

01;03

Моделирование структуры электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов

© Ю.К. Стишков, А.В. Буянов, А.С. Лазарев

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

(Поступило в Редакцию 10 августа 2004 г.)

Проведено компьютерное моделирование структурных особенностей электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов (таких, как провал над плоскостью, лезвие над плоскостью). Ее целью является установление соответствия между кинематической структурой течения и распределением движущих сил, носящих электрический кулоновский характер. Кинематическая структура смоделированных течений сравнивается с результатами обработки экспериментальных данных. Обнаружено хорошее соответствие результатов моделирования и данных эксперимента.

Введение

Свойства электрогидродинамических течений были подробно описаны в большом количестве работ [1,2]. Диапазон существования течений ограничен снизу пороговым напряжением. В некоторой области напряжений, лежащей непосредственно за порогом возникновения, течения носят неразвитый характер, т.е. локализованы в окрестности активного электрода. Далее, при повышении прикладываемого напряжения следует режим развитого электрогидродинамического течения, при котором течение занимает весь межэлектродный промежуток. Как в развитом, так и в неразвитом режиме течение обычно имеет ламинарный, параллельно-струйный характер и направлено от проволочного (активного) электрода к плоскому (пассивному). Сравнительный анализ развитых электрогидродинамических течений при различных напряжениях не выявил существенных различий в их структуре. Зависимости средней скорости в центральной струе от напряжения на электродах носят степенной характер $v \sim U^k$ в режиме неразвитого течения $k > 2$, в режиме развитого течения обычно $k = 1$. В работе [1] предложена удобная безразмерная форма представления и анализа зависимостей $V = V(U)$, где в качестве единицы измерения скорости приведена средняя скорость дрейфа ионов $V_0 = bU/l_0$, здесь b — подвижность ионов, l_0 — длина межэлектродного промежутка. В этом случае зависимости средней скорости от напряжения предстанут в виде $Re_{e1} = V/V_0 = f(U)$; величину Re_{e1} обычно называют электрическим числом Рейнольдса. Зависимость $Re_{e1} = f(U)$ имеет пороговый характер, причем порог возникновения течений обычно больше, чем напряжение перехода к сверхомическому участку вольт-амперной характеристики. В режиме неразвитого течения наблюдается очень быстрый рост электрического числа Рейнольдса, в режиме развитого течения электрическое число Рейнольдса постоянно.

В последнее время разработана методика компьютерной обработки результатов экспериментов по наблюдению электрогидродинамических течений [3], позволяющая восстанавливать распределение скоростей и

ускорений в межэлектродном промежутке. После такой обработки становится доступной информация об их кинематической и динамической структуре. Ранее [4,5] отмечалось, что область, занятую электрогидродинамическим течением, можно условно разделить на несколько зон.

1. В непосредственной близости к электроду имеется тонкий прилипший слой неподвижной жидкости. В пределах этого слоя происходит структурирование жидкости.

2. Зона интенсивного ускорения жидкости электрическим полем, расположенная у поверхности активного электрода. Эта зона лежит в пределах 0.1–0.2 длины межэлектродного промежутка и соответствует области концентрации линий уровня скорости около активного электрода. В этой зоне векторы ускорений направлены по течению либо под острым углом к нему.

3. Зона плавно изменяющегося течения. Она называется центральной струей электрогидродинамического течения и соответствует параллельно-струйной его части (линии тока в этой области практически прямые, параллельные друг другу).

4. Зона торможения электрогидродинамического течения, соответствующая области, в которой векторы ускорений направлены противоположно направлению векторов скорости.

5. Непосредственно к поверхности пассивного электрода примыкает неподвижный слой жидкости.

Выявленные особенности электрогидродинамических течений в разных условиях касаются в основном размеров и характера этих зон. Как уже было отмечено выше, среднее электрическое число Рейнольдса при развитом течении обычно лежит в области значений от 10 до 20, т.е. вне неподвижной приэлектродной зоны ионы практически „вморожены“ в жидкость. Поэтому имеются все основания полагать, что заряд, инжектируемый с поверхности проволочного электрода, сносится течением в межэлектродный промежуток и зона заряженной жидкости, скорее всего, имеет вид узкой полосы, простирающейся от проволочного электрода к плоскому.

В зависимости от режима течения и проводимости жидкости распределения заряда в жидкости, конечно, могут изменяться, но для развитого течения эти изменения можно считать незначительными.

Целью настоящей работы является установление соответствия между распределением объемного заряда в жидкости и кинематической структурой течений. Поставленная цель достигается при помощи компьютерного моделирования с использованием известных программных комплексов ANSYS и MatLab. При моделировании электрогидродинамических течений мы сталкиваемся с рядом особенностей. Во-первых, это существенное влияние распределенного электрического заряда на распределение электрического поля, которое в этом случае имеет особенности, практически не изученные на сегодняшний день и представляющие самостоятельный интерес. Во-вторых, электрогидродинамические течения вызываются объемной электрической силой. В классической гидродинамике такие течения также являются сравнительно малоизученными.

При моделировании для удобства сопоставления данных численного и натурального экспериментов размеры модели выбирались так, что они соответствуют размерам кюветы, в которой проводились эксперименты; этим же определялся выбор жидкости — трансформаторное масло. Моделировалось установившееся электрогидродинамическое течение, являющееся наиболее изученным в экспериментальном плане. В этом случае можно считать все электрические и кинематические характеристики течений не зависящими от времени. Алгоритм расчета включал в себя два этапа. На первом этапе задавалось гипотетическое пространственное распределение заряда и рассчитывалось соответствующее распределение электрического поля и действующих кулоновских сил. На втором этапе рассчитывалось поле скоростей электрогидродинамических течений, вызванное рассчитанным распределением кулоновских сил. При задании распределений объемного заряда использовались некоторые полуинтуитивные соображения о возможной структуре течений. Непосредственно у поверхности цилиндрического электрода распределение объемного заряда задавалось в виде соосного с электродом кольца толщиной 0.1 mm. Эта неподвижная приэлектродная зона была зарегистрирована в экспериментах по изучению электрогидродинамических течений. Также в модели учитывался снос заряда из приэлектродной зоны в глубь межэлектродного промежутка. В этом случае для задания распределения объемного заряда использовалась функция вида $\rho_0 \cdot \exp\{\alpha(y)x^2 - y/\beta\}$. Как видно, параметр α определяет ширину заряженной полоски. Около активного электрода ширина полоски выбиралась примерно равной диаметру электрода. Изменяя параметр β , можно регулировать скорость спада плотности объемного заряда вдоль центральной струи электрогидродинамического течения, при этом параметр α вдоль оси течения изменялся таким образом, чтобы соблюдался закон сохранения заряда в струе. Физический смысл

этого требования — отсутствие внутри межэлектродного промежутка источников и стоков заряда. Выбирая различные сочетания параметров α и β , мы можем моделировать различные варианты течений.

Расчет распределения плотности электрических сил

После построения распределения заряда определялось соответствующее ему распределение кулоновских сил ρE . Во всех случаях на плоском электроде задавался нулевой потенциал, на цилиндрическом — 20 kV, на границах кюветы задавалось условие равенства нулю нормальной составляющей электрического поля. Критерием для определения ρ_0 было среднее экспериментальное значение скорости течения в области центральной струи, измеренное при данном значении напряжения. Расчет распределения электрического поля и плотности электрических сил производился при помощи электростатического пакета программного комплекса ANSYS.

Расчет распределения скоростей электрогидродинамических течений

Найденное распределение плотности электрических сил подставлялось в качестве плотности внешних сил в уравнения гидродинамики. В качестве граничных условий задавались нулевые скорости на электродах и стенках кюветы. Геометрия электрической и гидродинамической задач, а также свойства жидкости оставались постоянными и соответствующими условиям эксперимента. Гидродинамическая задача решалась методом конечных элементов при помощи пакета ANSYS. Вычисленные распределения скоростей анализировались и сравнивались с распределениями, полученными в результате обработки экспериментальных данных. Численный эксперимент состоял в изучении влияния различных распределений объемного заряда на кинематические характеристики соответствующих электрогидродинамических течений.

В ряде теоретических работ используется приближение, в котором электрогидродинамическое течение моделируется затопленной струей. При этом распределение действующих сил сосредоточено в окрестности активного электрода. Поэтому на первом этапе мы использовали распределение пространственного заряда, локализованного у поверхности цилиндрического электрода. В этом случае вынос заряда течением пренебрежимо мал, что соответствует случаю малых электрических чисел Рейнольдса. На последующих этапах учитывался снос заряда течением.

Результаты моделирования

На рис. 1 приведены результаты моделирования для ситуации, когда весь объемный заряд находится в приэлектродной зоне, т.е. внутри цилиндрического кольца,

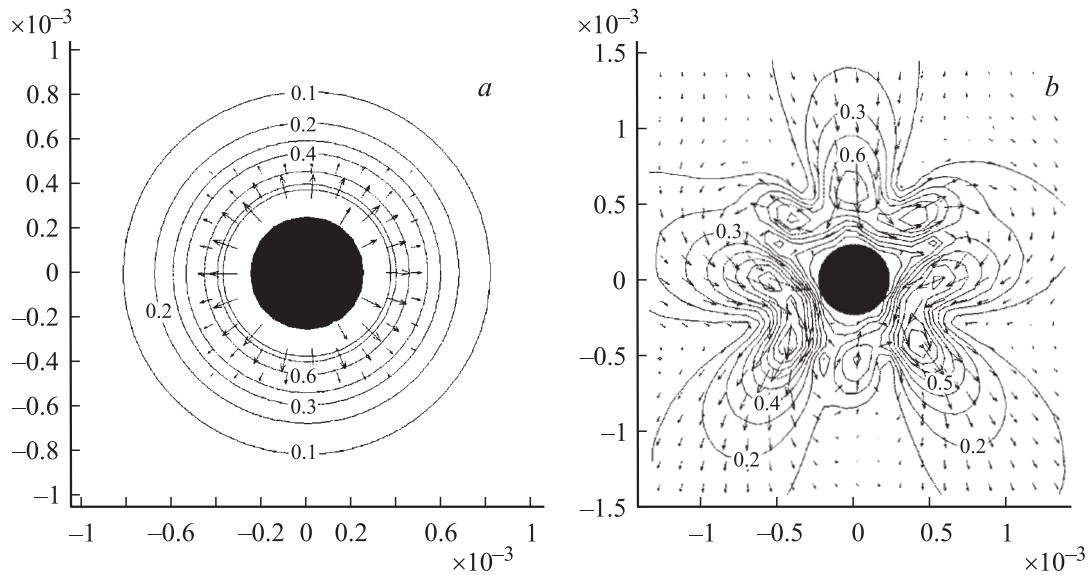


Рис. 1. *a* — карта линий уровня объемного электрического заряда и векторное поле кулоновских сил (показано стрелками), для ситуации, когда весь объемный заряд находится в приэлектродной зоне, *b* — карта линий уровня и векторное поле скорости течения, возникающего при таком распределении заряда.

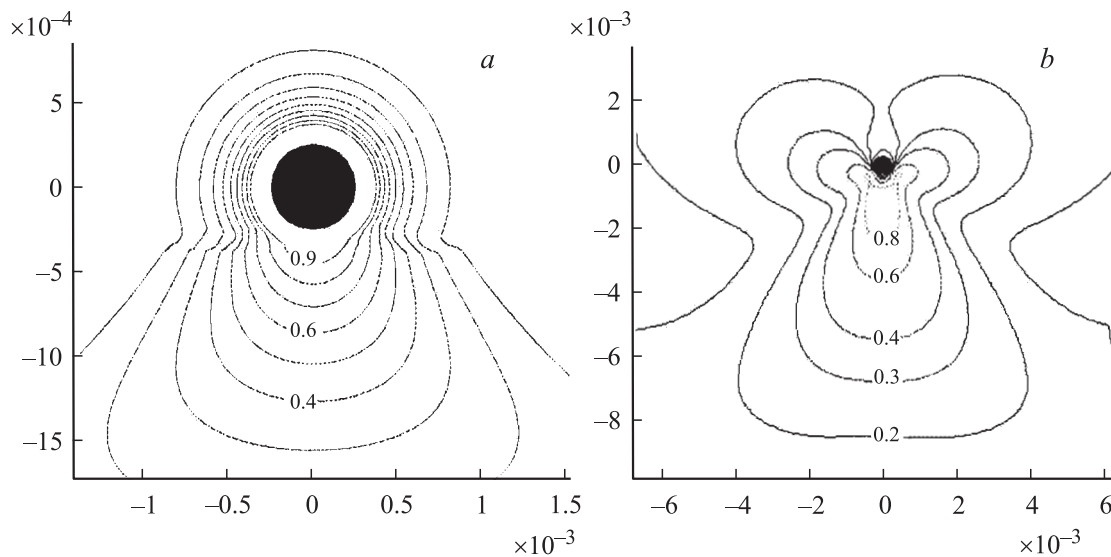


Рис. 2. *a* — распределение плотности объемного заряда в случае малой асимметрии ($\beta = 0.001$), *b* — карта линий уровня скорости течения в случае малой асимметрии ($\beta = 0.001$).

соосного с электродом. На рис. 1, *a* приведены карта линий уровня объемного электрического заряда и векторное поле кулоновских сил (показано стрелками) для данного случая. Сечение электрода соответствует внутренней окружности. Распределение кулоновских сил, так же как и распределение объемного заряда, симметрично относительно оси активного электрода. На рис. 1, *b* приведены карта линий уровня и векторное поле скорости течения, возникающего при таком распределении заряда. Как видно из рис. 1, *b*, возникающие мелкочастистые течения сосредоточены в непосредственной близости от электрода. Они образуют симметричную

структуру, размеры которой намного меньше межэлектродного промежутка. Как видно из карты линий уровня, затухание скорости в вихревых течениях происходит на расстояниях порядка диаметра электрода, а скорость в них очень мала и не превышает 0.1 mm/s (напряжение 20 kV , плотность заряда $3 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^3$). Подобные течения в экспериментах не обнаружены.

При появлении малой асимметрии в распределении заряда кинематическая структура течения существенно изменяется. На рис. 2 приведены распределения плотности объемного заряда (*a*) и карта линий уровня скорости течения (*b*) для случая малой асимметрии

распределения заряда ($\beta = 0.001$). Из распределения заряда видно, что заряд спадает в три раза по направлению к противоэлектроду на расстоянии в 0.1 длины межэлектродного промежутка, т.е. можно считать, что он по-прежнему сосредоточен в приэлектродной зоне, но распределен ассиметрично относительно центра электрода. Однако этого оказывается достаточно, чтобы многочисленные мелкомасштабные вихри в приэлектродной области трансформировались в два выраженных вихря. Течение уже направлено к противоэлектроду, а его скорость возрастает до 2.5 cm/s. Однако оно проникает в глубь межэлектродного промежутка на расстояние не более $0.3l_0$. В остальной части межэлектродного промежутка скорость течения незначительна. Зона ускорения жидкости равна диаметру электрода, далее следует зона торможения. Этот режим имеет все характерные особенности неразвитого электрогидродинамического течения [1] и характеризуется малыми значениями среднего электрического числа Рейнольдса. При анализе распределений напряженности электрического поля, соответствующих приведенной ситуации, видно, что пространственный заряд вне пределов малой приэлектродной зоны практически не оказывает влияния на распределение электрического поля. Электрические силы действуют на малом промежутке, равном размерам электрода. Таким образом, в этом режиме электрогидродинамическое течение подобно затопленной струе.

При увеличении параметра β асимметрия быстро возрастает, течение охватывает все большую часть межэлектродного промежутка. При значениях $\beta > 0.003$ в распределении электрических сил появляется область их однородной локализации, а кинематическая структура течения приобретает характерные черты развитого течения. На рис. 3 приведены результаты расчета для случая $\beta = 0.005$: заряд спадает в десять раз на расстоянии в 2.5 cm, т.е. равном длине межэлектродного промежутка. Протяженность зоны ускорения составляет $\sim 0.2l_0$ и практически не меняется при изменении приложенного напряжения. Имеется обширная зона равномерного движения, в которой векторы скорости направлены вдоль оси, проходящей через центр активного электрода и перпендикулярной плоскому, а величина скорости изменяется слабо. Эта зона занимает большую часть межэлектродного промежутка. Зона эффективного торможения начинается на уровне $0.6l_0$. Все отмеченные выше особенности близко соответствуют ранее опубликованным данным о кинематической структуре развитых электрогидродинамических течений [4].

Как известно, при малых значениях числа Рейнольдса реализуется так называемое ползущее обтекание цилиндра. В этом случае линии тока жидкости симметричны относительно оси цилиндра. Конфигурация линий тока электрогидродинамического течения вблизи активного электрода сходна с ползущим течением: линии тока соответствуют окружностям с центром на оси электрода. Однако нарушается симметрия относительно плоскости, проходящей через ось активного электрода и параллельной плоскому электроду. Это вызвано активным

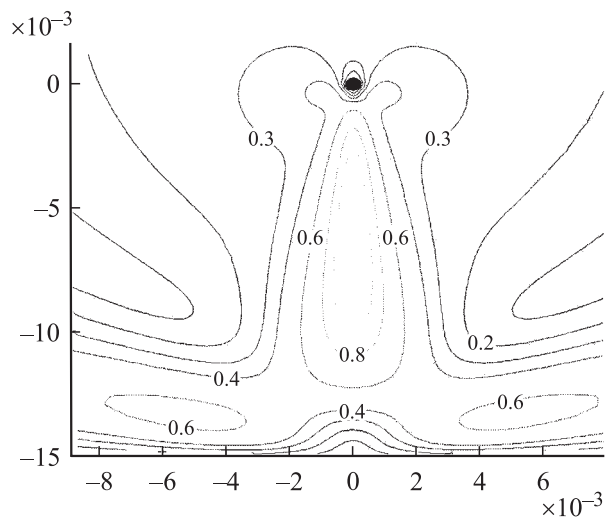


Рис. 3. Карта линий уровня скорости развитого электрогидродинамического течения ($\beta = 0.005$).

ускорением жидкости за электродом по направлению к плоскому электроду под действием объемных электрических сил. Струя жидкости сужается, на линиях уровня скорости хорошо заметен выступ нулевой скорости в направлении течения жидкости. За электродом наблюдается область пониженного давления. При дальнейшем уменьшении скорости спадания заряда структура течения в общем не изменяется, однако в области центральной струи течение приобретает черты, отличные от экспериментально обнаруженных. Здесь скорость течения уже не остается постоянной, а медленно возрастает. Область максимальной скорости смещается ближе к плоскому электроду. При значении $\beta > 0.01$ заряженная струйка представляет узкую полосу почти постоянной ширины, плотность заряда вдоль струи изменяется не более чем на 30% на протяжении межэлектродного промежутка.

В режиме развитого течения (в отличие от неразвитого) область локализации действующих сил занимает существенную часть межэлектродного промежутка. Поэтому структура течения приобретает новые свойства, отличные от режима затопленной струи, а именно протяженную область ускорения и промежуточную область слабоизменяющегося течения. Эти различия отчетливо прослеживаются на распределениях ускорения, представленных на рис. 4. Следует отметить также, что в этом режиме, как показывают расчеты, пространственный заряд оказывает существенное влияние на распределение электрического поля в жидкости.

На рис. 4 приведены линейные распределения ускорения вдоль линии, проходящей через центр цилиндрического электрода и перпендикулярной плоскому, для различных скоростей спадания заряда: $\beta = 0.001$, 0.003, 0.005, 0.01. Видно, что режиму неразвитого течения соответствует вариант $\beta = 0.001$: протяженность зоны ускорения составляет $\sim 0.1l_0$, далее следует протяженная зона торможения жидкости (ускорение отрицатель-

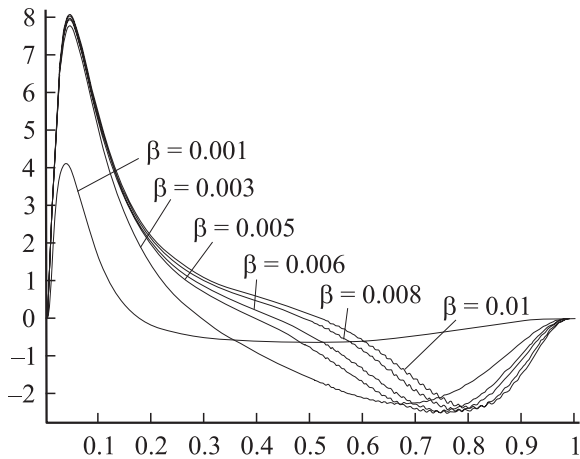


Рис. 4. Распределения ускорения вдоль линии, проходящей через центр цилиндрического электрода и перпендикулярной плоскому для различных значений β .

но). Для β , лежащего в диапазоне от 0.005 до 0.01, зона структура течения практически не меняется. Имеется зона ускорения с максимумом ускорения, лежащим на уровне $0.05l_0$. В зоне равномерного движения скорость направлена вдоль оси течения и изменяется слабо, а ускорения в этой зоне малы. Зона эффективного торможения зависит от скорости спадания заряда и начинается на уровне $0.4-0.6l_0$ и имеет максимум на уровне $0.8l_0$. По мере увеличения β увеличивается размер зоны равномерного движения жидкости.

Как показали расчеты, пространственные распределения объемного заряда, характерные для режимов развитого электрогидродинамического течения, могут существенно изменить распределения электрического поля, рассчитанные без учета объемного заряда. Распределения кулоновских сил, вызывающих электрогидро-

динамические течения, имеют сложный характер, неоднородный как по величине, так и по направлению. В отличие от ускорения в распределении действующих кулоновских сил максимума не наблюдается. Для лучшего анализа ситуации был проведен численный эксперимент, в котором задавалось однородное распределение движущих сил, направленных вдоль центральной оси течения и локализованных в области, представляющей собой полосу, размеры которой приблизительно равны размерам области локализации объемного заряда при развитом электрогидродинамическом течении. Возникающее при этом течение имеет структуру, похожую на случай малого спадания заряда вдоль центральной струи: протяженная зона ускорения, промежуточная область однородного течения практически отсутствуют, зона ускорения сменяется зоной торможения. Максимум скорости соответствует длине полосы приложения сил, за ним непосредственно следует зона торможения жидкости.

Таким образом, в результате численного эксперимента установлена взаимосвязь зонной структуры электрогидродинамических течений с распределением объемного заряда в центральной струе течения.

В результате проведенного моделирования у авторов имеется полная информация о кинематических и электрических характеристиках электрогидродинамического течения: распределения напряженности поля E , плотности заряда ρ , а также скорости течений. Следовательно, можно определить распределения локального электрического числа Рейнольдса $Re_{e1} = V/bE$ и плотности конвективного тока $J_k = \rho V$ в объеме жидкости. На рис. 5, *a* приведены абсолютные значения электрического числа Рейнольдса. Значения плотности тока (рис. 5, *b*) нормированы относительно максимального значения ($j_{\max} = 0.7 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$). Распределение электрического числа Рейнольдса имеет каплеобразный вид с максимумом в центральной струе.

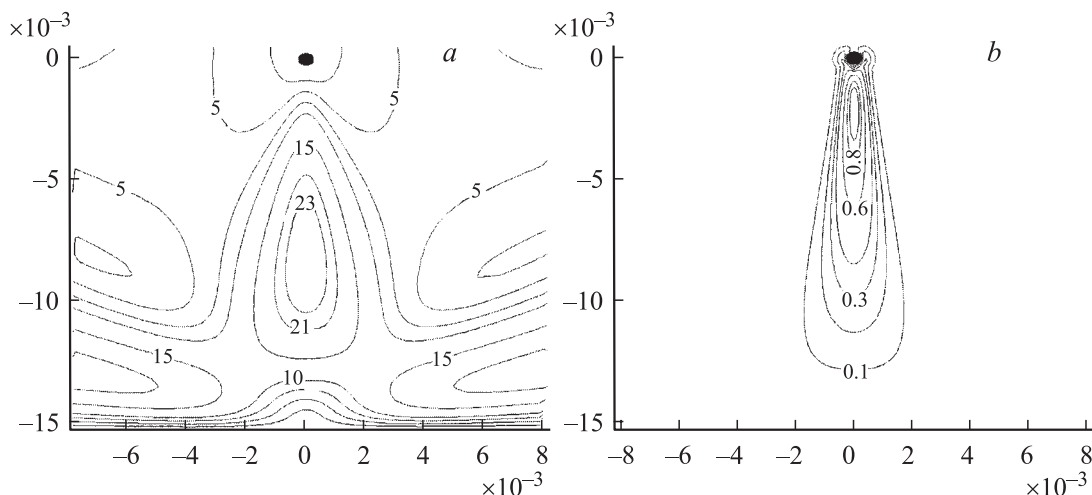


Рис. 5. *a* — карта линий уровня электрического числа Рейнольдса при развитом электрогидродинамическом течении, *b* — карта линий уровня плотности конвективного тока при развитом электрогидродинамическом течении.

вид с максимумом в центральной струе. Конвективный ток имеет вид узкой полосы в зоне центральной струи течения. Видно, что у обоих электродов имеются зоны малых Re_{e1} и J_k . В этих зонах ионная транспортировка носит преимущественно миграционный характер.

Во многих работах [6,7] механизм проводимости на нелинейном участке вольт-амперной характеристики связывают с появлением конвективного механизма проводимости. Этого же мнения придерживаются и авторы. Плотность общего тока равна сумме плотностей тока проводимости и тока конвекции $j \cong \rho(V + bE)$. Как видно из рис. 5, *b*, в центральной струе течения плотность тока конвекции значительно выше плотности тока проводимости. Однако в неподвижных приэлектродных областях электрическое число Рейнольдса малое и в этих областях роль тока проводимости уже существенна. Полное сопротивление системы электроды–жидкость является суммой сопротивлений всех зон, включая сопротивление межфазных переходов электрод–жидкость. Наибольшее влияние оказывает участок, обладающий наиболее высоким сопротивлением, а это не обязательно зона центральной струи электрогидродинамического течения. В исследованиях, посвященных влиянию границы раздела электрод–жидкость на характер вольт-амперной характеристики, показано, что таким участком может являться контакт металл–жидкость [8]. 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 вольт-амперной характеристики.

Заключение

Авторами проведено компьютерное моделирование кинематической структуры электрогидродинамических течений при различных распределениях объемного заряда в жидкости и были получены следующие результаты.

1. Симметричные распределения объемного заряда в виде кольцевой структуры окружающего электрод при отсутствии сноса заряда в объем жидкости приводят к местным, много ячеистым течениям, не проникающим далеко в объем жидкости. Такие течения в экспериментах не обнаружены.

2. Слабоасимметричные распределения заряда, локализованные в окрестности цилиндрического электрода, приводят к двухъячеистым течениям, направленным к плоскому электроду. Структура этих течений соответствует обнаруженному в экспериментах и описанному ранее режиму неразвитого электрогидродинамического течения. В этом режиме влияние пространственного заряда несущественно, а структура электрогидродинамического течения похожа на структуру затопленной струи.

3. При эффективном сносе заряда из приэлектродной области в объем жидкости глубина проникновения течения увеличивается и реализуется режим развитого электрогидродинамического течения. Пространственный

заряд в этом режиме существенно влияет на распределение электрического поля в жидкости. Распределение плотности электрических сил, а также плотности конвективного тока в таком течении имеет вид тонкой струйки, локализованной вдоль оси течения. В таком режиме реализуется характерная зонная структура развитого электрогидродинамического течения, описанная ранее на основе анализа экспериментальных данных.

4. В непосредственной близости к цилиндрическому электроду, несмотря на высокую плотность действующих электрических сил, имеется область очень малых скоростей и пониженного давления. В этой области электрогидродинамическое течение мало отличается от ползучего течения и не имеет отрыва. При таком обтекании электрода обеспечивается снос заряда из приэлектродной области в виде тонкой струйки внутрь межэлектродного промежутка.

5. Рассчитанное распределение электрического числа Рейнольдса и конвективного тока показало, что в режиме развитого электрогидродинамического течения в приэлектродных областях транспортировка заряда имеет преимущественно миграционный характер, а в центральной струе — конвективный. При анализе механизма, определяющего ход вольт-амперной характеристики, необходимо учитывать все стадии межэлектродных процессов, включая контактный.

Список литературы

- [1] *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* // Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989. С. 174.
- [2] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // ЭОМ. 2000. № 1. С. 14–21.
- [3] *Буянов А.В., Павлейно М.А., Стишков Ю.К.* // Сб. докл. VI Междунар. научн. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. СПб., 2000. С. 4–9.
- [4] *Буянов А.В., Павлейно М.А., Стишков Ю.К.* // Вестник СПбГУ. 2001. Сер. 4. Вып. 2 (№ 12).
- [5] *Буянов А.В., Стишков Ю.К.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 34–39.
- [6] *Atten P., Haidara I.* // IEEE Trans. on Electrical Insulation. 1985. Vol. EI-20. N 2. P. 187–198.
- [7] *Atten P., Haidara I.* // IEEE Trans on Industry Applications. 1985. Vol. LA-21. N 4. P. 709–714.
- [8] *Стишков Ю.К.* // ДАН СССР. 1986. Т. 288. № 4. С. 861–865.