

01;03

## Особенности кинематической структуры электрогидродинамического течения в системах электродов „провод—провод“ и „провод—плоскость“

© А.В. Буянов, Ю.К. Стишков

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

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2002 г.)

При помощи специального пакета программ обработаны результаты экспериментов по визуализации двумерных электрогидродинамических течений в геометрически симметричных (провод—провод) и несимметричных (провод—плоскость) системах электродов и получены распределения скоростей и ускорений для таких течений. Путем сравнения полученных результатов для систем электродов определено влияние пассивного электрода на кинематическую и динамическую структуру электрогидродинамических течений. Выделена и исследована зона рекомбинации.

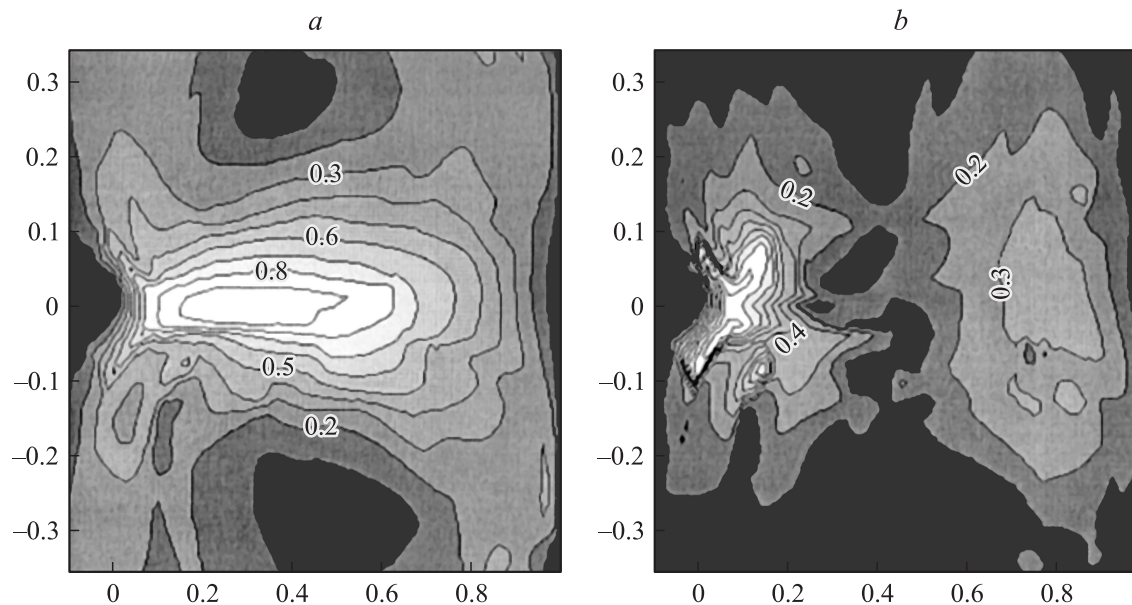
### Введение

Распределения электрических характеристик (напряженности поля, потенциала) в системе электродов, состоящей из двух параллельных проводов, в электростатическом приближении (при отсутствии объемного заряда в жидкости) можно легко получить с помощью зеркального отображения, зная аналогичные распределения в системе электродов „провод над плоскостью“. Подобный прием широко используется в электростатике. В случае малого влияния объемного заряда на распределение электрического поля электрогидродинамические течения в системе из двух параллельных проводов должны реализоваться в виде двух встречных потоков, одинаковой интенсивности, причем структура каждого из потоков должна быть близка к структуре электрогидродинамического течения в системе электродов „провод над плоскостью“. Действительное распределение электрических характеристик при наличии объемного заряда отличается от вычисленного в электростатическом приближении. Однако в случае равных условий зарядообразования на электродах можно ожидать, что структура встречных потоков будет близка к структуре электрогидродинамического течения в системе „провод над плоскостью“, за исключением области встречи противоположно текущих струй. Этой области уделено особое внимание.

Подробный анализ кинематической и динамической структуры электрогидродинамических течений в геометрически несимметричной системе электродов (типа провод—плоскость, лезвие—плоскость) проведен в работах [1–3]. Течение в такой системе направлено от провода (лезвия) к плоскому электроду. Этот электрод часто называют активным, а плоский электрод — пассивным. Выделяется несколько основных зон электрогидродинамического течения [3]: 1) неподвижные „прилипшие“ слои, непосредственно у каждого из электродов, в пределах которых происходит инжекция электрического

заряда в жидкость; 2) зона интенсивного ускорения жидкости электрическим полем, в которой происходит преобразование электрической энергии в кинетическую; 3) ближе к плоскому электроду находится зона торможения, в пределах которой происходит резкое уменьшение модуля скорости течения, а также изменение направления течения и раздвоение центральной струи; 4) между зонами ускорения и торможения располагается промежуточная зона, в которой изменения скорости незначительны. При изменении условий (напряжение на электродах, материал и геометрия активного электрода, низковольтная проводимость жидкости) общая структура электрогидродинамических течений сохраняется, изменяются только форма и размеры отдельных зон.

В системе электродов, состоящей из двух параллельных проводов, площади соприкосновения разноименных электродов с жидкостью и рассчитанное в электростатическом приближении распределение электрического поля у каждого из электродов одинаковы. Когда скорость приэлектродных реакций у обоих электродов одинакова, то электрогидродинамические течения реализуются в виде двух потоков, симметричных относительно плоскости, проходящей через центр межэлектродного промежутка и параллельной электродам. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то скорость приэлектродных реакций определяется в основном примесными ионами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными свойствами. Скорость ионообразования на катоде можно регулировать в широких пределах путем изменения концентрации примеси. Следует отметить, что условия образования заряда на электродах зависят не только от концентрации примеси, но и от прочих условий, например от разности потенциалов. Поэтому полной симметрии встречных течений достичь достаточно трудно, она нарушается как при изменении напряжения, так и концентрации примеси. Устойчивые встречные течения реализуются, как правило, от электродов малого диаметра.



**Рис. 1.** Карты линий уровня скорости (*a*) и сил (*b*) электрогидродинамического течения в системе электродов „провод над плоскостью“.

Целью нашего исследования является сравнительный анализ структуры электрогидродинамических течений в системе электродов „провод над плоскостью“ и „провод–провод“. Он интересен тем, что при встречных течениях в плоскости симметрии, отсутствует электрод и, следовательно, в отличие от течения в системе „провод–плоскость“ отсутствует инжекция заряда и реализуется исключительно рекомбинация противоположных, приносимых встречными потоками от анода и катода. Это дает возможность выделить и детально исследовать зону активной рекомбинации, оставшейся недостаточно изученной при анализе электрогидродинамических течений в системе „провод–плоскость“ по причине недостаточно четкой ее локализации. Также появляется возможность оценить влияние плоского электрода на структуру течения в несимметричной системе электродов.

## Описание эксперимента

Для регистрации электрогидродинамических течений использовалась установка, аналогичная описанной в [4]. Отличие заключается в том, что течения не фотографировались, а снимались на видеопленку. Это позволяет получить более полную информацию о поле скоростей течений, а также уменьшить погрешность определения значений локальных скоростей и ускорения. Визуализация проводилась при помощи мелких ( $10\text{--}20 \cdot 10^6 \text{ м}$ ) газовых пузырьков, вводимых в жидкость при помощи специального капилляра. Установка создания пузырьков позволяла добиваться ввода одиночных пузырьков необходимых размеров. Объемная доля пузырьков в экспериментах составляла около 0.001%. При таких концентрациях изменение основных свойств жидкости

(электропроводность, вязкость, диэлектрическую проницаемость) несущественно. В работах [5,6] подробно описаны программы для обработки стационарных двумерных электрогидродинамических течений. Обработка проводится для отдельных траекторий движения пузырьков, которые с точностью не менее 2–3% соответствуют линиям тока жидкости. Соответствие траекторий уравнениям линий тока проверяется в программе для каждой обрабатываемой траектории. В качестве конечных результатов обработки получены векторные поля скоростей и ускорений электрогидродинамического течения, поверхностные графики модуля скорости и ускорения, карты линий уровня скорости и ускорения. Эксперименты проводились в трансформаторном масле ТМ-40. Для изменения условий ионизации у катода применялся бутиловый спирт. Он содержит группу ОН, которая обладает повышенным сродством к электрону. Изменяя концентрацию бутанола, можно достаточно легко управлять интенсивностью потока от катода.

## Течения в системе электродов провод–плоскость

Как уже отмечалось выше, структура электрогидродинамических течений в такой системе электродов подробно описана в [1–3]. Здесь мы кратко опишем характерные черты течений в системе электродов „провод–плоскость“. На рис. 1 представлены карты линий уровня скорости (*a*) и ускорений (*b*) для электрогидродинамического течения в следующих условиях: диаметр активного электрода  $d = 0.5 \text{ мм}$ , низковольтная проводимость  $\sigma = 10^{-11} \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , межэлектродное

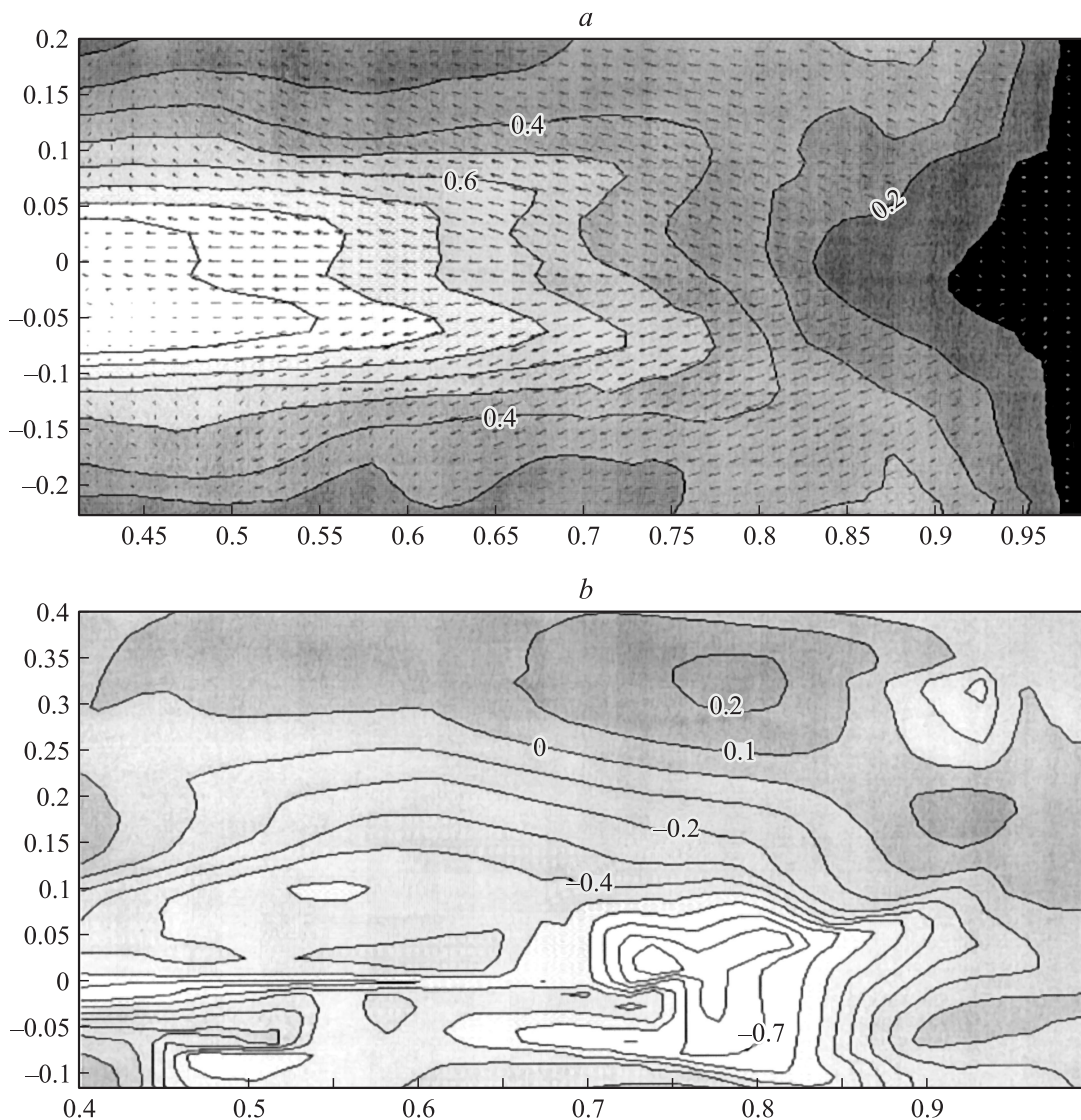


Рис. 2. Карты линий уровня скорости (а) и проекции сил на направление скорости (b) в зоне торможения.

расстояние  $L = 15 \text{ mm}$ , напряжение между электродами  $U = 6 \text{ kV}$ .

В результате электрохимических реакций около активного электрода образуются ионы одного с ним знака. Эти ионы двигаются в пределах прилипшего слоя относительно неподвижной жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую сольватную оболочку. В зоне ускорения под действием электрического поля ион разгоняется вместе со своим молекулярным окружением. Это ускорение довольно значительное: в зависимости от приложенного напряжения оно составляет от 1 до  $10 \text{ m/s}^2$ . При этом увлекаются соседние слои жидкости. Образуется воронкообразная область возле активного электрода, которая отчетливо видна на рис. 1, а. На рис. 1, b видно, что зона ускорения занимает довольно компактную область. Внутри этой зоны происходит интенсивное преобразование энергии электрического поля в кинетическую энергию движения жидкости.

Для электрогидродинамического течения уравнение Навье–Стокса с учетом кулоновских сил имеет вид

$$\gamma \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) V \right] = -\nabla P + \eta \Delta V + \rho E,$$

где  $\gamma$  — это плотность жидкости,  $V$  — скорость жидкости,  $P$  — давление,  $\eta$  — вязкость,  $\rho$  — плотность объемного заряда,  $E$  — напряженность электрического поля.

В уравнении отражено, что наряду с электрическими силами в жидкости действуют также силы внутреннего давления и силы вязкости. В переходной области вязкие силы уравнивают электрические силы, а силы внутреннего давления еще малы. По этой причине здесь незначительны изменения скорости (ускорения или замедления). Переходная зона отчетливо видна на рис. 1, b в виде провала между двумя максимумами ускорений. В переходной зоне достигается максимальная скорость течения.

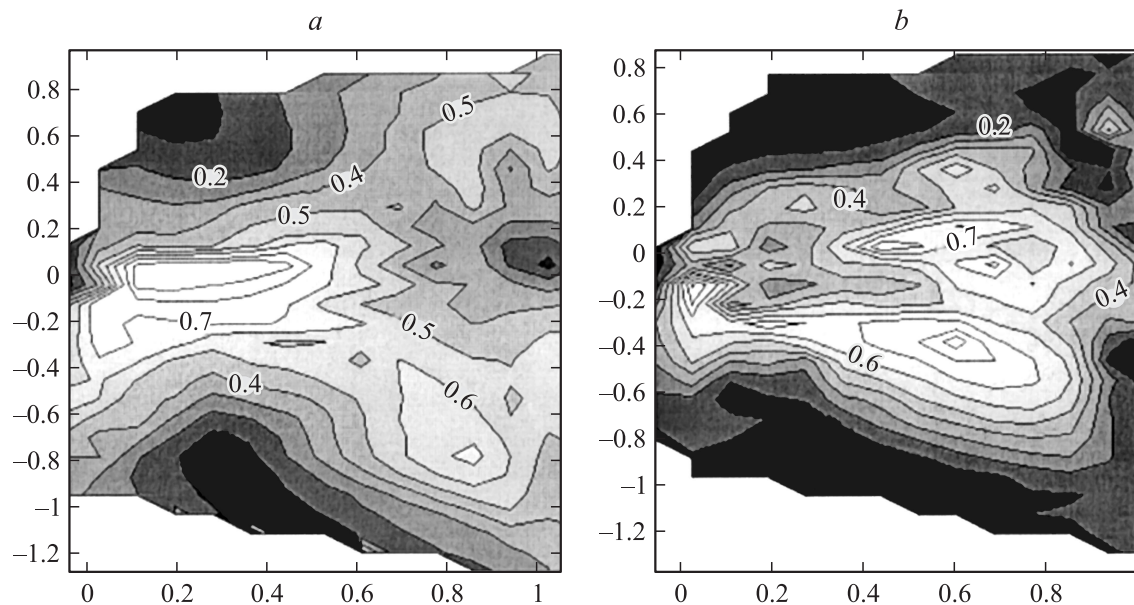


Рис. 3. Карты линий уровня скорости (а) и сил (б) электрогидродинамического течения в системе двух параллельных проводов.

Наиболее сложную и интересную структуру имеет зона торможения. На рис. 2, а представлены карты линий уровня скорости с наложенным на него векторным полем ускорений, на рис. 2, б — карты линий уровня проекции ускорений на направление скорости. Эти два рисунка сделаны для тех же условий, но с большим увеличением. Из них следует, что структура зоны торможения достаточно сложна. Начинается она на уровне  $0.4-0.5L$  (иногда  $0.3L$ ), заканчивается непосредственно около плоского электрода и имеет форму треугольника, одна из вершин которого направлена на активный электрод (рис. 1, б). Торможение жидкости вызвано взаимными силами и силами внутреннего давления. Максимум тормозящих сил наблюдается на расстоянии  $0.75-0.8L$ . Естественно предположить, что в этом месте внутреннее давление достигает своего наибольшего значения. Это предположение подтверждает векторное поле ускорений. Действительно, на рис. 2, а видно, что жидкость ускоряется по направлению из застойной области. Струя течения раздваивается. На рис. 2, б хорошо видно, что жидкость имеет положительное ускорение вдоль направления течения в боковых струях. Присутствие в струе жидкости объемного заряда еще более усложняет картину. Заряд с активного электрода накапливается в неподвижной области около плоского электрода. По этой причине величина электрического поля у границы раздела металл–жидкость возрастает. Это подтверждается экспериментами по измерению распределения поля в межэлектродном промежутке [4,6]. Повышение напряженности электрического поля вызывает повышение уровня инжекции заряда одноименного с электродом (в нашем случае положительного) с поверхности плоского электрода и инициирует процесс перезарядки жидкости.

Жидкость, заряженная одноименно с плоским электродом, под действием сил давления и электрического

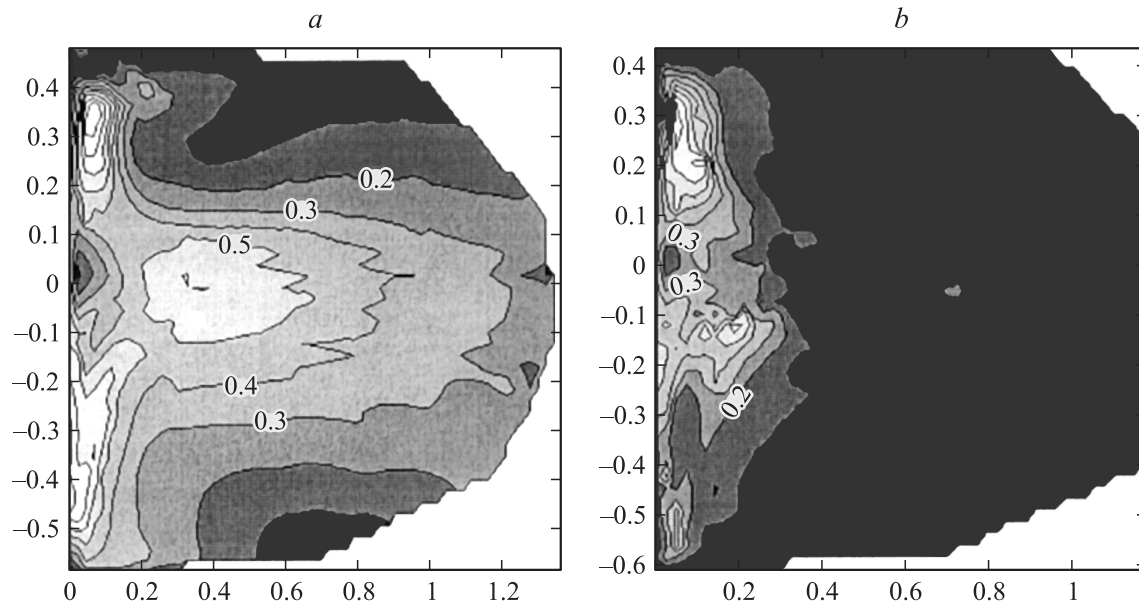
поля движется в боковых струях. Следует отметить, что объемный электрический заряд искажает электрическое поле, создаваемое электродами. Между зарядом центральной струи электрогидродинамического течения и зарядом боковых струй возникает электрическое поле, направленное перпендикулярно внешнему, а иногда и против него. Это поле сильно усложняет структуру течения в зоне торможения. По-видимому, благодаря этому, зона торможения имеет большие поперечные размеры  $0.5-0.7L$  (по уровню скорости  $0.1$ ), в то время как зона ускорения на этом же уровне имеет поперечные размеры  $0.3-0.5L$ . Прямым доказательством процесса перезарядки жидкости у поверхности плоского электрода является вторичное ускорение жидкости в возвратных струях течения, что хорошо видно из рис. 2, б.

### Сравнение течений в симметричной и несимметричной системах

На рис. 3 представлены карты линий уровня скорости и ускорений в системе электродов „провод–провод“ при следующих условиях:  $d = 0.07 \text{ mm}$ ,  $\sigma = 10^{-11} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $U = 10 \text{ kV}$ . Для удобства сравнения рисунки обрезаны до места встречи со вторым потоком от противозэлектрода. В этом месте существует область (ее размеры очень малы, около  $0.04L$ ), где течение имеет почти нулевую скорость. Она хорошо видна на рис. 3, а и находится для данного конкретного случая примерно на расстоянии  $0.65L$  от анода. В случае полной симметрии условий зарядообразования на электродах ее местоположение соответствует середине межэлектродного промежутка.

Течения в системах электродов „провод–плоскость“ и „провод–провод“ имеют ряд сходных черт. Четко видна





**Рис. 4.** „Боковые струи“ электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов: скорость (а) и проекция сил на направление скорости (b).

центральная струя течения, выделяются зоны ускорения, равномерного движения, торможения. Наиболее похожи зоны ускорения, которые имеют не только сходную структуру, но и равные относительные размеры. В обоих случаях у активного электрода образуется воронкообразная область. Хорошо видно, что жидкость начинает ускоряться еще до нижней кромки активного электрода, откуда предположительно идет наиболее сильная инжекция. Протяженность зоны ускорения в симметричной системе  $(0.28 \pm 0.03)L$ , в несимметричной системе —  $(0.30 \pm 0.03)L$ . Наиболее существенное отличие заключается в том, что в симметричной системе раздвоение максимума ускорений проявляется гораздо сильнее, чем в несимметричной. На основе всего вышесказанного можно сделать вывод, что в зоне ускорения в обеих системах электродов происходят аналогичные процессы образования заряда вследствие электрохимических реакций, формирования молекулярного окружения вокруг этих зарядов и разгона жидкости под действием электрического поля.

Электрогидродинамическое течение в системе двух параллельных проводов имеет очень короткую зону равномерного движения. Почти сразу зона ускорения переходит в зону торможения, структура и поперечные размеры которой коренным образом отличаются от течения в системе „провод–плоскость“. Это связано с тем, что в симметричном случае отсутствует противоэлектрод. Как уже говорилось выше, в системе электродов „провод–плоскость“ струя жидкости перезаряжается у поверхности противоэлектрода и приобретает составляющую скорости по направлению от него. Жидкость испытывает небольшое ускорение в боковых струях (рис. 2, b). В системе электродов „провод–провод“ нет противоэлектрода, поэтому жидкость не может переза-

рядиться. В данном случае встречаются две противоположно заряженные струи, которые дальше движутся параллельно, не перемешиваясь, перпендикулярно воображаемой прямой, соединяющей оси электродов. Между струями возникает поле, порожденное объемным зарядом самих струй и перпендикулярное направлению течения. Противоионы могут сблизиться только за счет дрейфа (миграции) в поперечном поле. Этот процесс медленный, так как скорость течения много больше скорости ионного дрейфа. Для рекомбинации им нужно сблизиться на расстояние, равное радиусу Дебая  $R_d$ . Численное значение  $R_d$  для условий эксперимента можно оценить по формуле

$$R_d = \sqrt{\frac{kT}{e} \frac{b_i \epsilon_0 \epsilon}{\sigma}},$$

где  $kT/e = 0.25$  мВ,  $b_i \sim 10^{-8}$  м/с,  $\epsilon_0 = 8.8 \cdot 10^{-12}$ ,  $\epsilon = 2$ ,  $\sigma \sim 10^{-11} \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , откуда получаем значение  $R_d$ , равное  $3 \cdot 10^{-5}$  м.

Противоположно заряженные боковые струи притягиваются и, пока большая часть зарядов не прорекомбинирует, следуют параллельно друг другу. Вследствие этой причины размер боковых усов обычно существенно превышает размер межэлектродного промежутка.

Для более подробного изучения распределения скорости течения в боковых струях, они были обработаны отдельно с большим разрешением. Результаты представлены на рис. 4. Начало координат на нем совпадает с центром „застойной“ области. Электроды находятся в левых верхнем и нижнем углах рисунка. В левой части рисунка видны обе центральные струи встречного течения. Из рис. 4, b видно, что в боковых струях присутствуют, хотя и слабые, но ускоряющие силы, разгоняющие жидкость

вдоль направления течения. Эти силы обусловлены, по-видимому, повышенным давлением в „застойной“ области. После небольшого разгона скорость жидкости медленно падает на расстоянии  $3-5L$ . В этой области изменение скорости жидкости незначительно (рис. 4, *b*). Боковые струи имеют довольно большие поперечные размеры (размеры в направлении, перпендикулярном направлению скорости)  $0.4L$  для уровня скорости  $0.4$ ,  $0.6L$  на уровне скорости  $0.2$ .

Таким образом, из изложенного выше видно, что плоский электрод и процессы, происходящие в его окрестности, очень сильно влияют на структуру течений в несимметричной системе электродов. Этот вывод, как правило, игнорируется в большинстве теоретических работ по моделированию электрогидродинамических течений, в которых основное внимание уделяется процессам у активного электрода.

## Заключение

Из сравнительного анализа кинематической и динамической структуры электрогидродинамических течений в системах „провод–провод“ и „провод–плоскость“ было выявлено, что плоский электрод (в системе „провод–плоскость“) также инжектирует заряд. Это оказывает влияние на структуру возвратных потоков. Структура зоны торможения в системе электродов „провод–провод“ отличается от структуры аналогичной зоны в системе „провод–плоскость“. В этом случае жидкость не перезаряжается, а реализуется рекомбинация зарядов, приносимых течением с катода и анода. Зонами рекомбинации являются боковые струи, которые имеют биполярную структуру, а их длина определяется скоростью процесса рекомбинации.

## Список литературы

- [1] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А., Буянов А.В.* // Сб. докл. VI Междунар. науч. конф. „Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей“. Санкт-Петербург, 2000. С. 87–92.
- [2] *Stishkov Y.K., Pavleyno M.A.* // Annual 2 International Workshop „Electrical Conduction, Convection and Breakdown in Fluids“ Grenoble (France), 2000. P. 186–189.
- [3] *Буянов А.В., Павлейно М.А., Стишков Ю.К.* // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2001. Вып. 2 (12). С. 109–114.
- [4] *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989 г.
- [5] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // ЭОМ. 2000. № 1.
- [6] *Рычков Ю.М., Стишков Ю.К.* // Коллоид. журн. 1978. Т. 40. № 6. С. 1204–1206.