

03;12

## Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов

© 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 25 ноября 2003 г.)

Проанализированы экспериментально полученные распределения скоростей и ускорения сквозного электрогидродинамического течения. На основе анализа основных особенностей кинематической и динамической структур делаются выводы о распределении объемного заряда и процессах, происходящих в зоне рекомбинации, которая оказывается вынесенной за пределы межэлектродного промежутка.

### Введение

В работах [1,2] описана зонная структура электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов (провод–плоскость, лезвие–плоскость) и приведен сравнительный анализ таких течений с встречными течениями в симметричных системах электродов (провод–провод). Отличительной особенностью течений в симметричных системах электродов являются длинные боковые струи, в которых происходит рекомбинация заряда [3]. Известно [4], что в симметричных системах электродов структура электрогидродинамических течений определяется соотношением скоростей ионобразования на катоде и аноде. Если эти скорости равны, то течение реализуется в виде двух потоков равной интенсивности. Жидкость в боковых струях движется перпендикулярно прямой, соединяющей центры электродов. Если же скорости образования заряда не равны, то происходит искажение структуры течения: поток от „активного“ электрода, на котором скорость зарядообразования выше, преобладает над встречным потоком, при этом плоскость раздела встречных потоков смещается к „пассивному“ электроду (где скорость зарядообразования ниже). Сквозное течение есть предельный случай встречного течения, когда поток от активного электрода намного интенсивнее потока от пассивного. Угол наклона боковых струй к первоначальному направлению течения падает до очень малой величины, а сами струи выходят далеко за пределы межэлектродного промежутка [1]. По этой причине сквозное электрогидродинамическое течение наиболее перспективно для практического применения.

В данной работе рассматривается кинематическая и динамическая структуры сквозного электрогидродинамического течения. Течения визуализировались с помощью мелких (несколько десятков микрометров) воздушных пузырьков и снимались на видеопленку. Полученные изображения обрабатывались пакетом программ, описанных в работах [2,5]. В качестве конечных результатов они позволяют получить векторные поля скоростей и ускорений электрогидродинамического течения, поверхностные графики и карты линий уровня скорости и ускорения.

### Кинематическая структура сквозного электрогидродинамического течения

На рис. 1 приведен график линий уровня скорости сквозного электрогидродинамического течения. За единицу длины взято межэлектродное расстояние. Карты линий уровня нормированы на величину максимальной скорости. Струя, идущая от активного электрода (катода), обозначена стрелкой 1, а струи, выходящие за пассивный электрод (анод), — стрелкой 2. Центры электродов расположены в точках с координатами 0,0 (катод) и 0,1 (анод). Из этого рисунка видно, что скоростная структура сквозного электрогидродинамического течения существенно отличается от структуры течения в системе электродов провод над плоскостью [2]. Эти различия, как и для встречных течений, в основном касаются зон торможения жидкости. У сквозного течения зона торможения вынесена за пределы межэлектродного промежутка: в области за пассивным электродом на расстоянии  $L$  скорость жидкости уменьшается в 2 раза ( $L$  — расстояние между электродами). В этой области электрическое поле направлено противоположно направлению движения жидкости. Однако тормозящий эффект весьма мал. Эта особенность сквозного электрогидродинамического течения делает его особенно перспективным для практического использования. Однако эти перспективы требуют детального исследования структуры сквозного течения.

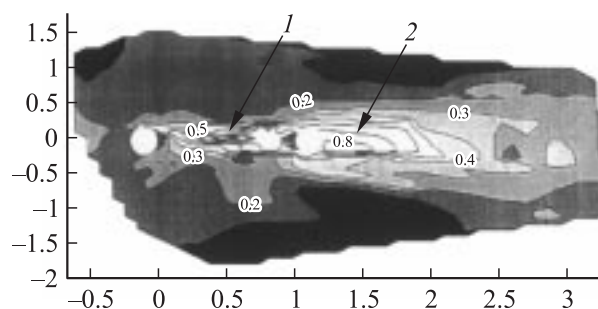
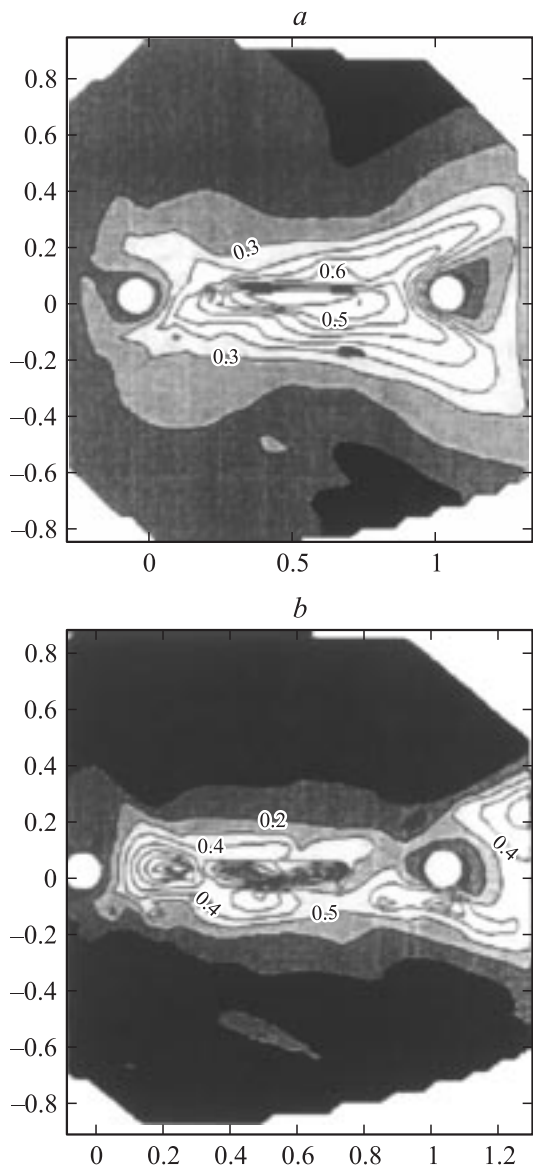


Рис. 1. Карта линий уровня скорости сквозного электрогидродинамического течения.



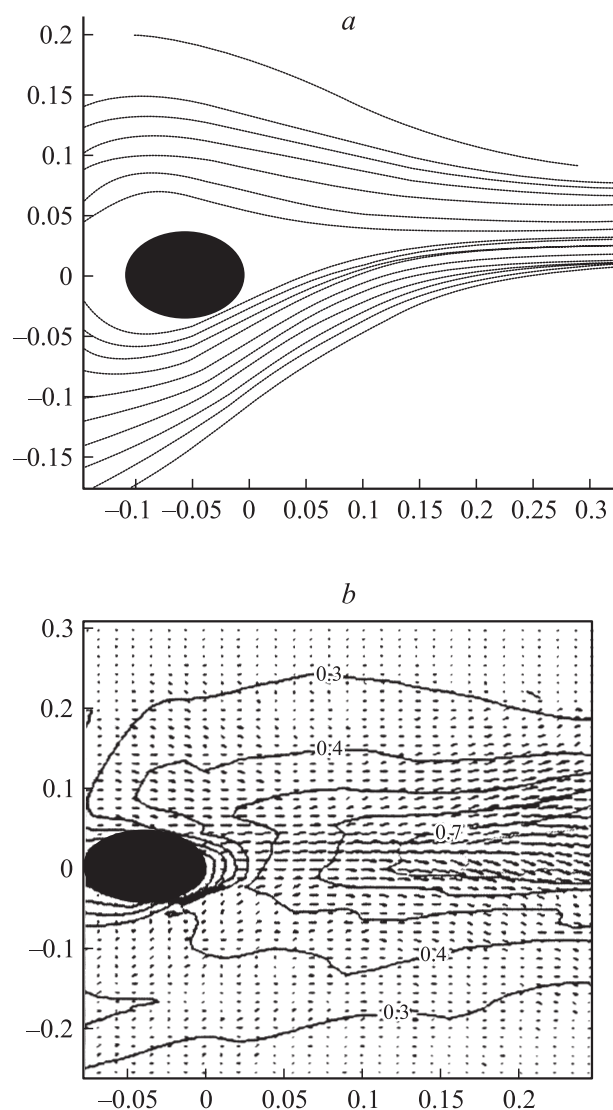
**Рис. 2.** Карты линий скорости (*a*) и линий уровня ускорения сквозного электрогидродинамического течения (*b*) в пределах межэлектродного промежутка.

На рис. 2 представлены карты линий уровня скорости (*a*) и сил (*b*) при сквозном течении в области между электродами, центр активного электрода находится в точке (0,0), пассивного — в точке (0,1). Как видно из рис. 2, зонная структура, характерная для течений в несимметричных системах электродов (провод плоскость, лезвие плоскость), в целом сохраняется, за исключением зоны торможения. Продольные размеры зоны ускорения составляют около  $0.3-0.4L$ , в то время как для встречных течений и течений в системе провод—плоскость ее протяженность не превышает  $0.2L$ . Хорошо видна зона равномерного течения жидкости. Она начинается на расстоянии  $0.3L$  от активного электрода и заканчивается на расстоянии  $0.8L$ , т.е. занимает большую часть межэлектродного проме-

жутка. Зона торможения сквозного течения начинается на уровне  $0.8L$  и выходит далеко за пределы межэлектродного промежутка.

### Структура зон ускорения и торможения

Для более тщательного изучения зоны ускорения в режиме сквозного течения обработаны видеofilмы электрогидродинамического течения в зоне ускорения и в зоне у пассивного электрода, специально снятые при большом увеличении, что позволило существенно повысить разрешение в зоне интереса. Результаты обработки зоны интереса около активного электрода представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, у активного электрода происходит существенная концентрация линий тока электрогидродинамического течения, формируется узкая центральная струя течения. Область ускорения имеет



**Рис. 3.** Карта линий тока течения около активного электрода (*a*) и линий уровня скорости течения около активного электрода (*b*). Стрелками показано векторное поле ускорения.

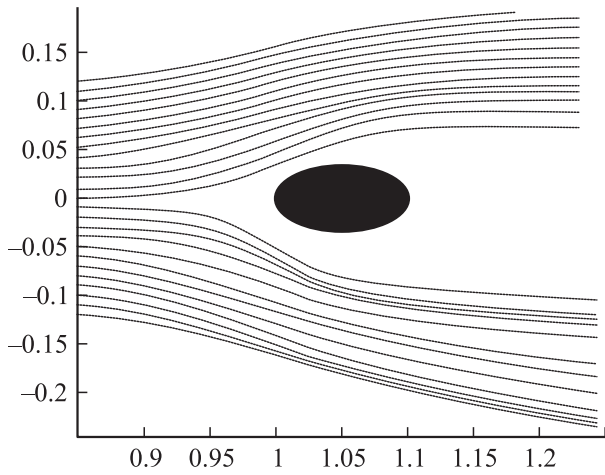


Рис. 4. Карта линий тока течения около пассивного электрода.

воронкообразную форму, а ее размеры невелики:  $2-4D$  (где  $D$  — диаметр электрода) в длину и около  $2D$  в поперечном размере. Она локализована непосредственно у поверхности активного электрода (катода). В зоне ускорения скорость электрогидродинамического течения существенно возрастает по величине, т. е., как и в случае течений в несимметричной системе электродов, происходит накопление кинетической энергии течения за счет энергии электрического тока. Как видно из рис. 3, *b*, у активного электрода действует интенсивная объемная электрическая сила. На расстоянии  $1-2D$  появляется составляющая ускорения, направленная под острым углом к центральной оси течения. Этот эффект, по-видимому, связан с электрическим зарядом, имеющимся в центральной струе электрогидродинамического течения.

Ускорения до внутренней кромки электрода (координаты  $0,0$ ) значительно меньше, чем в области между электродами, в то время как и в несимметричной системе электродов, и во встречных течениях [3] жидкость заметно ускорялась еще в области до электрода. Еще одной особенностью сквозного электрогидродинамического течения является достаточно узкая центральная струя (поперечный размер  $1-2D$ ) (рис. 3).

На рис. 4, 5 представлены результаты исследования зоны около пассивного электрода, полученные с повышенным разрешением. Лобовая поверхность электрода находится в точке с координатами  $(1,0)$ . При обычном обтекании цилиндра жидкостью в таких условиях линии тока огибают поверхность цилиндра и реализуется так называемое ползущее течение, когда конфигурация линий тока практически симметрична относительно оси цилиндра [6]. При повышении скорости течения наблюдается зона отрыва течения за цилиндром. Анализ структуры сквозного электрогидродинамического течения жидкости в области за электродом показывает, что отрыв течения наблюдается при более малых скоростях и структура течения в этой области имеет свою характерную особенность: течение разделяется на две струи,

которые не соединяются за электродом на достаточно большом расстоянии (рис. 4). Образуется „шлейф“ течения, внутри которого нарушается гидродинамическая устойчивость электрогидродинамического течения, отдельные струйки тока изменяют направление своего движения, появляются первые признаки турбулизации, не соблюдается постоянство траекторий во времени.

Как видно из рис. 2, интенсивность ускорений (замедлений) в зоне торможения намного ниже, чем в зоне ускорения, и не намного превышает их интенсивность в зоне равномерного течения. Как видно из рис. 5, наибольшие изменения скорости происходят в непосредственной близости от электрода. Здесь выделя-

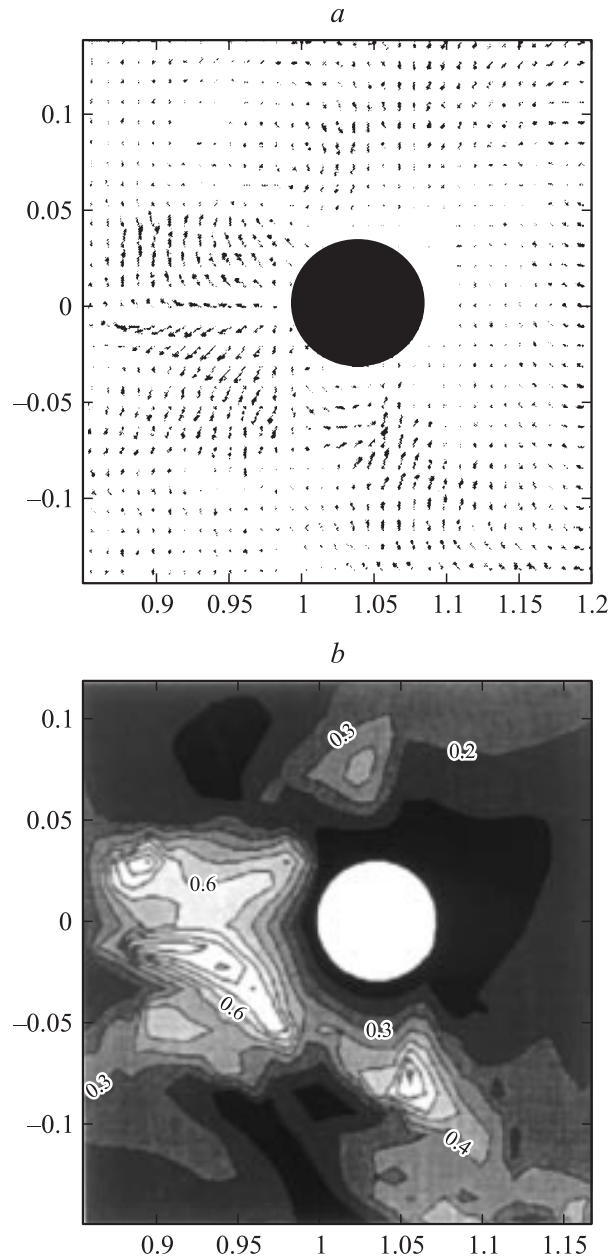


Рис. 5. Векторное поле ускорения около пассивного электрода (*a*) и карта линий уровня ускорения течения около пассивного электрода (*b*).

ется небольшая клинообразная застойная область перед электродом. Как видно из векторного поля ускорений (рис. 5, *b*), в области перед пассивным электродом наблюдаются достаточно большие тормозящие силы. Наличие этой зоны связано с инжекцией одноименного заряда с поверхности пассивного электрода, который сносится основным потоком в область за электродом. В этом случае инжекция гораздо менее интенсивна, чем в случае встречных электрогидродинамических течений и не способна образовать встречную струю. Тем не менее биполярная структура зоны рекомбинации сохраняется, а сама зона снесена в область за электродом. В этой области внутренние слои струи заряжены одноименно с пассивным электродом, а внешние — зарядом противоположного знака. Такая биполярная структура и обуславливает гидродинамическую структуру в области за пассивным электродом в виде двух потоков, повторяющих структуру „боковых струй“ встречных электрогидродинамических течений [7]. В случае встречного течения две противоположно заряженные струи раздвигаются в месте встречи и образуются боковые струи, в которых жидкость движется параллельно-струйно, не перемешиваясь. Поскольку биполярная структура боковых струй встречных течений очевидна, то логично предположить, что при трансформации встречного течения в сквозное, биполярная структура „боковых струй“ сохраняется. Аналогично сохраняется и область активной рекомбинации заряда, однако она оказывается за пределами межэлектродного промежутка. В этом случае становится понятной структура течения в области за электродом. Заряд, поступающий с активного электрода в области за пассивным электродом, в целом уравнивается зарядом с пассивного электрода. За электродом струя, имеющая биполярную структуру, в целом не испытывает действия электрических сил и спад скорости происходит преимущественно под действием вязких сил. По мере движения заряды противоположных знаков притягиваются друг к другу и рекомбинируют. Этому процессу мешает молекулярное окружение ионов. Из-за взаимного притяжения ионов и достаточно долгого процесса их рекомбинации заэлектродная струя жидкости сохраняет почти постоянными свои поперечные размеры, что хорошо видно из рис. 1.

## Заключение

Описанные выше свойства сквозного электрогидродинамического течения делают его особенно привлекательным для использования в различных электрогидродинамических устройствах, так как в нем реализованы оптимальные условия для преобразования электрической энергии в гидродинамическую, что имеет большое прикладное значение, ибо открывает новое направление в конструировании электрогидродинамических устройств, отличительной особенностью которого являются рациональный подбор свойств границы раздела электрод–жидкость и учет особенностей зонной структуры электрогидродинамических течений.

## Список литературы

- [1] *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989. 173 с.
- [2] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // ЭОМ. 2000. № 1. С. 14–21.
- [3] *Стишков Ю.К., Буянов А.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 34–39.
- [4] *Стишков Ю.К.* // ДАН СССР. 1986. Т. 288. № 4. С. 861–865.
- [5] *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // Сб. докл. VI Междунар. научных конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. СПб., 2000. С. 4–9.
- [6] *Альбом течения жидкости и газа.* Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 181 с.
- [7] *Буянов А.В., Павлейно М.А., Стишков Ю.К.* // Вестник СПбГУ. 2001. Сер. 4. Вып. 2 (№ 12). С. 109–114.