

# Влияние уровня низковольтной проводимости на структуру сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов

И. А. Ашихмин, Ю. К. Стишков

НОЦ «Электрофизика», Физический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, 3, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия, e-mail: [stishkov@paloma.spbu.ru](mailto:stishkov@paloma.spbu.ru)

Представлены результаты численного моделирования сквозного электрогидродинамического (ЭГД) течения в симметричной системе электродов, помещенных в канал с диэлектрическими стенками и заполненный жидким диэлектриком. На базе этой модели исследуется изменение структуры сквозного течения при разных значениях уровня низковольтной проводимости диэлектрической жидкости. Анализ полученных решений показал, что при проводимостях до  $10^{-11}$  См/м структура течений практически не отличается от случая нулевой проводимости. При больших значениях низковольтной проводимости усиливается рекомбинация заряда в приэлектродных диссоциационно-рекомбинационных слоях, что приводит к уменьшению проникновения инжектируемого заряда в объем и реорганизации кинематики возникающего сквозного ЭГД-течения, выражающейся в смещении зоны ускорения к активному электроду.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, ЭГД-течения, низковольтная проводимость, инжекция заряда, сквозное течение.

УДК 53.072, 53.072.127, 621.371.329

## ВВЕДЕНИЕ

В [1–2] рассматривались результаты моделирования сквозного электрогидродинамического (ЭГД) течения в симметричной системе электродов типа провод-провод при биполярной инжекции ионов в непроводящую жидкость в канале, то есть в жидкость с нулевой начальной проводимостью. Показано, что так называемое сквозное ЭГД-течение возникает при сбалансированных уровнях инжекции на активном и пассивном электродах. В этой модели ионы в жидкости появляются только за счет инжекции на каждом из электродов. Симметричная система электродов позволяет наиболее просто исследовать инжекционный механизм образования заряда и его влияние на структуру ЭГД-течений, так как начальные условия для инжекции с каждого из электродов одинаковы. Однако все реальные диэлектрические жидкости имеют некоторую начальную низковольтную проводимость, обусловленную термической диссоциацией примесных молекул или ионных пар. При введении в жидкость примесей, увеличивающих интенсивность инжекции, например обладающих электронно-акцепторными свойствами, возрастает не только интенсивность последней. Под действием термической диссоциации введенных примесных молекул увеличивается и низковольтная проводимость исходной жидкости [3]. Так, например, введение 10% бутанола в трансформаторное масло увеличивает его низковольтную проводимость на два порядка, до уровня 100 пкСм/м. Как

показали систематические экспериментальные исследования в системе электродов провод-провод [4], в этой смеси обычно наблюдается устойчивое сквозное ЭГД-течение. Увеличение концентрации примеси до 20% и более на два порядка повышает низковольтную проводимость смеси, при этом эффект сквозной прокачки падает и вновь возникают встречные течения [3]. В настоящей работе на основе численного решения полной системы ЭГД-уравнений и анализа результатов решения этот эффект находит объяснение. При инжекции в жидкость с конечным уровнем собственной проводимости в приэлектродной области возникают встречные потоки разнополярных ионов. При этом существенную роль играет эффект рекомбинации. Как отмечалось в [5], в жидкостях с повышенной низковольтной проводимостью инжекция может оказаться неэффективной, так как ее поверхностные токи будут подавляться встречными токами объемной диссоциации. Это происходит в случае рекомбинации встречных разнополярных ионных потоков в приэлектродных областях. В жидкости возникают т.н. диссоциационно-рекомбинационные слои (ДРС) [5], в результате рекомбинации с ионами низковольтной проводимости плотность объемного заряда, проникающего с электрода в жидкость, существенно спадает, спадает также и интенсивность возникающих в жидкости ЭГД-течений.

В данной работе рассматривается модель инжекции в жидкость с конечной начальной проводимостью, причем значение последней в различ-

ных примерах варьируется в диапазоне 1–100 пкСм/м. Этот диапазон выбран не случайно, а исходя из результатов опубликованных ранее [3], именно в этом диапазоне проводимостей в симметричной системе электродов, помещенных в кювету размерами 2,4x10x10 см, происходит переход от режима сквозного течения к режиму встречных течений. Поскольку для прикладных целей [6, 7] представляет интерес использование режима сквозного течения, то в данной работе рассматривается модель ЭГД-преобразователя в канале размерами 1,5x3 см.

Исследования начнем с относительно малого уровня проводимости, равного 10 пкСм/м. Как и в работе [2], решается полная система уравнений электрогидродинамики. Соотношение уровней инжекции на активном и пассивном электродах зададим 2:1, напряжение 20 кВ.

### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В данной работе представлены результаты расчетов, выполненных в пакете Comsol Multiphysics® 3.5. Подробно расчетная модель без учета проводимости обсуждается в работах [1–2, 8]. Рассмотрим отдельные модификации, внесенные в модель для того, чтобы учесть проводимость рассматриваемой среды. Система уравнений электрогидродинамики, позволяющая смоделировать этот класс задач, имеет вид:

$$\gamma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \gamma (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} - \rho \nabla \varphi, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_1 - z_1 b F c_1 \nabla \varphi) + \vec{v} \cdot \nabla c_1 = g(c_1, c_2, \varphi), \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_2 - z_2 b F c_2 \nabla \varphi) + \vec{v} \cdot \nabla c_2 = g(c_1, c_2, \varphi), \quad (5)$$

где  $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$  – плотность вещества;  $\eta = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – динамическая вязкость;  $\rho = F \cdot (z_1 c_1 + z_2 c_2)$  – плотность электрического заряда;  $F = \text{Na} \cdot e$  – константа Фарадея;  $\varepsilon = 2,2$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $z_1 = 1, z_2 = -1$  – зарядовые числа для положительных и отрицательных ионов соответственно;  $b = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – подвижность носителей заряда;  $D = b k_B T / e$  – коэффициент диффузии;  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана;  $T = 300 \text{ К}$  – температура;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд

электрона. Параметры модели выбирались соответствующими трансформаторному маслу из справочника [9]. В результате расчета модели мы получаем распределения следующих величин:  $\vec{v}$  – скорость течения жидкости;  $p$  – давление;  $\varphi$  – потенциал электрического поля;  $c_1, c_2$  – концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно.

Отличительной особенностью этой системы уравнений является то, что в уравнениях Нернста–Планка для положительных и отрицательных ионов (4)–(5) вводится функция источника по формуле [10]:

$$g(c_1, c_2, \varphi) = \frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon \varepsilon_0 b} - \frac{2b}{\varepsilon \varepsilon_0} z F c_1 c_2, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  – электрическая проводимость.

В начальный момент времени мы задаем равномерное распределение концентрации положительных и отрицательных ионов по формуле  $c_1^0 = c_2^0 = \sigma_0 / (2bF)$ . При таком значении начальной концентрации при отсутствии электрического поля функция источника будет равна нулю, поскольку процессы рекомбинации и термической диссоциации молекул уравновешивают друг друга.

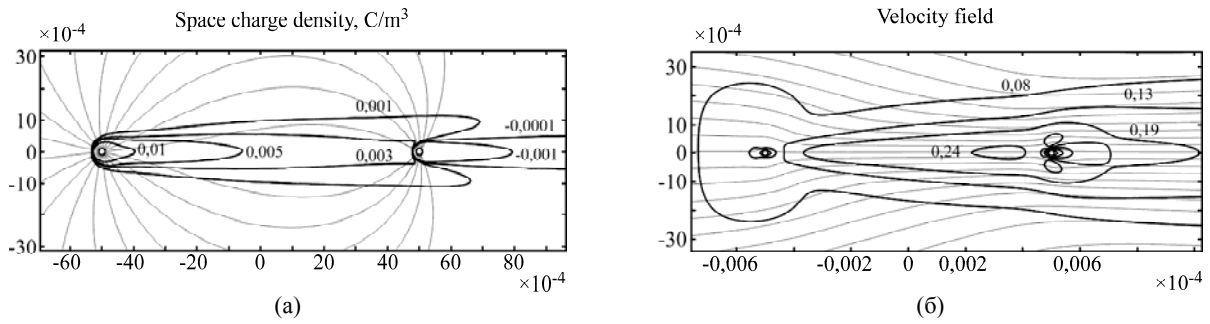
Напомним, что ток инжекции задавался по формуле Шоттки [11]:

$$\vec{J} = A \exp \left( \sqrt{\frac{e^3 |\nabla \varphi|}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 k_B^2 T^2}} \right) \cdot \vec{n}. \quad (7)$$

Здесь множитель  $A$  является параметром исследования и определяет инжекционную способность электрода. При начальном уровне проводимости  $A = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ А/м}^2$ . В отличие от работы [2] инжекция задавалась со всей поверхности активного электрода.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим для начала результаты моделирования для наименьшей проводимости  $\sigma_0 = 10^{-11} \text{ См/м}$ . Распределения плотности электрического заряда и поля скоростей в стационарном режиме имеют вид, приведенный на рис. 1. Как видно из рисунка, структура зарядовых струй и скоростная структура возникающих ЭГД-течений практически не отличаются от случая инжекции в непроводящую жидкость [1, 2]. После включения напряжения от активного электрода распространяется положительно заряженная струйка, формирующая в установившемся режиме за активным электродом вафлеобразную заряженную структуру (рис. 1а). Спад плотности заряда вдоль струйки невелик. Линия уровня



**Рис. 1.** Распределение плотности электрического заряда на фоне силовых линий электрического поля (а) и линии тока жидкости, а также линии уровня скорости ЭГД-течения (б) в жидкости с низковольтной проводимостью 10 пСм/м.

плотности 0,03 простирается от активного электрода к пассивному и доходит до противоэлектрода, формируя границу заряженной струйки, толщина которой однородна вдоль межэлектродного промежутка. Как видно из структуры линий тока и линий уровня скорости (рис. 1б), это обеспечивает устойчивое сквозное ЭГД-течение в канале, причем зона ускорения течения достигает 0,7–0,8 длины межэлектродного промежутка (МЭП), а за пассивным электродом имеется небольшая вторичная зона ускорения.

Несмотря на то что распределения плотности заряда и скорости практически идентичны тем, которые были получены для инъекции в непроводящую жидкость, при данном уровне проводимости мы можем увидеть различия на ампер-секундных характеристиках (АСХ) рис. 2. На этих графиках приведены зависимости плотности тока инъекции с электрода (сплошная линия) и встречного тока проводимости (штриховая) для активного (а) и пассивного (б) электродов.

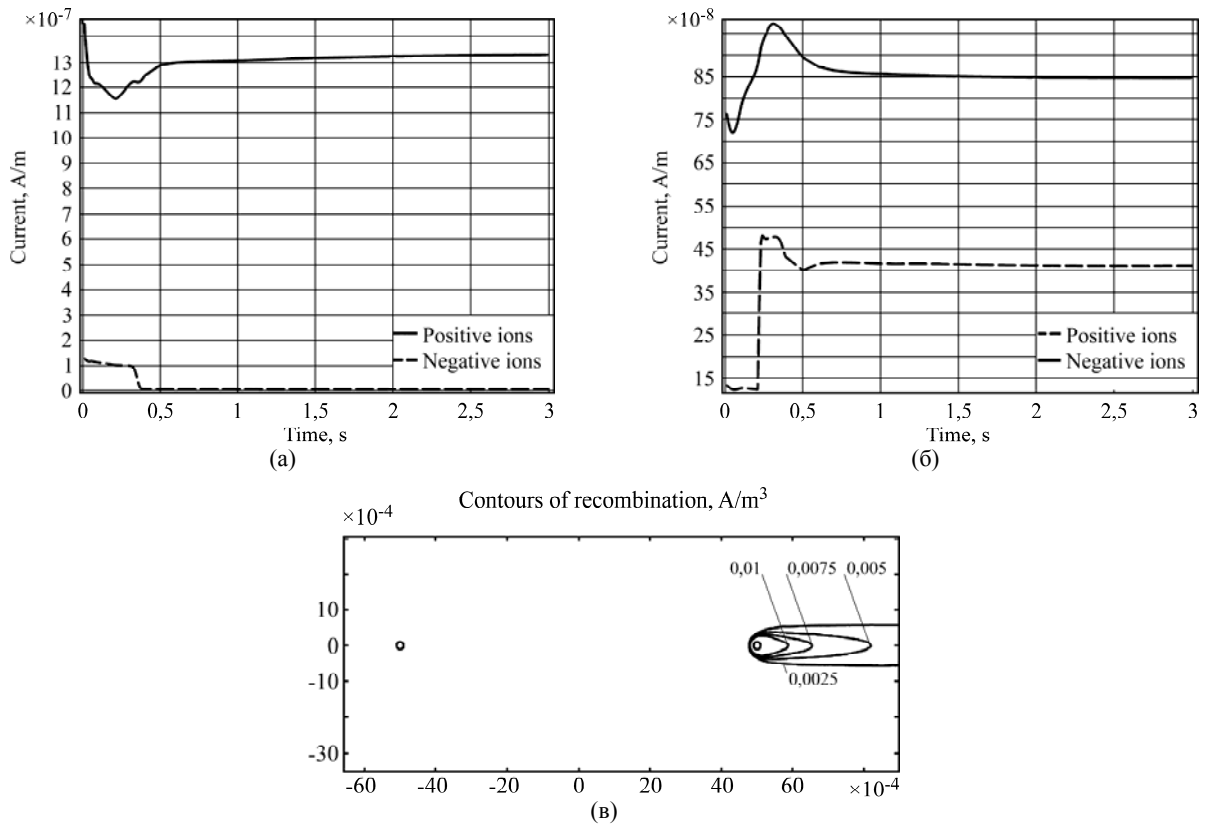
На рис. 2 приведены ампер-секундные характеристики: зависимости от времени токов инъекции и проводимости с активного (рис. 2а) и пассивного (рис. 2б) электродов. На этапах формирования приэлектродного слоя и развития ЭГД-течения (0,1 с) имеет место спад тока инъекции у активного и пассивного электродов, связанный с накоплением гомозаряда в приэлектродных областях и центральной струе ЭГД-течения. Далее на пассивном электроде наблюдается рост тока инъекции, обусловленный тем, что с активного электрода начинает распространяться струйка положительного заряда, которая усиливает поле на этом электроде. В это же время ток проводимости на активном электроде спадает практически до нуля. Это объясняется тем, что вокруг электрода формируется заряженная область, в которой рекомбинируют заряды противоположного знака, не успевая дойти до поверхности электрода. На пассивном электроде, наоборот, в момент касания фронта заряженной струи происходит резкий скачок тока гибели положительных ионов, который впоследствии выходит на стационарное значение.

После прохождения заряженного фронта ток инъекции с активного электрода немного увеличивается, так как в канале формируется сквозное течение, ускоряющее процесс конвективного отвода заряда. С пассивного электрода, напротив, ток инъекции при выходе на стационар спадает, так как после прохождения заряженного фронта заряд, сформированный в струе, меньше, чем тот, который был на фронте, следовательно, уменьшаются усиление поля в приэлектродной области и ток.

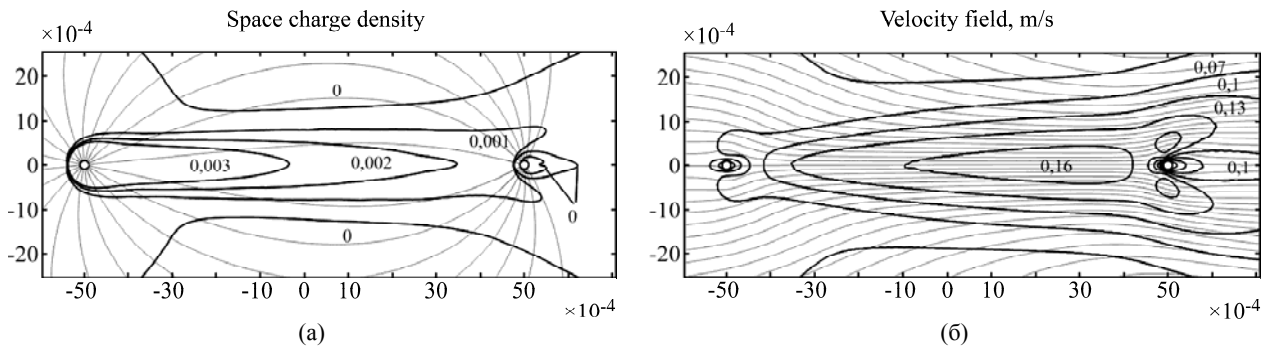
Поскольку уровень низковольтной проводимости в рассматриваемом случае мал, то плотности токов инъекции на активном электроде существенно больше плотности встречных токов низковольтной проводимости. Поэтому интенсивность рекомбинации у активного электрода незначительна, и практически весь инжектируемый заряд поступает в центральную струю ЭГД-течения и переносится к противоэлектроду и далее в заэлектродную область. Заряд, инжектируемый с отрицательного пассивного электрода, также проникает в жидкость и сносится в заэлектродную область, образуя там вафлеобразную биполярную зарядовую структуру, в пределах которой идет интенсивная рекомбинация встречных разнополярных потоков. Это хорошо видно из распределения интенсивности рекомбинации на рис. 2в.

Рассмотрим случай повышенной проводимости  $10^{-10}$  См/м, в частности графики распределения плотности электрического заряда и скорости.

Из этих графиков видно (рис. 3), что при проводимости 100 пСм/м картина формирования течений имеет существенные отличия от случая инъекции в менее проводящую жидкость. С активного электрода к противоэлектроду, как и в предыдущем случае, распространяется заряженная струйка (рис. 3а), однако плотность заряда в ней спадает значительно быстрее, а за пассивным электродом струйка отрицательного заряда практически отсутствует. Поэтому на графике распределения скоростей (рис. 3б) зона ускорения расположена несколько ближе к активному электроду, а за пассивным электродом зона вторич-



**Рис. 2.** Ампер-секундные характеристики (АСХ) активного (а) и пассивного (б) электродов; (в) – линии уровня интенсивности рекомбинации в жидкости с проводимостью 10 пкСм/м.



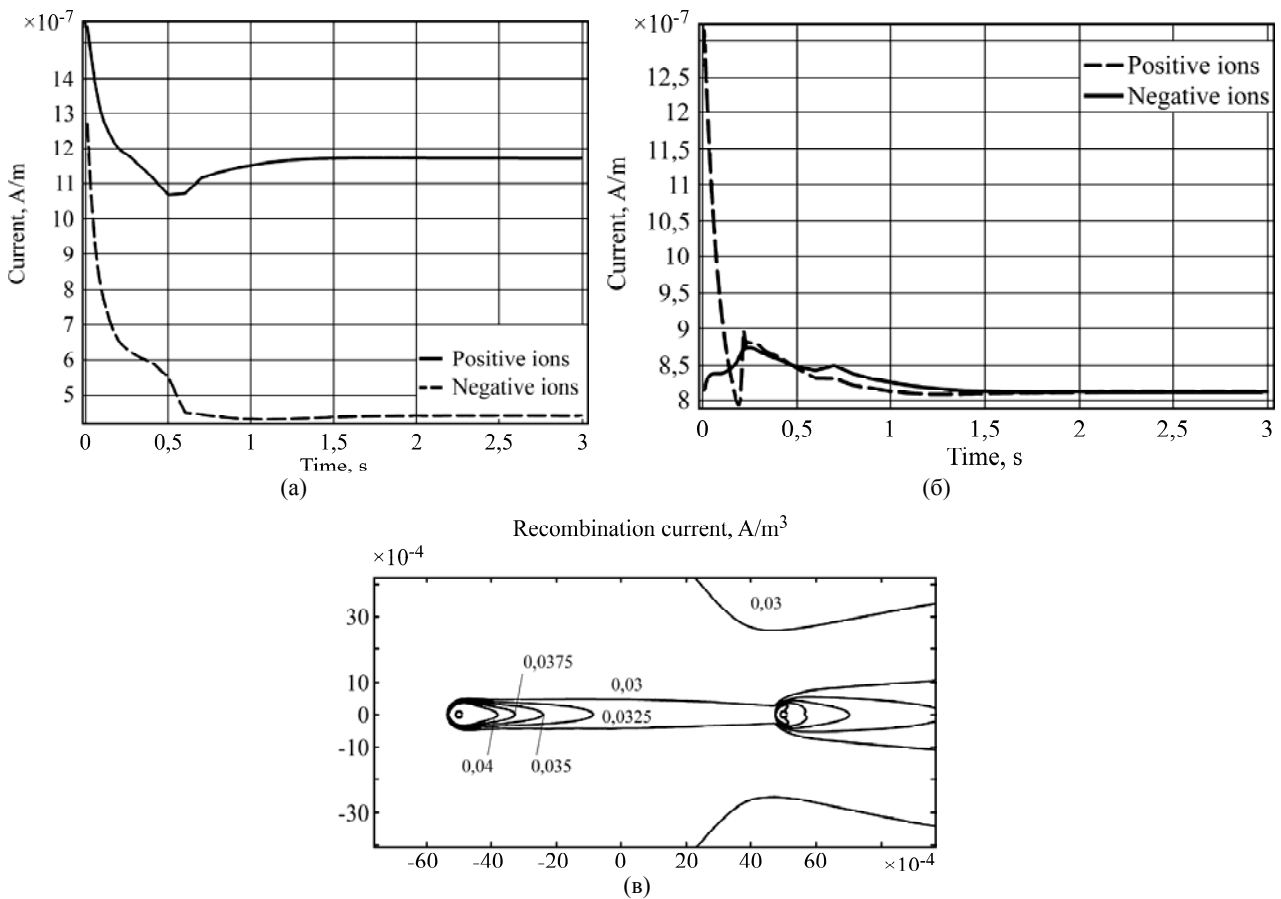
**Рис. 3.** Распределение плотности электрического заряда на фоне силовых линий электрического поля (а) и линии тока жидкости, а также линии уровня скорости ЭГД-течения (б) в жидкости с низковольтной проводимостью 100 пкСим/м.

ного ускорения жидкости практически отсутствует. Это приводит к уменьшению средней скорости сквозной прокачки жидкости.

Посмотрим, что происходит с ампер-секундными характеристиками и интенсивностью рекомбинации при повышенном уровне низковольтной проводимости (рис. 4). На активном электроде (рис. 4а) картина в целом повторяет ту, которая была получена для меньшей проводимости (рис. 2а). Здесь мы также видим, что ток инжекции спадает со временем из-за образования гомозаряженных слоев вблизи электрода. При этом начальный уровень тока проводимости (штриховая линия) больше, чем в предыдущем случае, на порядок. Как и в предыдущем случае, ток проводимости со временем уменьшается очень значительно (около трех раз), так как вблизи активного электрода (рис. 4в)

находится зона интенсивной рекомбинации ионов, благодаря чему они рекомбинируют с ионами, инжектируемыми с активного электрода, не дойдя до поверхности электрода. Однако плотность тока инжекции спадает не столь существенно, всего на 35%, так как уровень начальной проводимости еще недостаточен.

Для пассивного же электрода (рис. 4б) картина АСХ сильно отличается от случая проводимости 10 пкСм/м. Здесь мы видим, что начальное значение тока инжекции практически совпадает с предыдущим случаем, но ток проводимости больше на порядок. Таким образом, в начальный момент вблизи пассивного электрода начинает формироваться кольцо заряда противоположного знака. Это приводит к тому, что с электрода усиливается ток инжекции, который к моменту прихода заряженного фронта с активного электрода



**Рис. 4.** Ампер-секундные характеристики активного (а) и пассивного (б) электродов; (в) – линии уровня интенсивности рекомбинации в жидкости с проводимостью 100 пкСм/м.

успевает сравниться с током проводимости. В результате мы видим, что за пассивным электродом образуется нехарактерный для сквозного течения биполярный приэлектродный ДРС, при котором отрицательный заряд локализуется в небольшой области порядка нескольких радиусов электрода и не сносится в заэлектродную область. Это в конечном итоге ослабляет интенсивность сквозного течения.

Для исследования сквозного ЭГД-течения в жидкостях с еще более высоким уровнем низковольтной проводимости необходимо повысить начальный уровень инжекции на обоих электродах. В противном случае, как показывают результаты моделирования, плотность тока инжекции окажется существенно ниже плотности встречного тока низковольтной проводимости и инжектируемый заряд не проникнет в объем жидкости, а погибнет в приэлектродном слое за счет рекомбинации. При этом в жидкости возникают слабые четырехъязычистые течения, направленные на электроды.

На рис. 5 приведено распределение объемного заряда и уровней скорости в жидкости с проводимостью  $10^{-9}$  См/м. Расчет проведен для случая повышенной (в 8 раз) инжекции и соотношения (3:2) токов инжекции с активного и пассивного

электродов. При этом ток инжекции вновь доминирует над током проводимости на обоих электродах (рис. 6).

Видно, что вокруг обоих электродов, как и в предыдущих случаях, формируются области, заряженные одноименно с электродом, однако плотность заряда очень быстро падает из-за рекомбинации с ионами, обеспечивающими низковольтную проводимость. Поэтому глубина проникновения заряженных струек в объем жидкости невелика, струйка положительного заряда не достигает противоиэлектрода. Тем не менее за активным и пассивным электродами имеются небольшие области ускорения жидкости, обеспечивающие сквозное течение в канале. Отличительной особенностью течения при низковольтной проводимости  $10^{-9}$  См/м является то, что область локализации положительного заряда, инжектированного с активного электрода, уже не успевает распространиться до пассивного электрода, так как в объеме жидкости происходит интенсивная рекомбинация (рис. 6в) с ионами, образованными за счет термической диссоциации молекул. Поэтому за областью ускорения, занимающей менее 0,3 длины межэлектродного промежутка, находится область торможения, которая простирается до противоиэлектрода, а затем

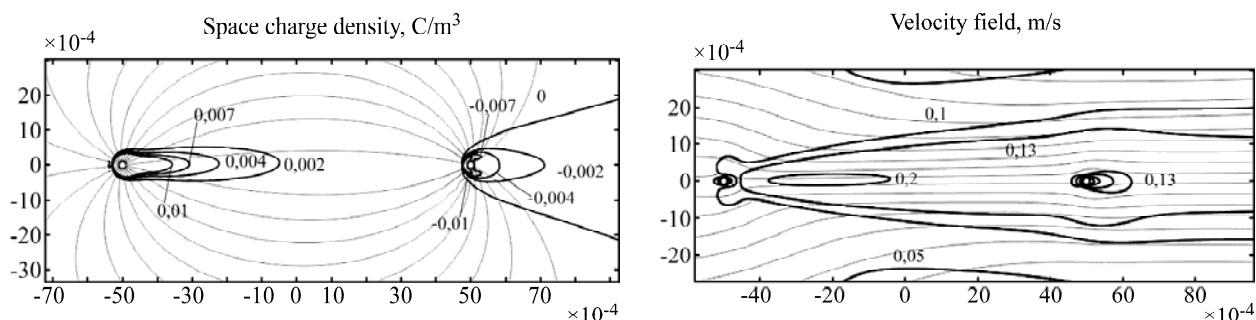


Рис. 5. Распределение плотности электрического заряда на фоне силовых линий электрического поля (слева) и линии тока жидкости, а также линии уровня скорости ЭГД-течения (справа) в жидкости с низковольтной проводимостью 1 нСм/м.

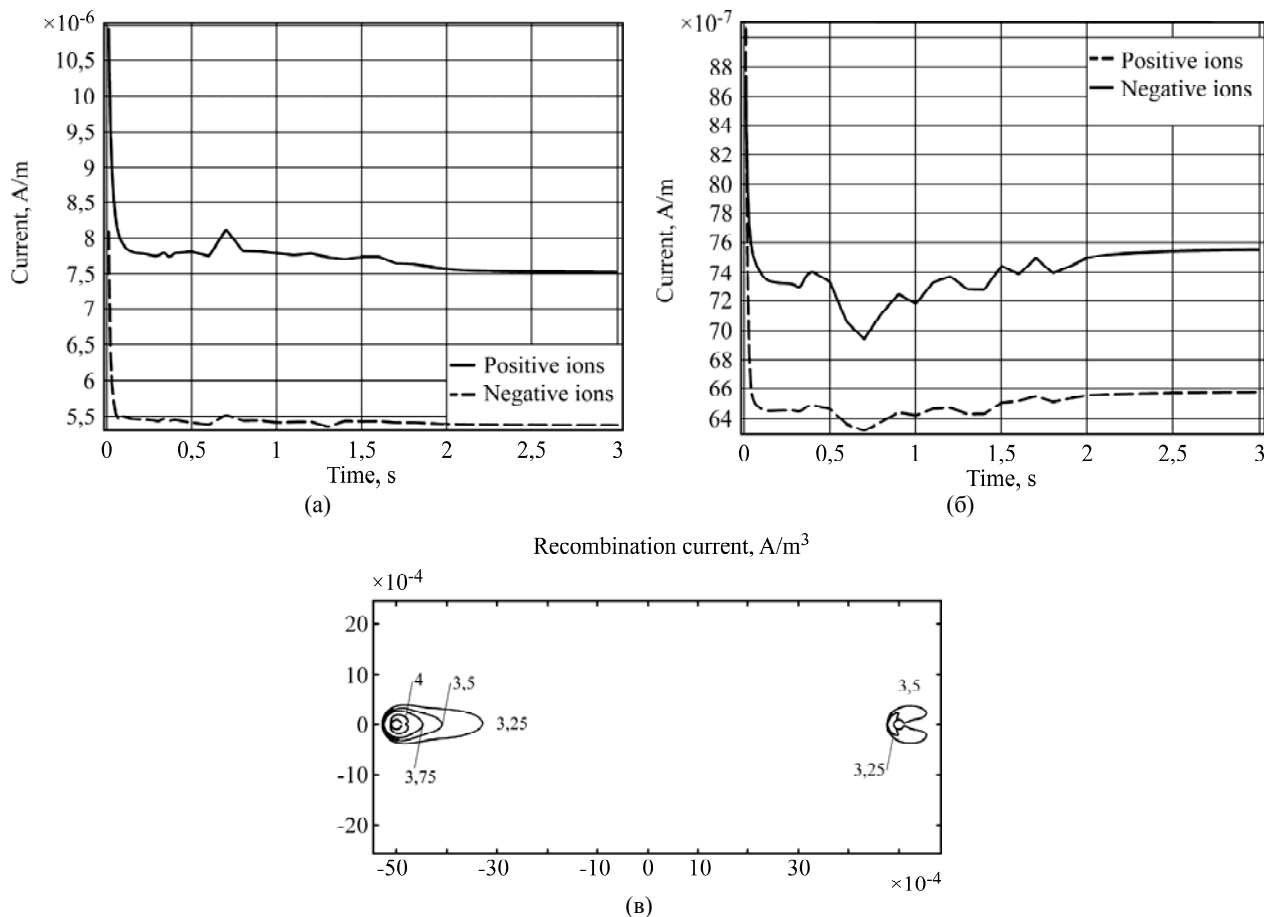


Рис. 6. Ампер-секундные характеристики активного (а) и пассивного (б) электродов; (в) – линии уровня интенсивности рекомбинации в жидкости с проводимостью 1 нСм/м.

располагается вторичная короткая область ускорения. По этим признакам можно утверждать, что сквозное течение в жидкостях повышенной проводимости вырождается.

Следует отметить, что рекомбинационный эффект существенно повышает затраты энергии на джоулев нагрев, при этом итоговая скорость сквозного ЭГД-течения, несмотря на повышенный уровень инжекции, понижается. При меньшем соотношении уровней инжекции на электродах (например, 1:1) в жидкости с проводимостью 1 нСм/м вновь появляются два встречных вихря, что и было зарегистрировано в экспериментах [3].

При столь высоком уровне низковольтной проводимости ампер-секундные характеристики

на обоих электродах носят ниспадающий характер, время релаксации тока 0,01 сек, нет роста тока на пассивном электроде, а ток проводимости падает до некоторого конечного уровня. Зоны рекомбинации у обоих электродов значительно меньше размеров межэлектродного промежутка, а ее интенсивность существенно выше. По сути, области рекомбинации характеризуют размеры рекомбинационных слоев. При еще большем уровне низковольтной проводимости глубина проникновения инжектируемого заряда в жидкость спадет до субмиллиметровых размеров, а ЭГД-течения локализуются в приэлектродной области в виде мелкомасштабных вихрей соответствующих масштабов без формирования сквозного течения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В симметричной системе электродов типа провод-провод, расположенных в канале с диэлектрическими стенками, сквозное течение возникает только в случае сбалансированного подбора функций инжекции с активного и пассивного электродов, приводящего к формированию биполярной зарядовой структуры за пассивным электродом. Причем, для того чтобы течение было стабильно и не реорганизовывалось со временем под действием объемного заряда, необходима строгая балансировка системы по токам инжекции. Эта балансировка должна обеспечить полную рекомбинацию ионных потоков с активного и пассивного электродов в заэлектродной области, и в канале не должен накапливаться электрический заряд.

Сквозное течение формируется только в жидкостях с невысоким уровнем низковольтной проводимости, до 1 нСм/м, когда размеры зоны рекомбинации сопоставимы с размерами межэлектродного промежутка. При инжекции в жидкость с повышенным уровнем низковольтной проводимости инжектированный заряд перестает проникать в объем жидкости из-за возникновения приэлектродных диссоциационно-рекомбинационных слоев, что приводит к вырождению режима сквозного течения. В жидкостях с повышенным уровнем низковольтной проводимости эффективность ЭГД-преобразования существенно падает вследствие повышения уровня джоулевых потерь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ashikhmin I.A. and Stishkov Yu.K. Structural Features of EHD Flows in Wire-wire Symmetric Systems of Electrodes. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2009, **45**(6), 471–479.
2. Ashikhmin I.A. and Stishkov Yu.K. Electrohydrodynamic Injection Converters. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(3), 268–275.
3. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Чистяков Н.А. ЭГД-течения в системе взаимно параллельных проволок. *Магнитная гидродинамика.* 1982, (3), 79–82.
4. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках.* Л.: ЛГУ, 1989. 174 с.
5. Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования. *ДАН СССР.* 1986, **288**(4), 861–865.
6. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен.* Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
7. Болога М.К., Кожевников И.В. и др. Теплообмен при электрогидродинамических течениях. *Тепловые процессы в технике.* 2010, (11), 507–511.
8. Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование динамической вольт-амперной характеристики в симметричной системе электродов в канале с низкопроводящей жидкостью. *Сб. докл. X Междунар. науч. конф. СПЭЭЖГ.* Санкт-Петербург, 2012. С. 144–146.
9. Адамчевский И. *Электрическая проводимость жидких диэлектриков.* Л.: Энергия, 1972. 295 с.
10. Стишков Ю.К., Чирков В.А. Формирование электрогидродинамических течений в сильнеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования. *Журнал технической физики.* 2012, **82**(1), 3–13.
11. Жакин А.И. Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках. *УФН.* 2006, **176**(3), 289–310.

Поступила 22.02.13

## Summary

This paper presents the results of numerical modeling through electrohydrodynamic (EHD) flow in a symmetric system of electrodes placed in the channel with dielectric walls and filled with liquid dielectric. Based on this model, under study are changes in the structure of a through flow at different levels of the low-voltage conductivity of the dielectric fluid. The analysis of the solutions shows that the flow structure with conductivities up to  $10^{-11}$  S/m does not differ from the case of zero conductivity. Recombination of charge increases for large values of the low-voltage conductivity in the near electrode layers, which reduces the penetration of the injected charge in the bulk and reorganizes the kinematics arising EHD through flow, reflected in a shift of the acceleration zone to the active electrode.

*Keywords:* numerical simulation, EHD flow, low-voltage conductivity, ion-drag pumping, through flow.