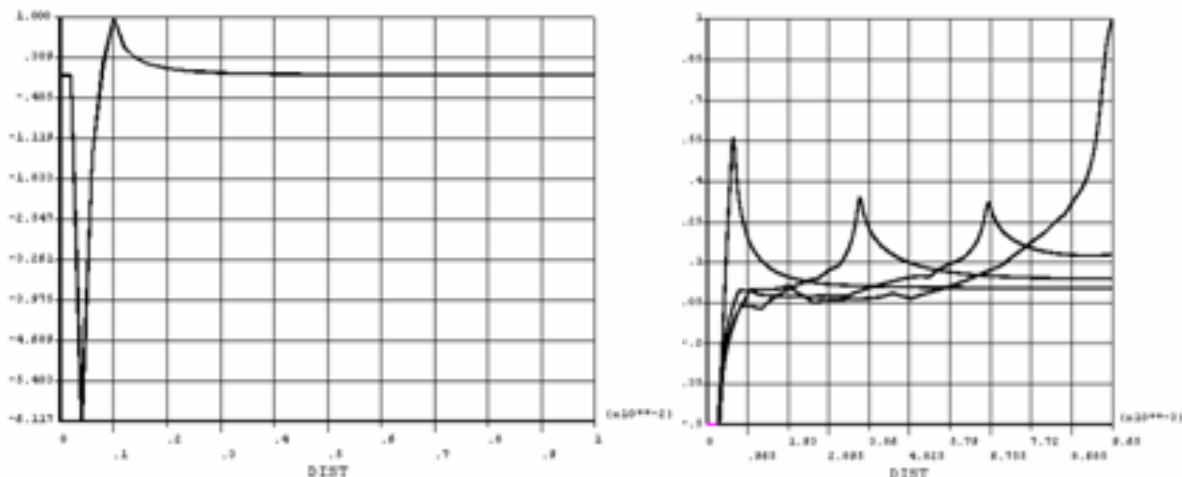
**Рисунок 3.93.** Стадии формирования заряженной струи (сверху) и линии тока течения (снизу) в моменты времени 0,005с, 0,055с, 0,090с после включения напряжения.

На первом шаге линии тока жидкости лишь немного внедряются вглубь межэлектродного промежутка, образуя сильное сужение в приэлектродной области, напоминающее воронку, что и позволяет начать поступательное движение заряженной струи вглубь межэлектродного промежутка. По мере продвижения заряженной струи линии тока выпрямляются, и возникает участок параллельноструйного течения. Шаг по времени выбран таким малым, чтобы была возможность детально отслеживать изменения линий тока по мере продвижения заряда. Как видно (рис.3.93) на конечных этапах область параллельноструйного однородного течения занимает большую часть межэлектродного промежутка, причем толщина заряженной струи составляет примерно половину толщины заряженного кольца.

На рис.3.94 представлены графики распределения давления вдоль межэлектродного промежутка, слева в начальный момент времени, справа динамика изменения в последующие моменты времени: 0,06, 0,085, 0,185 и 0,285 сек. Непосредственно под электродом на начальных этапах формируется локальная зона пониженного давления, а за передним концом заряженной струйки следует зона повышенного давления. На правой части рисунка видно, как зона повышенного давления, по мере продвижения заряженной струйки к противоэлектроду также смещается к нему. Пик положительной полуволны избыточного давления соответствует внешней границе заряженной струйки. Под активным электродом заряженная область имеет форму воронки, которая формируется на начальной стадии процесса и при продвижении фронта заряженной струйки вглубь межэлектродного промежутка приэлектродная форма и структура линий тока жидкости в области активного электрода и структура и величина приэлектродной области пониженного давления остаётся

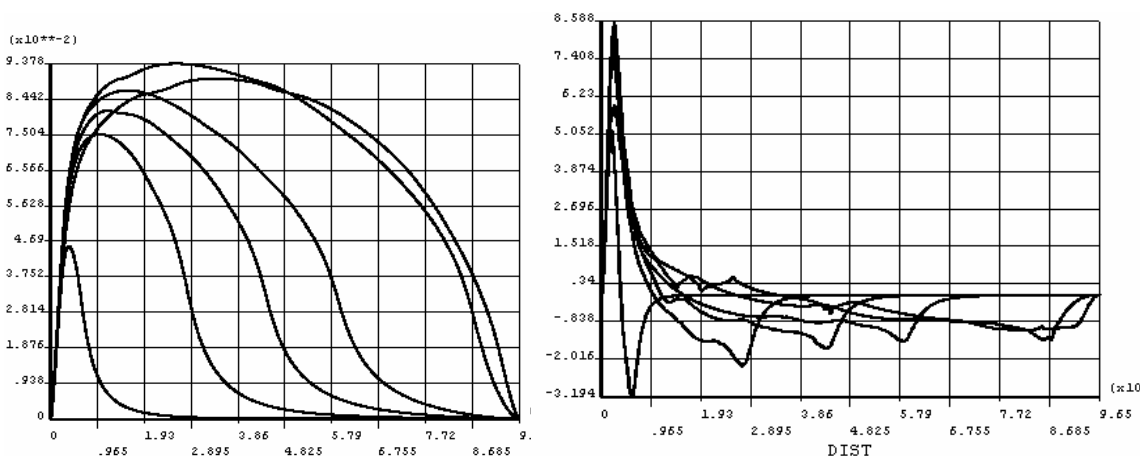


неизменной. По-видимому, основной причиной ускорения жидкости, а, следовательно, и сгущения линий тока под активным электродом является наличие области пониженного давления. Эта область формируется на начальных стадиях процесса и в дальнейшем практически не изменяется. Она является своего рода «насосом течения».



**Рисунок 3.94.** Распределение давления у активного электрода (слева) и динамика распространения зоны повышенного давления (справа). Величина давления нормирована на максимум, который возникает у противоэлектрода при касании заряженной струи. Распределения давлений представлены для 0,06, 0,085, 0,185 и 0,285 секунды после начала движения.

На рис.3.95 представлены распределения скорости и ускорения вдоль межэлектродного промежутка по центру заряженной струйки для разных моментов времени, с момента начала движения: 0,06, 0,11, 0,16, 0,245, 0,285 сек.



**Рисунок 3.95.** Распределения скоростей (слева) и ускорений (справа) вдоль межэлектродного промежутка в различные моменты времени.

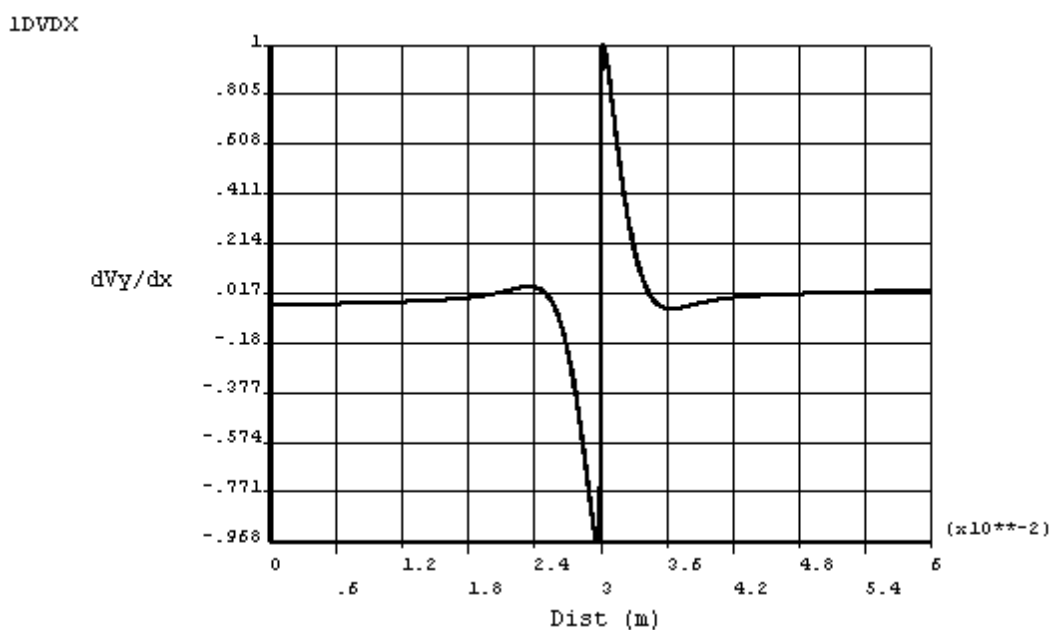
Видно (рис.3.95, слева), что в непосредственной близости к активному и пассивному электродам имеются тонкие прилипшие слои неподвижной жидкости. Следует отметить, что при моделировании задавалось лишь обычное условие прилипания жидкости к поверхности электрода, неподвижность жидкости в пределах приэлектродного заряженного кольца не постулировалась.

По графику ускорения и скорости хорошо видны три другие зоны течения. Можно выделить зону интенсивного ускорения, соответствующую воронкообразной части заряженной струйки у активного электрода (рис.3.93), зону плавно изменяющегося течения, соответствующую параллельноструйной 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.3.94) распространяется вглубь межэлектродного промежутка до противозэлектрода и соответствует внешней границе заряженной струйки. Как только заряженная струя достигает противозэлектрода, структура течения перестаёт изменяться.

Заряженная струя раздваивается и распространяется вдоль поверхности противозэлектрода, 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 половину от длины межэлектродного промежутка.



**Рисунок 3.96.** Распределение поперечной производной скорости течения в центральной струе.

Поскольку электрические силы сосредоточены в области заряженной струйки то ЭГД-течение состоит из двух частей: силовой, соответствующей геометрии заряженной струи и пассивной, соответствующей остальной части, где электрические силы отсутствуют. На рис.3.96 представлен график производной продольной составляющей скорости по поперечной координате. 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 пассивной части течения под действием вязких сил.

Анализ результатов численного моделирования процесса установления ЭГД-течения, основанного на предположении о том, что на первичной стадии процесса вокруг активного электрода формируется заряженная кольцеобразная структура, из которой на более поздних стадиях в приближении «вмороженности» заряда, формируется тонкая заряженная струя жидкости, определяющая структуру и свойства ЭГД-течений, показывает, что течение имеет все признаки течений с объемной нагрузкой. Полученные в результате численного моделирования контурные и векторные поля скоростей, распределения давлений, линии тока на конечной стадии развития течения близко соответствует течениям, полученным при моделировании итерационным способом.

В результате анализа результатов моделирования показан механизм формирования зонной структуры ЭГД-течения, многократно наблюдаемой в экспериментах.

### **Моделирование сквозного ЭГД-течения [18,32]**

В данном разделе представлены результаты компьютерного моделирования установившегося сквозного ЭГД-течения в симметричной системе электродов провод-провод. Сквозное течение есть 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.

Решение задачи проводилось в пакете численного моделирования *ANSYS*, основанного на конечно-элементном механизме решения поставленных задач. Для решения задачи используется метод конечных элементов. Использовался типовой алгоритм, заключающийся в последовательном решении задач электростатики и гидродинамики:

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

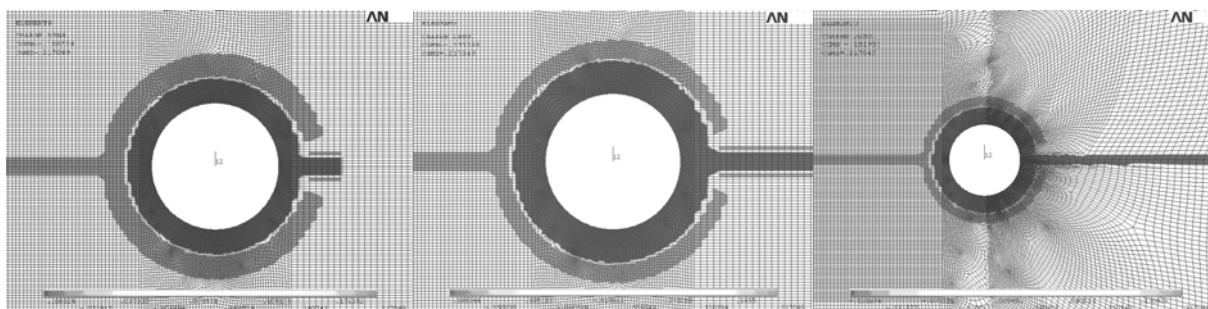
2. По результатам решения в приближении «вмороженности» заряда в жидкость строится новая, «уточнённая» заряженная область по линиям тока ЭГД-течения, полученным на первой итерации;
3. Новая заряженная область используется при решении задачи электростатики на следующей итерации, после этого вновь вычисляется объемная электрическая сила.
4. Повторяется решение гидродинамики с уточненной областью силовой нагрузки.

Как видно, процесс итерационный, причём сходимость осуществляется по анализу области локализации объемного заряда.

При моделировании сквозного течения на первой итерации структура заряда моделировалась в виде двух кольцевых областей вокруг активного (рис.3.97) и пассивного (рис.3.98) электродов, заряженных одноименно 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 (рис.3.97), заряжена одноименно с ним (светло-серый оттенок), полоска, идущая от пассивного электрода (рис.3.98), за пределами межэлектродного промежутка заряжена противоположным знаком (темно-серый оттенок) и с обеих сторон ограничена полосками противозаряда.



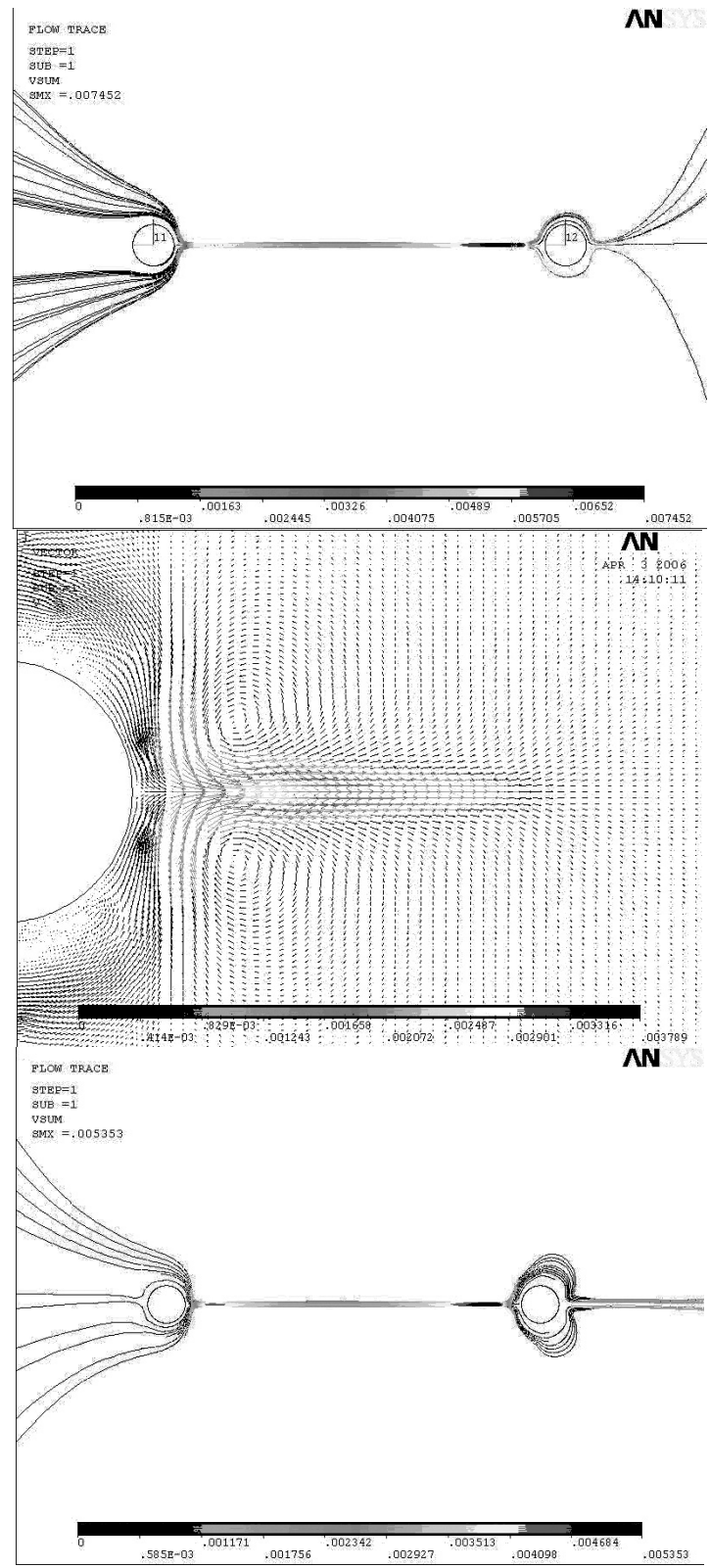
**Рисунок 3.97.** Области локализации объемного заряда у активного электрода на первом, втором и третьем шаге итераций, соответственно.



**Рисунок 3.98.** Области локализации объемного заряда у пассивного электрода в начальный момент времени.

Результаты моделирования показали, что гидродинамическая структура течения существенно зависит от стартовой протяженности заряженных струй за

пределами межэлектродного промежутка. Следует заметить, что этот параметр определяется скоростью рекомбинации заряда в биполярно-заряженной струе.

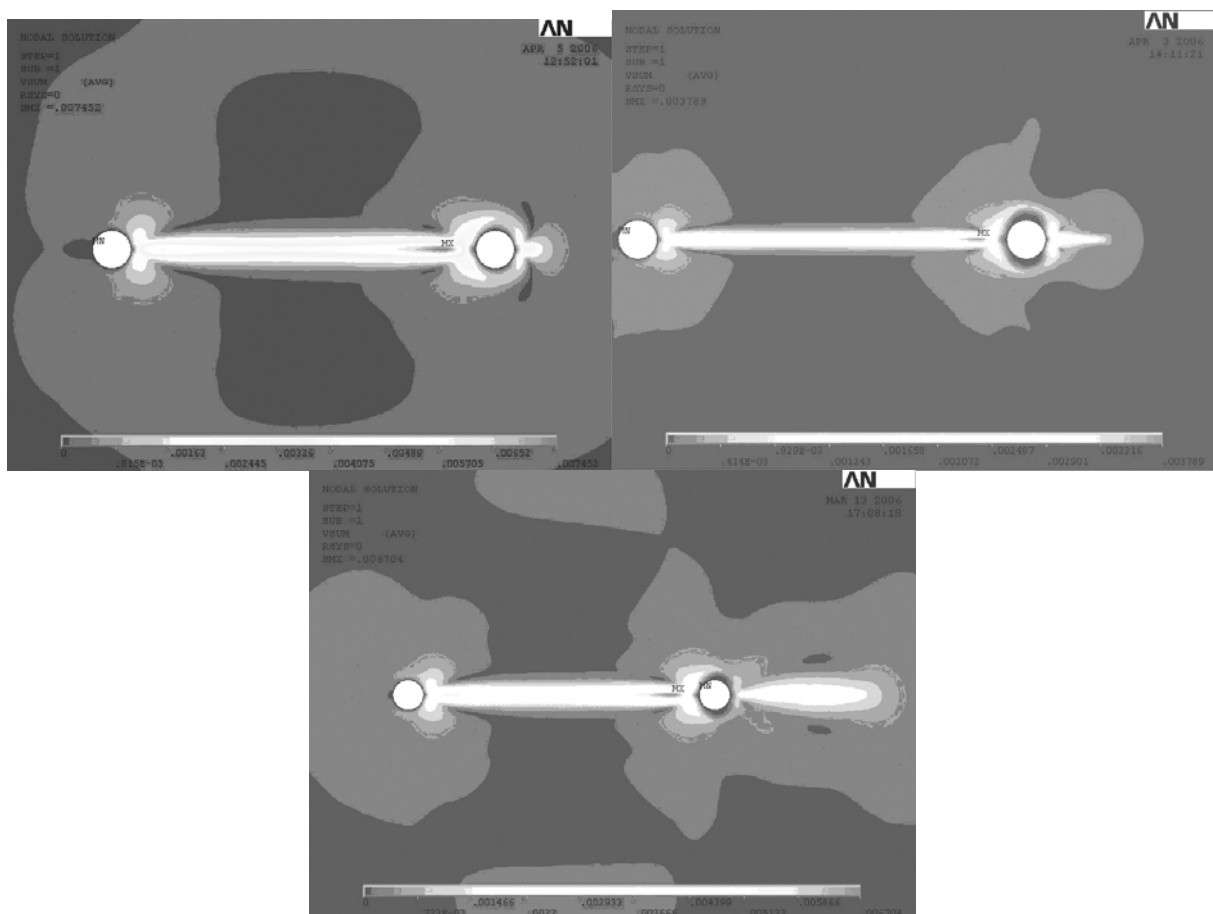


*Рисунок 3.99. Линии тока ЭГД-течения при различных начальных структурах заряда на противоэлектроре (рис.3.98).*

На рис.3.99 представлены линии тока ЭГД-течения, соответствующие трем различным зарядовым структурам (рис.3.98). Видно, что сквозной режим ЭГД-течения реализуется в случае, когда протяженность заряженных областей в заэлектродной области сравнима с длиной межэлектродного промежутка. При коротких заряженных струйках течение в заэлектродной области теряет сквозной характер, появляются завихрения.

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, т.е. 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.

На рис.3.100 представлены итоговые контурные графики скоростей, соответствующие начальным распределениям заряда (рис.3.98).



*Рисунок 3.100. Контурные графики скоростей для различных начальных структур заряда (рис.3.98)*

Замечено, что ширина заряженной струи между электродами зависит от ширины приэлектродного кольца. При этом это отношение остаётся постоянным, с хорошей степенью точности, и равняется  $w/h=2$ .

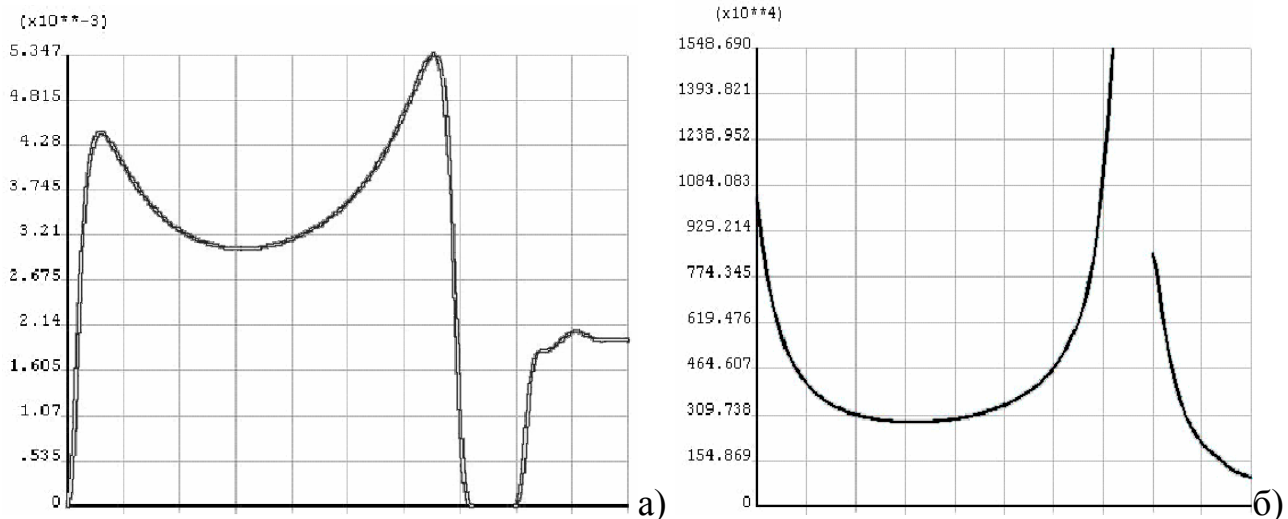
При моделировании сквозного ЭГД-течения возможны два подхода: 1) на основе экспериментальных данных задать ожидаемое распределение заряда и итерационно решить поставленную задачу с целью поиска реального распределения; 2) в качестве входных данных задачи использовать распределение заряда, получаемое при решении задачи о симметричном течении, которое формируется при равном ионообразовании на обоих электродах. После выхода на стационар, что само по себе является интересной задачей, увеличиваем заряд, поставляемый одним из электродов, что нарушает устойчивое равновесие заряженных струй между электродами и, при определённом соотношении между зарядами, приводит к сквозному течению.

Рассмотрим более подробно решение, полученное в случае, когда стартовым являлся третий вариант, приведённый, 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 слоистую заряженную структуру, внешние слои которой несут заряд знака активного электрода, внутренняя – заряд пассивного электрода, противоположный по знаку. За пределами межэлектродного промежутка струя распространяется на расстояние, равное примерно 3 диаметрам электродов (1,5мм). Результаты решения на 2 итерации, когда начальные плотности активного и пассивного заряда незначительно отличаются по модулю, представлены на рис.3.101.



**Рисунок 3.101.** *Контурный график скорости сквозного течения при наличии «длинных» биполярных струй за пределами пассивного электрода*

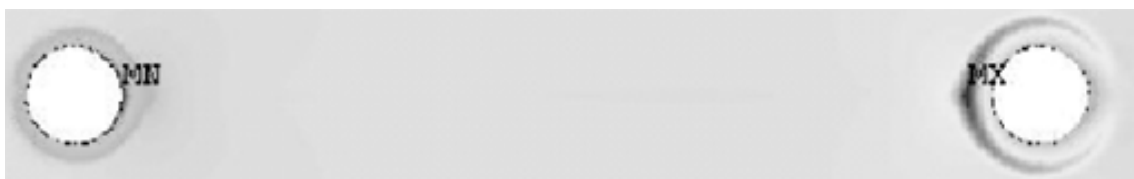
Распределение скорости по горизонтальному пути (“EL\_EL\_3h”, рис.3.101), проведённому от края активного электрода до границы заряженной области (за электродами) представлено на рис.3.102, а, в месте провала находится электрод. В соответствии с распределением электрического поля на этом пути (рис.3.102, б), профиль скорости заряженной жидкости имеет 2 максимума, соответствующих максимумам поля.



**Рисунок 3.102.** Графики скорости (а) и электрического поля (б) по горизонтальному пути.

Скорость струи за пассивным электродом быстро падает и по величине значительно ниже максимальной скорости внутри межэлектродного промежутка. Это распределение существенно отличается от распределений скоростей сквозного течения полученных в эксперименте, что заставляет искать иные распределения заряда, которые бы давали результат, более похожий на получаемый в экспериментах.

Типичная картина распределения давления представлена на рис.3.103. Она отражает специфику распределений объемного заряда в приэлектродных областях: у активного электрода зона пониженного давления, а у пассивного электрода биполярная структура – внутреннее кольцо пониженного давления, и внешний полумесяц повышенного.



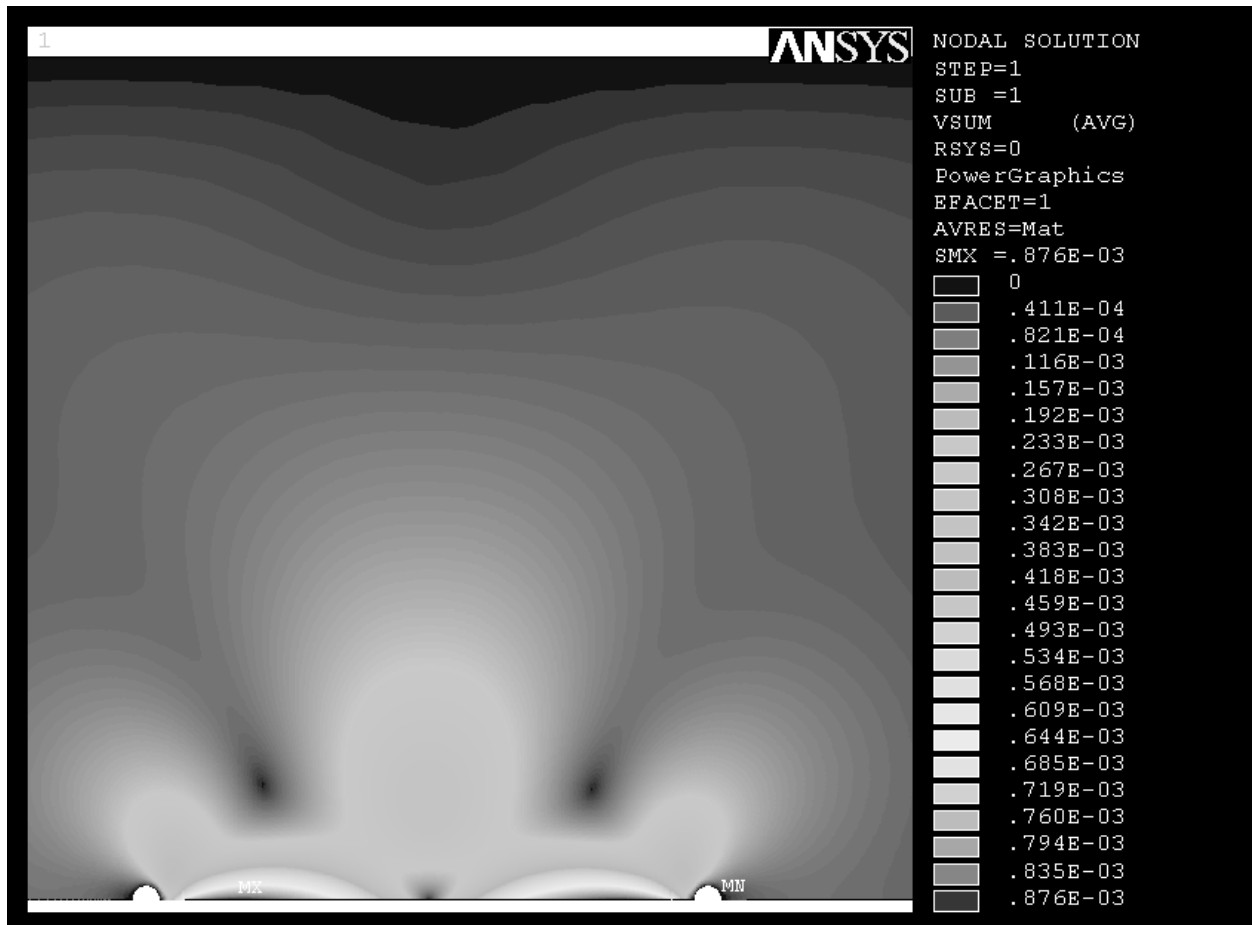
**Рисунок 3.103.** Контурный график давления (типичная картина для сквозного течения).

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.

Другой способ получения сквозного ЭГД-течения похож на экспериментальный: при равном ионообразовании на электродах формируются встречные симметричные ЭГД-течения. В данном случае, формируются 2 струи, идущие от электродов навстречу друг другу и уходящие в параллельные

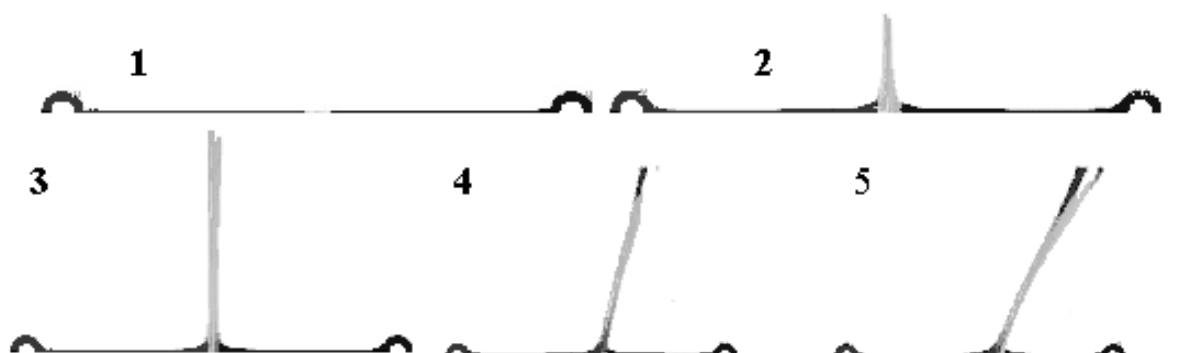


боковые струи в центре межэлектродного промежутка (рис.3.104). Управляя примесными свойствами жидкости, можно добиться ухода струй от параллельных к наклонённым в сторону электрода с меньшим зарядообразованием. Предельным случаем будет являться сквозное ЭГД-течение.



*Рисунок 3.104. 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.3.105, шаг 1). В зависимости от механизма рекомбинации, можно получить боковые струи разной длины (рис.3.105, шаги 1,2,3). Увеличим теперь зарядообразование на левом электроде, заряженные струи останутся параллельными, но будут наклоняться направо, в сторону меньшего заряда (рис.3.105, шаги 4,5).



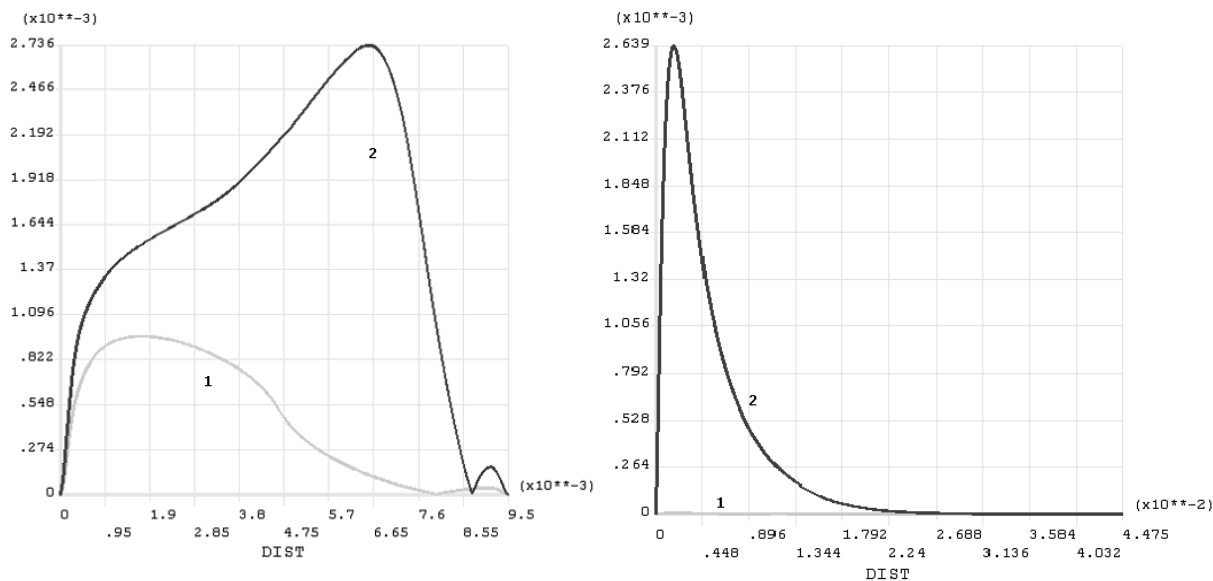
**Рисунок 3.105.** Формирование ЭГД-течения от симметричного (шаг 1,2,3) к боковым струям (шаг 4,5)

При скорости зарядообразования у пассивного электрода в  $8 \div 10$  раз меньше, чем у активного, формируется стабильное сквозное ЭГД-течение (рис.3.106). Результаты решения при таком соотношении зарядов представлены на следующих рисунках.



**Рисунок 3.106.** Распределение заряда в случае сквозного течения.

Основными особенностями сквозного характера течения служат максимум скорости (рис.3.107, сверху), возникающий за пределами межэлектродного промежутка, сравнимый с максимумом в пределах межэлектродного промежутка (рис.3.107, снизу), а также характерные линии тока жидкости, выходящие за пределы межэлектродного промежутка (рис.3.108).



**Рисунок 3.107.** Графики скорости на горизонтальном пути между (сверху) и за (снизу) электродами на 1 и 2 итерации.



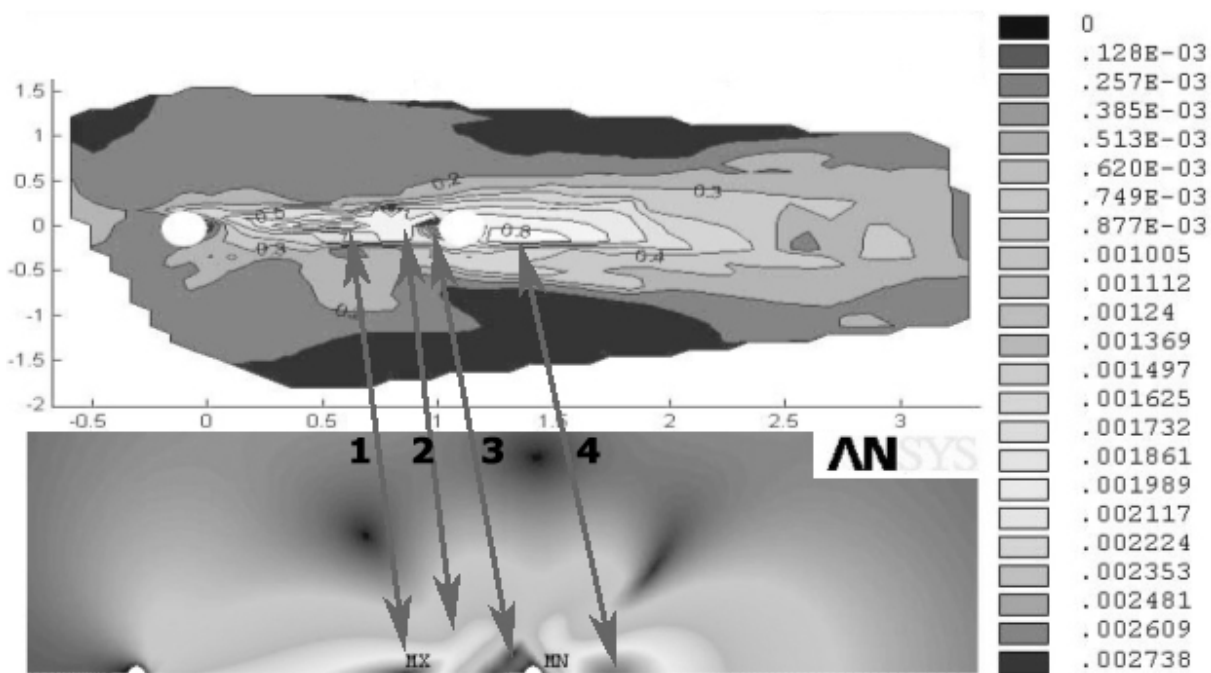
**Рисунок 3.108.** Линии тока жидкости при сквозном ЭГД-течении.

Сопоставляя результаты моделирования с экспериментальными данными (рис.3.109), можно выделить несколько важных особенностей этого вида течения (нумерация соответствует зонам, указанным на рисунке):

1. Абсолютный максимум скорости находится в пределах межэлектродного промежутка и смещён относительно центра в сторону пассивного электрода (рис.3.109, стрелка 1), при этом, после резкого роста скорости от края активного электрода до величины 0,5 максимума (по экспериментальным данным) 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 представленном 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. Видно, что в этой области так же 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 от активного электрода.

4. В области за пассивным электродом имеется дополнительный максимум скорости сквозного течения равный 0,80 абсолютного максимума в эксперименте и 0,79 в модели. Видно, что жидкость выходит далеко за пределы межэлектродного промежутка и теряет свою скорость на расстоянии в несколько межэлектродных промежутков, что делает сквозное ЭГД-течение особенно перспективным для практического использования.



*Рисунок 3.109. Сопоставление данных эксперимента и результатов моделирования*

Представлены результаты решения задачи о несимметричном сквозном течении жидкости в симметричной системе электродов типа провод-провод. С одной стороны анализ дополняет результаты, изложенные ранее с выводом на стационар симметричных струй, с другой стороны 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 электроду, 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 этой области электрическое поле направлено противоположно направлению движения жидкости, однако тормозящий эффект весьма мал.

При отношении величины заряда, инжектируемого с активного электрода, к заряду, поступающему в объём с пассивного электрода, равном 10 формируется хорошо-выраженное сквозное течение. Результаты моделирования хорошо качественно согласуются с результатами эксперимента, что может свидетельствовать о корректности предположений и пренебрежений, используемых в данном разделе.

## Литература

1. S.I.Jeong, J.Seyed-Yagooby, "Fluid Circulation in an Enclosure Generated by Electrohydrodynamic Conduction Phenomenon", Proceedings of the 14th International Conference on Dielectric Liquids, Austria, 2002.
2. Ph.Traore, D.Koulova-Nenova, H.Romat, "Numerical Approach of the Electrothermo-convective Motion in a Layer of a Dielectric Liquid", Proceedings of the 15th International Conference on Dielectric Liquids, Portugal, 2005.
3. M.Nakano, "Numerical Calculation of AC Electrical Conduction Associated with EHD Motion in Mineral Oil", Proceedings of the 15th International Conference on Dielectric Liquids, Portugal, 2005.
4. P.A.Vazquez, C.Soria, A.Castellanos, "Numerical Simulation of EHD flows with Finite Element and Particle Methods", International Conference S.F.E. 2004, France, 2004.
5. Noureddine Zouzou, Eric Moreau, Gerard Touchard P.A., "Smoke Particle Velocity Measurements in Point-to-Plane Corona Discharges", Proceedings of the 5th International EHD Workshop, France, 2004.
6. Toshiaki Yamamoto, Hidekatsu Fujishima, Yoshifumi Morita, Masaaki Okubo, "Three-Dimensional EHD Simulation for Alternately-Oriented Spiked-Electrode Electrostatic Precipitator", International Conference S.F.E. 2004, France, 2004.
7. Стишков Ю.К., Павлейно М.А., Буянов А.А., Статуя А.А., Елагин И.А. Использование современных компьютерных технологий в электрогидродинамике. // Сборник тезисов Региональной VIII конференции по распространению радиоволн, 2002, стр. 41.
8. 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.
9. 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

10. 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, стр 259-262.
11. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Издательство Лен. Университета, 1989. С. 174.
12. 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.
13. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. // М., 1979г
14. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. - М.: Мир, 1986. - 318 с.
15. A.V. Buyanov, V.L. Dernovsky and Y.K. Stishkov Interelectrode Gap Size Influence on EHD Flow Kinematics, International Symposium on Electric Insulating Materials, , Japon, 2005
16. А.С.Лазарев, Ю.К.Стишков Особенности течений с распределенной объемной нагрузкой Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург
17. И.А.Елагин, Ю.К.Стишков Зона рекомбинации ЭГД-течений в системе провод-провод, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург
18. П.В.Глущенко, Ю.К.Стишков «Моделирование структуры сквозного ЭГД-течения в системе провод-провод», Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург.
19. Elagin I.A., Stishkov Yu.K., "The Investigation of the Recombination Area of Symmetric-Opposite EHD Flows", Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids, Portugal, 2005
20. 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.
21. Elagin I.A., Stishkov Yu.K., "Computer Simulation of Electrohydrodynamic Flow Formation Process using a Finite Element Method," Proceedings of the 5<sup>th</sup> International EHD workshop, France, 2004
22. В.Л.Дерновский, А.А.Статуя, Особенности моделирования нестационарного ЭГД-течения в системе провод-плоскость, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург

23. Ю.К.Стишков, В.Л.Дерновский, Влияние размеров межэлектродного промежутка на кинематику электрогидродинамических, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург
24. Ю.К.Стишков, В.А.Чирков Особенности зонной структуры ЭГД-течений в системе игла над плоскостью, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург
25. А.В.Буянов, А.С.Лазарев Ю.К.Стишков Моделирование структуры электрогидродинамических течений вне симметричной системе электродов, Журнал технической физики, 2005г. №5
26. Ю.К.Стишков, И.А.Елагин, Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод-провод. Журнал технической физики, 2005г. №09
27. A.V.Buyanov, A.S.Lazarev, Yu.K.Stishkov? Simulation of the Electrohydrodynamic Flow Pattern in an Asymmetric System of Electrodes Technical Physics 2005г. №5
28. А.В.Буянов, Ю.К.Стишков, Особенности кинематической и динамической структур сквозного ЭГД течения. Вестник СПбГУ. Сер.4. Вып. 3 (№ 8), 2002
29. А.В.Буянов, Ю.К.Стишков, Особенности структуры сквозного ЭГД течения в симметричной системе электродов Журнал технической физики, 2004, т.74, вып.8, стр. 120 – 123
30. Елагин И.А., НОЦ «Электрофизика» Физический факультет СПбГУ, Магистерская диссертация, 2006..
31. Лазарев А.С., НОЦ «Электрофизика» Физический факультет СПбГУ, Магистерская диссертация, 2006.
32. Глушенко П.В., НОЦ «Электрофизика» Физический факультет СПбГУ, Бакалаврская работа, 2006
33. Дерновский В.Л., НОЦ «Электрофизика» Физический факультет СПбГУ, Бакалаврская работа, 2006.
34. Чирков В.А., НОЦ «Электрофизика» Физический факультет СПбГУ, Бакалаврская работа, 2007.