

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ В СИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ ТИПА ПРОВОД–ПРОВОД

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-образовательный центр “Электрофизика” физического факультета,
ул. Ульяновская, д.3, г. Санкт-Петербург, Петродворец, 198504, Россия,
Stishkov@paloma.spbu.ru*

Введение

ЭГД-устройства представляют собой классический пример использования нанотехнологий: в этих устройствах для передачи импульса нейтральной среде используются ионы, введенные в жидкость, то есть это предельный случай уменьшения размеров устройств, приводящих жидкость в движение. Реальные размеры ЭГД-насосов весьма невелики, размер межэлектродного промежутка может составлять 1 мм. Неоднократно отмечалось, что размер молекулярного комплекса, приводимого в движение отдельным ионом, весьма велик и составляет 10^{12} молекул. Это объясняется, с одной стороны, образованием надмолекулярной структуры в поле каждого иона, т.н. сольватной оболочки, а с другой – диффузионным механизмом передачи импульса, весьма эффективным на малых расстояниях.

Основными проблемами, стоящими перед разработчиками ЭГД-устройств, являются выведение импульса среды из зоны силового воздействия электрического поля — за пределы межэлектродного пространства и доставка жидкости по замкнутому гидравлическому контуру к обслуживаемым объектам. Эти проблемы связаны прежде всего с нейтрализацией источника импульса — ионов за пределами межэлектродного промежутка. При неполной нейтрализации в реальных конструкциях ЭГД-преобразователей большая часть энергии идет на образование т.н. внутренних возвратных вихрей, что снижает КПД ЭГД-насосов.

Наиболее распространенной конструкцией ЭГД-насоса является несимметричная система электродов типа игла–кольцо (конфузор), предложенная Штютцером [1]. Несимметричные системы электродов, традиционно используемые для создания ЭГД-насосов, обладают рядом недостатков. В такого рода системах ЭГД-течения создаются в сильнонеоднородных электрических полях, причем степень неоднородности электрического поля может достигать весьма высоких значений, особенно в системах типа игла–плоскость. Таким образом, изначально создаются условия, в которых приэлектродные процессы у электрода с малым радиусом кривизны значительно более интенсивны, чем у противоэлектрода. Поэтому в некоторых работах изначально постулируется образование заряда только у игольчатого электрода – униполярная инжекция. Такая система, по мнению авторов, должна работать в любой слабопроводящей жидкости, откуда и название ЭГД-насос, нередко с припиской «для перекачки слабопроводящих сред». Однако в случае сильной инжекции проблема нейтрализации носителей объемного заряда на внешней границе межэлектродного промежутка трудно разрешима.

Как показали исследования, интенсивность зарядообразования, а следовательно, и скорость ЭГД-течения существенно зависят от свойств границы электрод–жидкость. Было выявлено [2], что путем изменения состава и концентрации примесей в жидкости, а также изменением материалов электродов и их покрытия можно эффективно управлять не только скоростью, но и направлением ЭГД-течения, а также их структурой. Испытания классических конструкций ЭГД-насосов типа игла–кольцо, лезвие–пластина также выявили определяющее влияние примесного состава жидкости на работу ЭГД-насоса [10].

Анализ теоретических работ по исследованию контакта металл–диэлектрик, а также металл–электролит показывает, что в рассматриваемой области образуется заряженный слой, обусловленный различием работ выхода из контактирующих веществ. Прохождение электрического тока через контактный слой на границе металл–диэлектрик сопровождается туннелированием электронов через барьер. Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровож-

дающимся целым рядом превращений. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными молекулами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому считается, что перенос заряда на межфазной границе осуществляется на примесные молекулы.

Следуя этим данным, в работе [2] предлагалось ввести понятие «ЭГД–преобразователь», но не насос, то есть понимать его как устройство для преобразования энергии электрического тока в энергию механического течения рабочей жидкости. При этом в качестве рабочей жидкости следует использовать не любую слабопроводящую жидкость, а обладающую определенным набором электрофизических и электрохимических свойств.

Структура и направление ЭГД–течений обусловлены прежде всего свойствами контакта электрод–жидкость, и, следовательно, электрофизические свойства жидкости, а также свойства границы раздела электрод–жидкость являются основными конструктивными признаками преобразователя.

Основные отличия ЭГД–преобразователя электрохимического типа от традиционных конструкций ЭГД–насосов — это отсутствие или второстепенное значение геометрической асимметрии электродов, фокусирующее действие электродной системы, способствующее устранению внутренних вихрей, а также использование электрохимической асимметрии контакта электроды–жидкость для получения сквозной прокачки.

Электрохимическая асимметрия достигается использованием либо электродов, выполненных из различных материалов, либо различных покрытий электродов, либо применением рабочей жидкости с примесями.

При использовании симметричных систем электродов возможно вместо нейтрализации носителей заряда — ионов на внешней границе межэлектродного промежутка вводить в жидкость заряд противоположного знака, тем самым нейтрализуя объемный заряд среды. Как показывает практика, это реализовать значительно проще.

В этом свете изучение ЭГД–течений в симметричной системе электродов представляется весьма актуальным. В литературе имеется значительное количество работ, посвященных этой теме. Часть из них носит экспериментальный характер [3], часть посвящена компьютерному моделированию [9].

Моделирование

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование процесса формирования и развития ЭГД–течений в симметричной системе электродов типа провод–провод на основе полной системы ЭГД–уравнений в двухмерном случае. Впервые рассмотрена связь уровня зарядообразования от локальной напряженности поля в приэлектродной области. Вариация свойств контакта электрод–жидкость позволяет получать и исследовать различные типы ЭГД–течений. Приводятся результаты компьютерного моделирования ЭГД–течений для случая униполярной инжекции, симметричной биполярной и несимметричной биполярной инжекции.

Полная система уравнений имеет вид [2]:

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

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

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

$$\frac{\partial c_+}{\partial t} + \operatorname{div}(-D \nabla c_+ - z_+ b F c_+ \nabla \varphi) = R - \vec{v} \cdot \nabla c_+ ; \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_-}{\partial t} + \operatorname{div}(-D \nabla c_- - z_- b F c_- \nabla \varphi) = R - \vec{v} \cdot \nabla c_- ; \quad (5)$$

$$\rho = F(z_+ c_+ + z_- c_-).$$

Здесь ρ — объемная плотность заряда, γ — плотность вещества, v — скорость течения, p — давление, η — динамическая вязкость, φ — потенциал электрического поля, ε — относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, D — коэффициент диффузии, F — число Фарадея, b — подвижность, R — коэффициент рекомбинации, c_+, c_- — концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно, z_+, z_- — зарядовые числа.

Для моделирования была выбрана система с симметричными электродами, размещенными в канале с диэлектрическими стенками, представленная на рис. 1. Модель представляет собой два бесконечных цилиндрических электрода, помещенных в трансформаторное масло. Диаметр электродов равен 1 мм, расстояние между электродами равно 1 см, что соответствует параметрам экспериментальных установок. Так как модель имеет вертикальную ось симметрии, то была построена только половина модели, а на оси симметрии задавались соответствующие граничные условия.

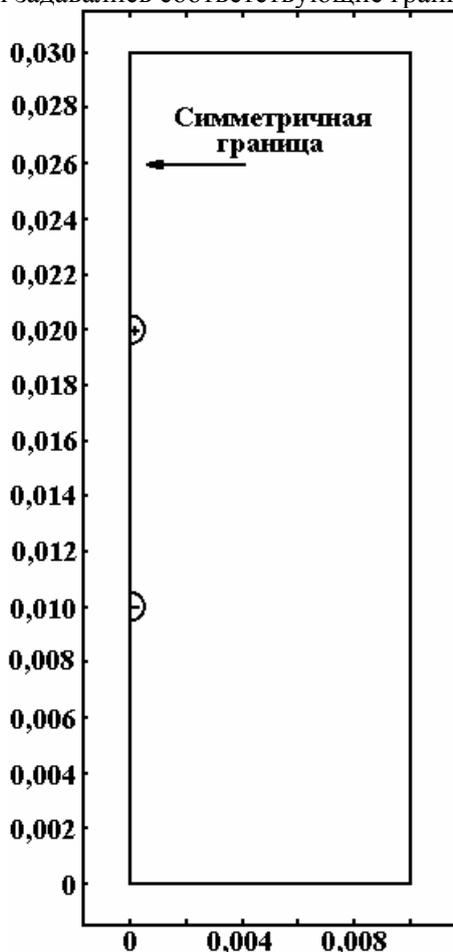


Рис. 1. Геометрия модели

Граничные условия

1. Для уравнения Пуассона на верхнем и нижнем электродах задавалось постоянное значение потенциала, равное +10 000 В и 0 В соответственно. На симметричной границе задавалось условие симметрии $\vec{n} \cdot \vec{D} = 0$. На внешних верхней и нижней границах задавалось условие экранирования электрического поля поверхностным зарядом.

2. Для уравнения Навье-Стокса на электродах задавалось условие прилипания $\vec{u} = 0$. На симметричной границе было поставлено условие отсутствия нормальной составляющей вектора скорости $\vec{n} \cdot \vec{u} = 0$. На внешней боковой, верхней и нижней стенках – условие «открытой границы»:

$$\left[-p\hat{I} + \eta \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) \right] \cdot \vec{n} = 0. \quad (6)$$

3. Уравнение Нернста — Планка.

Здесь так же, как и для предыдущих уравнений, на симметричной границе задавалось условие симметрии, а на стенках – условие «конвективный поток» (англ. convective flux): $\vec{n} \cdot (-D\nabla c - zbf_c \nabla \varphi) = 0$.

На границе электроды–жидкость задавался поток ионов, который определялся из следующих соображений. Поскольку токопрохождение через жидкий диэлектрик обычно не сопровождается растворением электродов или выделением на них веществ, считается, что элементарный акт ионообразования протекает по окислительно-восстановительному механизму:

- катод $Ox + e = Red$
- анод $Red - e = Ox$

Пограничный ток контакта металл–электролит на катоде определяется разницей работы выхода с поверхности металла и энергией сродства к электрону окисленной формы, а на аноде – разницей энергии ионизации восстановленной формы и работой выхода с поверхности металла.

Реакции ионообразования на аноде и катоде обычно проходят неодинаково. Известно, что отрыв электрона от молекулы требует затрат энергии и характеризуется потенциалом ионизации. Так, например, при использовании в качестве примеси молекулярного йода энергия ионизации молекулы йода в положительный ион ($J_2 - e \rightarrow J^+$) равна 9,7 эВ. В то же время присоединение электрона к атому или молекуле может происходить с выделением энергии. В этом случае говорят, что частица обладает сродством с электроном. Мерой сродства с электроном служит энергия E_{cp} , выделенная при ионизации молекулы в отрицательный ион. Для молекулы йода $E_{cp} \approx 3,2$ эВ; для групп -ОН, -СN и -NO₂ E_{cp} соответственно равна 2, 3 и 3 эВ [2]. С позиций ионизационно-рекомбинационного механизма введение в жидкость примесных молекул галогенов, а также молекул, содержащих группы -ОН, -СN, -NO₂, обладающих сродством к электрону, должно привести к интенсификации процессов ионообразования на катоде.

Анализ теоретических работ по исследованию контакта металл–диэлектрик, а также металл–электролит показывает, что в рассматриваемой области образуется заряженный слой, обусловленный различием работ выхода из контактирующих веществ. Прохождение электрического тока через контактный слой на границе металл–диэлектрик сопровождается туннелированием электронов через барьер. Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровождающимся целым рядом превращений. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными молекулами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому считают, что перенос заряда на межфазной границе осуществляется исключительно на примесные молекулы.

Поскольку в большинстве случаев состав примесных молекул, определяющих ионообразование на электродах, неизвестен, воспользуемся зависимостью по формуле типа Шоттки [6]:

$$\vec{J} \sim A \exp\left(B\sqrt{\|\vec{E}\|}\right) H(t) \vec{n}, \quad (7)$$

однако коэффициенты А,В выбираются таким образом, чтобы интегральный ток соответствовал экспериментальным данным. Для этого после построения модели была проведена серия пробных расчетов, в них установлено значение параметра А, при котором скорость течения имела тот же порядок, что и в эксперименте. Значение параметра В выбиралось таким образом, чтобы в стационарном режиме не было «течения вверх», то есть формировалась та структура течения, которая и наблюдается в эксперименте.

$$H(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \text{ — функция включения нужна для того, чтобы решение сходилось на}$$

начальных этапах. Значение $t_0 = 2$, то есть можно сказать, что включение тока происходит плавно — за 2 секунды.

Результаты моделирования и их анализ

Показано, что в случае униполярной инжекции образуется зарядовая пробка, мешающая сквозной прокачке. В случае симметричной инжекции сквозной прокачки нет, однако нет и накопления заряда, так как имеется зона нейтрализации заряда, расположенная в середине МЭП. В случае несимметричной инжекции можно реализовать сквозное течение с зоной нейтрализации заряда, вынесенной за пределы межэлектродного промежутка.

На рис. 2 приведены распределение объемной плотности электрического заряда и линии электрического поля, на рис. 3 – контурный график скоростей и линии тока жидкости при униполярной инжекции с верхнего электрода. В межэлектродном промежутке ЭГД-течение имеет типовой характер: практически неподвижное заряженное кольцо вокруг активного электрода и тонкая заряженная струйка, распространяющаяся до пассивного электрода, имеющая короткую зону ускорения и длинную зону однородного течения. Однако, несмотря на отсутствие препятствия в виде стенки, после обтекания пассивного электрода в заэлектродной области образуются зарядовая пробка (рис. 2) и воз-

вратный вихрь (рис. 3), препятствующий сквозной прокачке жидкости. Это связано с затрудненным механизмом нейтрализации ионов на поверхности пассивного электрода. В некоторых работах предлагались различные варианты конструкций для интенсификации процесса нейтрализации ионов на поверхности пассивного электрода [2].

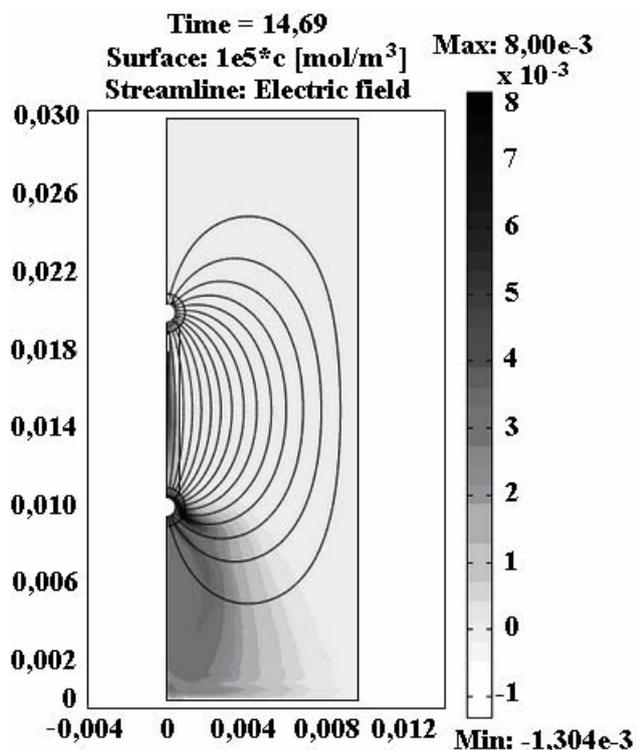


Рис. 2. Распределение объемной плотности электрического заряда и линии электрического поля

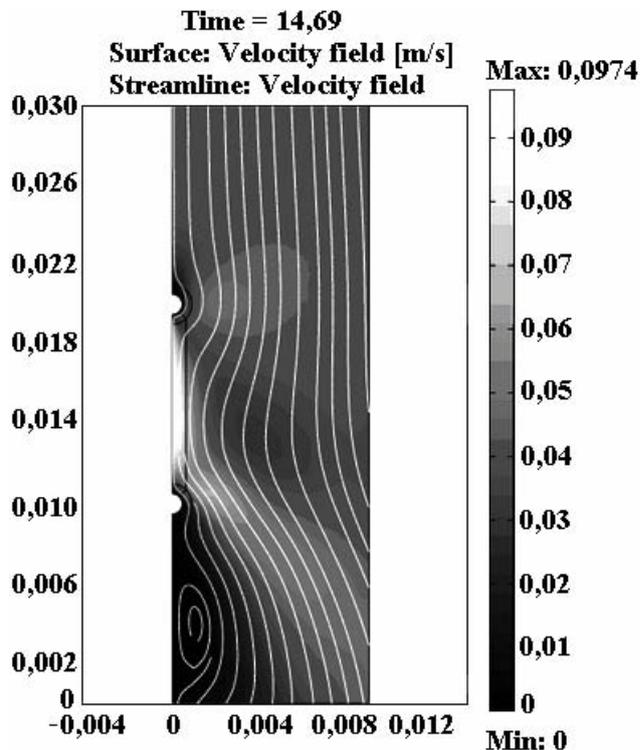


Рис. 3. Контурный график скоростей в модели. Белые линии — линии тока жидкости

Рассмотрим теперь распределения основных характеристик течения с униполярной инъекцией вдоль линий тока. Линии тока были выбраны, так как это представлено на рис. 4.

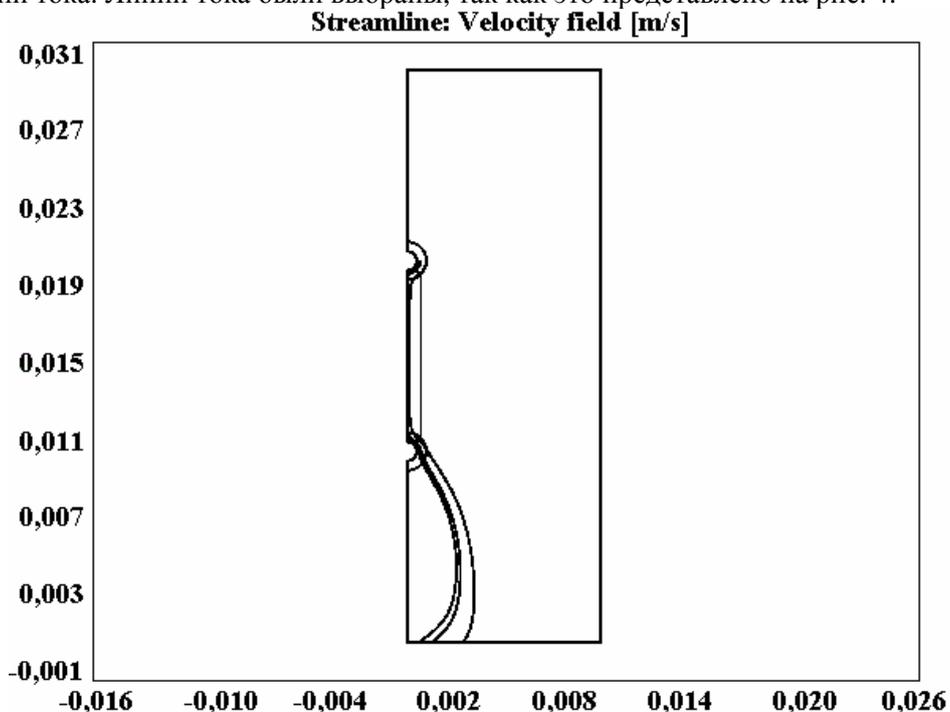


Рис. 4. Линии тока, вдоль которых рассматриваются характеристики униполярного течения

Подобные распределения позволяют лучше понять динамику ЭГД-течения. Для этого построим и проанализируем распределения вдоль этих линий тока электрической силы и модуля скорости.

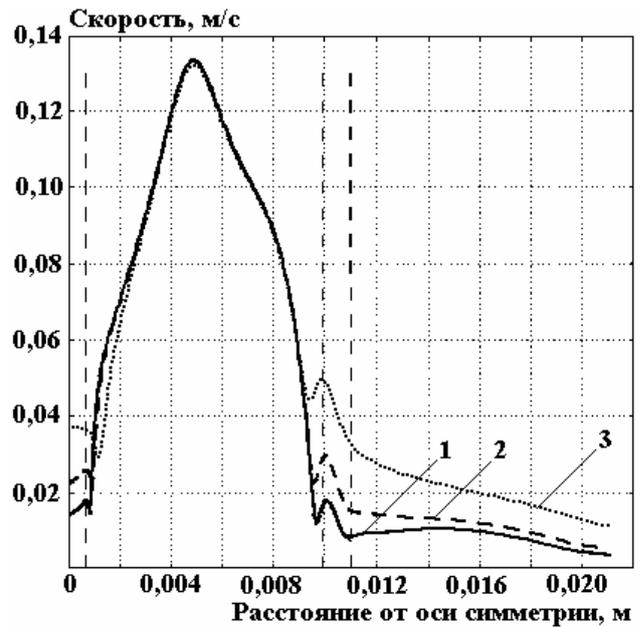
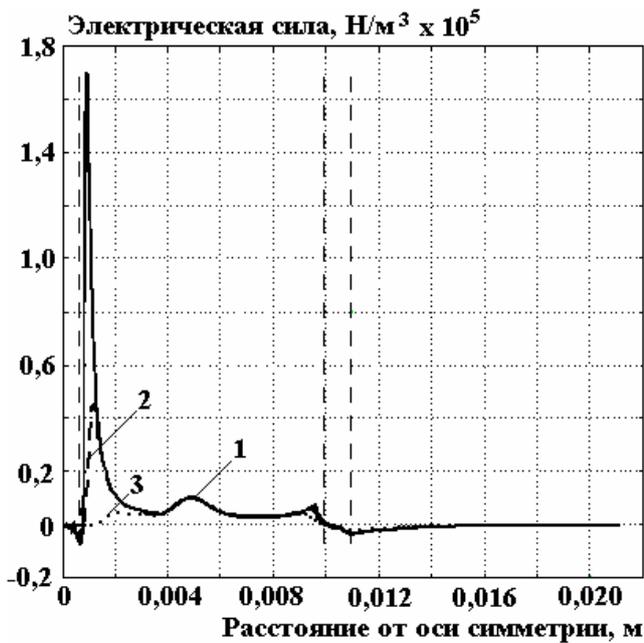


Рис. 5. Распределение кулоновской силы вдоль линий тока. 1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 1 мм

Рис. 6. Распределение модуля скорости вдоль линий тока. 1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 1 мм

Из полученных распределений для электрической силы и скорости видно, что между электродами есть зона интенсивного ускорения за счет кулоновской силы, после чего происходит торможение жидкости. За пассивным электродом в торможении жидкости также принимают участие и электрические силы. Кроме того, видно, что за пассивным электродом заряд не уничтожается, а, наоборот, накапливается. Как видно из графиков, это существенно снижает скорость в заэлектродной области

Поэтому, на наш взгляд, наиболее эффективным является не нейтрализация отработавшего заряда, а введение в жидкость заряда противоположного знака с поверхности пассивного электрода. В этом случае разноименные заряды, смешиваясь друг с другом, нейтрализуют среду в заэлектродной области.

Основной задачей в этом случае является точная балансировка процессов зарядообразования на каждом из электродов. В натурном эксперименте этого можно достигнуть подбором свойств контактов: катод-примесная добавка и анод-примесная добавка. Зарядообразование от катода можно интенсифицировать путем введения в жидкость примесей, обладающих повышенным сродством с электроном, либо изготовления электродов из материалов с пониженной работой выхода. Процесс зарядообразования на аноде можно интенсифицировать путем введения примесей с пониженной энергией ионизации. В численном эксперименте достаточно подобрать коэффициенты А и В в граничном условии (2.2).

При использовании одинаковых коэффициентов в (2.2) решение выглядит в виде встречных разноименно заряженных потоков (см. рис. 7 и 8). Видно, что компенсация противозарядов происходит в середине межэлектродного промежутка, в месте встречи противоположно заряженных струй. При этом сквозная прокачка практически отсутствует, однако нет и накопления заряда. Для реализации сквозной прокачки необходимо изменить условия зарядообразования на одном из электродов, например на катоде.

Рассмотрим результаты решения задачи, полученные при следующих токах инъекции: анод $A_+ = 7 \cdot 10^{-15}$, $B_+ = 7 \cdot 10^{-3}$, катод $A_- = 3,5 \cdot 10^{-15}$, $B_- = 7 \cdot 10^{-3}$, разность потенциалов 10 кВ.

На рис. 9 и 10 приведены распределение заряда и силовые линии электрического поля, а также линии тока жидкости и поверхностный график скорости. Видно, что ЭГД-течение в этом случае реализуется в виде двух тонких заряженных струек: положительной, распространяющейся «вниз» от поверхности верхнего положительного электрода, и отрицательной, распространяющейся в том же направлении от поверхности отрицательного нижнего электрода. Зарядовой пробки в заэлектродной области, как в случае униполярной инъекции, не образуется. Линии тока жидкости плавно обтекают пассивный электрод, не образуя возвратных вихрей, реализовано т.н. сквозное ЭГД-течение. В экспериментах подобное течение получено и подробно исследовано при использовании в качестве примеси бутанола [3]. Кроме типовых контурных графиков скорости, при анализе полезно рассмотреть рас-

пределения различных переменных вдоль выделенных линий тока. Такие распределения позволяют лучше понять динамику процесса зарядки и ускорения отдельных элементов жидкости. На рис. 11 и 12 приведены распределения скорости и кулоновских сил вдоль трех линий тока, расположенных в центральной струе ЭГД-течения на расстоянии 600 мкм, 700 мкм и 1 мм от оси симметрии модели. Как видно из рис. 11 и 12, электрическое поле за пределами межэлектродного промежутка не тормозит сквозной поток, а ускоряет его.

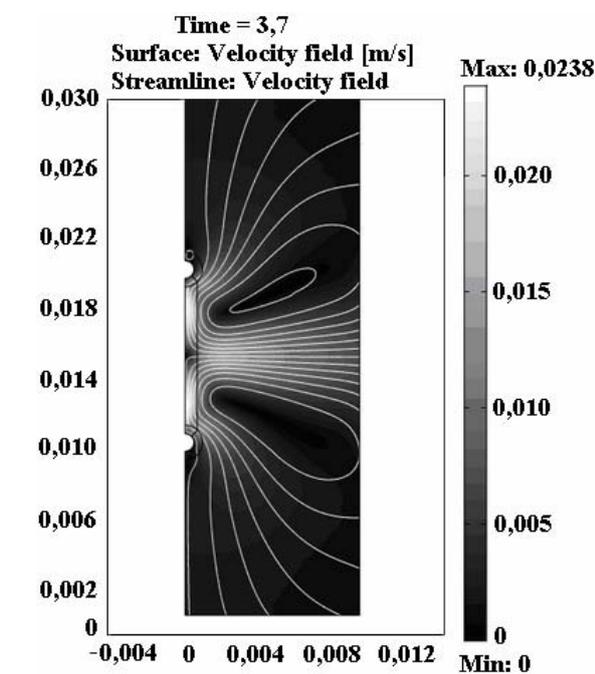
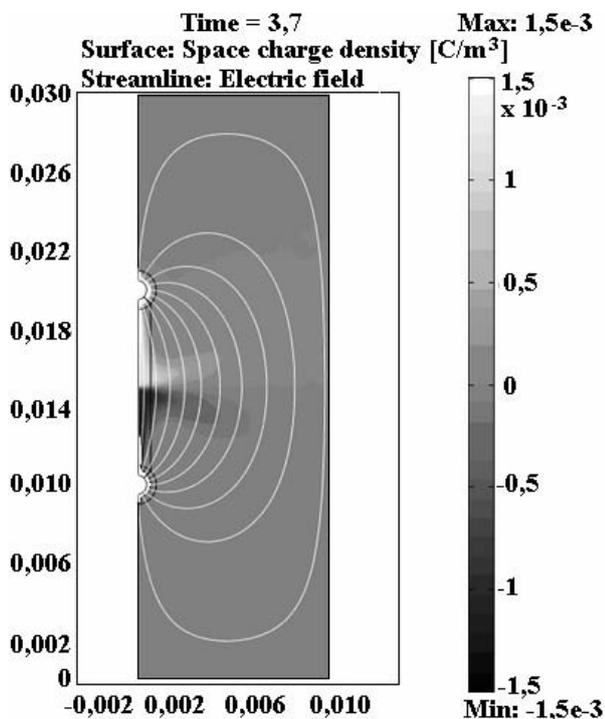


Рис. 7. Распределения плотности заряда и линий электрического поля при симметричном течении

Рис. 8. Распределения скоростей и линий тока при симметричном течении

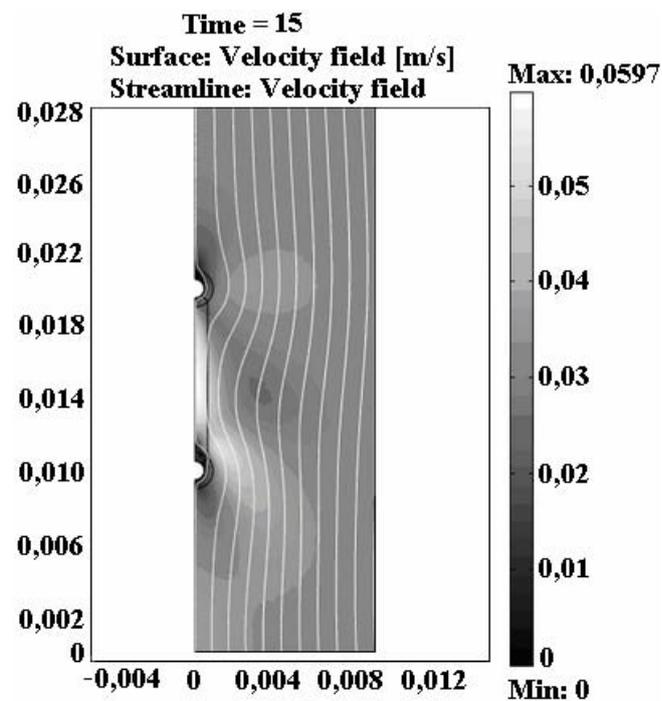
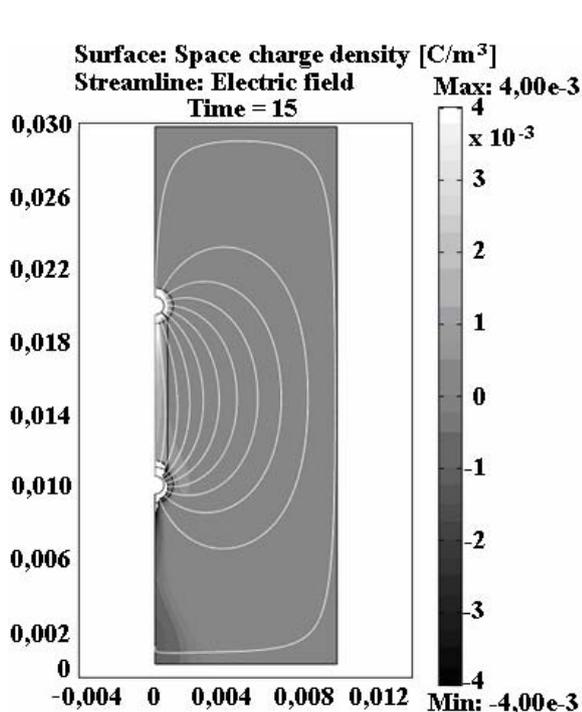


Рис. 9. Распределение заряда и линии электрического поля

Рис. 10. Контурный график распределения электрического поля

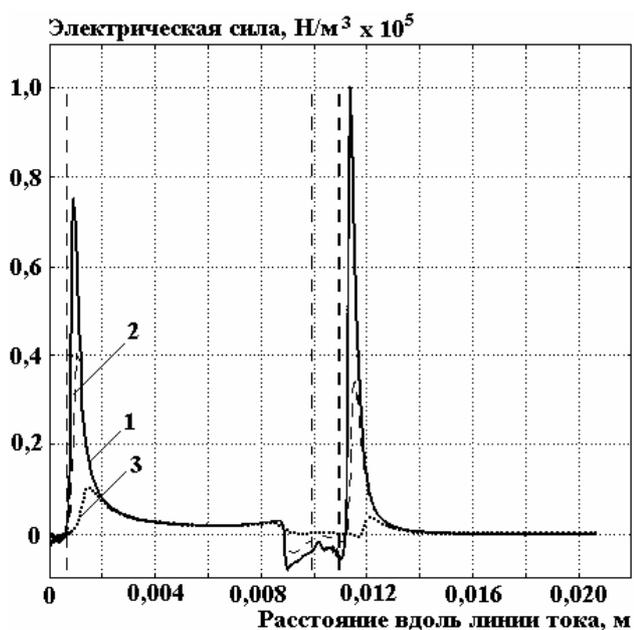


Рис. 11. График распределения кулоновской силы вдоль линий тока. 1 – 600; 2 – 700; 3 – 1 мм

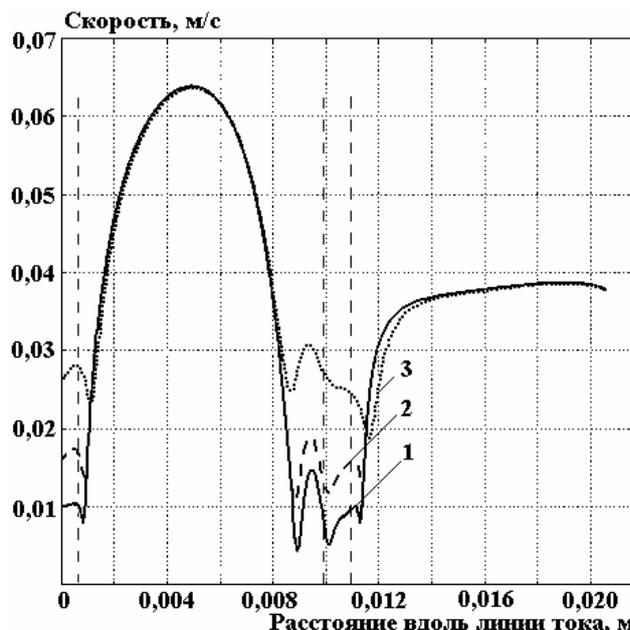


Рис. 12. График распределения модуля скорости вдоль линий тока. 1 – 600; 2 – 700; 3 – 1 мм

Поле скоростей (рис. 10 и 12) имеет ряд характерных областей:

1. Непосредственно у активного электрода имеется окружающая электрод область – «чехол» неподвижной жидкости – несколько вытянутая вверх. Аналогичная область более сложной формы имеется вокруг пассивного электрода.

2. *Область подсоса.* Как видно из рис. 10, жидкость, подходящая к активному электроду, на входе уже имеет некоторую не нулевую скорость. Это можно объяснить, если рассмотреть силы давления $\vec{f} = -\nabla p$, действующие на жидкость вдоль линий тока. Непосредственно под активным электродом имеется область пониженного давления. Это объясняется тем, что за электродом есть зона отрыва, которая возникает при обтекании препятствия из-за отрыва линий тока от электрода. В этой зоне давление имеет локальный минимум, а значит, градиент давления на входе в эту область имеет положительное значение, а на выходе — отрицательное. В обычном течении за обтекаемым телом возникают возвратные вихри. В нашем случае этого не наблюдается, поскольку за активным электродом на жидкость действует положительная кулоновская сила, компенсирующая отрицательную силу давления и ускоряющая жидкость непосредственно за электродом.

3. *Межэлектродная область ускорения.* После того как частицы жидкости приобретают положительный заряд вблизи активного электрода, на них начинает действовать сила кулоновского отталкивания, которая формирует основную зону ускорения между электродами. В результате энергия электрического поля переходит в кинетическую энергию жидкости, и скорость в максимуме достигает 6 см/с. По профилю скорости между электродами можно оценить ширину струи в центре.

Из распределения скорости, приведенного на рис. 9, видно, что между электродами движется тонкая струйка заряженной жидкости, толщина заряженной струи составляет 1,5–2 мм, что равняется 3–4 радиусам активного электрода. Это значение хорошо согласуется со значениями, полученными на практике [3].

4. *Приэлектродный микровихрь.* Перед вторым электродом имеется локальная зона с очень маленькой скоростью (порядка нескольких миллиметров в секунду), однако жидкость в этой зоне течет в обратном направлении, и линии тока в этой области имеют замкнутый «вихревой» характер. На существование этого микровихря впервые указывалось в работе [3] при анализе экспериментальных данных о сквозном и встречных течениях. Рассмотрим подробнее процессы, происходящие здесь. Для начала, чтобы понять природу происходящих процессов, необходимо рассмотреть плотность распределения электрического заряда на фоне линий тока приэлектродного течения.

Из графика следует, что вблизи пассивного электрода наблюдается микроциркуляция отрицательного заряда в сторону положительного электрода, образуется встречный микровихрь. Это, естественно, происходит под действием обратной кулоновской силы, локализованной у пассивного про-

тивноэлектрода, которая и создает отрицательно заряженный встречный минипоток. Этот поток несколько притормаживает основной и приводит к локальному падению кинетической энергии течения. Вместе с тем он приводит к частичной нейтрализации основного положительного заряда, поступающего от активного электрода, и частичной перезарядке потока, попадающего в хвостовую часть течения.

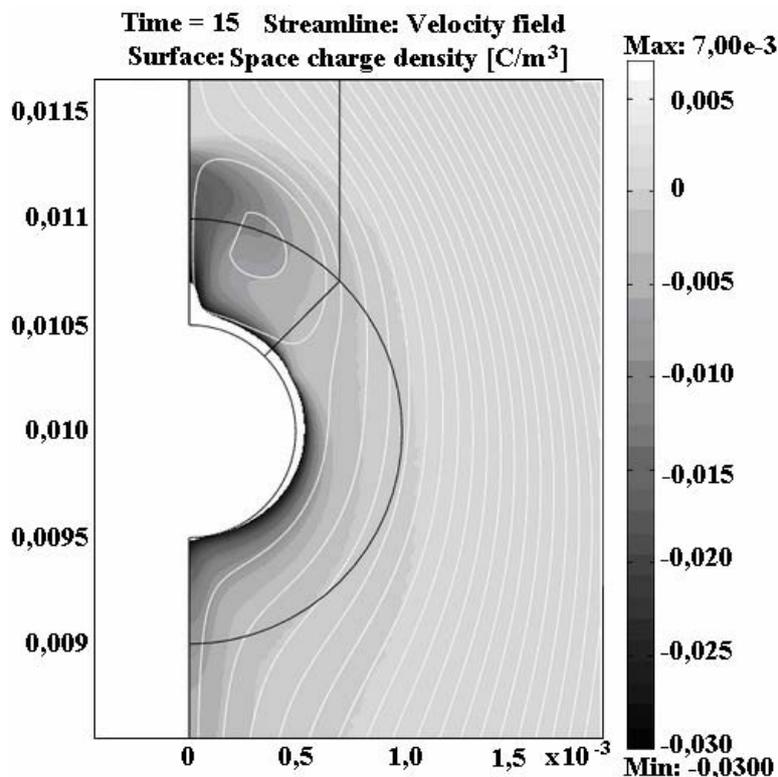


Рис. 13. Распределение электрического заряда и линии тока в окрестности пассивного электрода

Зона вторичного ускорения. В результате перезарядки у пассивного электрода в хвосте течения появляется вторичный локальный максимум действующих кулоновских сил. Это в свою очередь приводит к тому, что за пассивным электродом образуется зона повторного ускорения жидкости, которая и формирует тот тип течения, который в литературе называется *сквозным* [2,3,9].

Характерные зоны сквозного ЭГД-течения особенно хорошо видны (рис. 12), если рассмотреть распределение модуля скорости вдоль линий тока. Непосредственно перед активным электродом наблюдается первая зона активного ускорения жидкости, перед пассивным электродом имеется локальный максимум возвратного микровихря, а за пассивным электродом – зона вторичного ускорения жидкости.

Затем скорость течения выходит на стационар. Это объясняется тем, что на отрицательный заряд за пассивным электродом электрическая сила действует только в малой заэлектродной области (см. рис. 11).

В случае сквозного ЭГД-течения в результате введения заряда как с активного, так и с пассивного электрода происходит их взаимная компенсация, в заэлектродной области не образуется зарядовая пробка, тормозящая сквозную прокачку жидкости.

Описанная структура сквозного ЭГД-течения является оптимальной для организации работы ЭГД-насоса электрохимического типа и выведения кинетической энергии ЭГД-течения во внешний контур. Такого рода ЭГД-насос целесообразно применять для создания течений по замкнутому каналу, необходимых для реализации работы ЭГД-теплообменников. Для повышения расхода возможно также использование нескольких параллельных проводов либо сеточных электродов.

Заключение

Проведено компьютерное моделирование процесса формирования и развития ЭГД-течений в симметричной системе электродов типа провод–провод на основе полной системы ЭГД-уравнений в двухмерном случае. В работе впервые рассмотрена связь уровня зарядообразования от локальной напряженности поля в приэлектродной области.

Приведен анализ результатов компьютерного моделирования ЭГД-течений для случая униполярной инъекции, симметричной биполярной и несимметричной биполярной инъекции.

Показано, что в случае униполярной инжекции образуется зарядовая пробка, мешающая сквозной прокачке. При симметричной инжекции сквозной прокачки нет, однако нет и накопления заряда, так как имеется зона нейтрализации заряда, расположенная в середине МЭП.

В случае несимметричной биполярной инжекции в результате введения заряда как с активного, так и с пассивного электрода реализуется сквозное ЭГД-течение, в котором происходит взаимная компенсация зарядовых струй, текущих от каждого из электродов в заэлектродной области. При этом вместо образования зарядовой пробки, тормозящей сквозную прокачку жидкости, за межэлектродным промежутком появляется зона вторичного ускорения жидкости, способствующая сквозной прокачке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stuetzer O.M.* Ion Drag Pressure Generation // *J. Appl. Phys.* 1959. Vol. 30. № 7. P. 984–994.
2. *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: ЛГУ, 1989.
3. *Буянов А.В., Стишков Ю.К.* Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов // *ЖТФ.* 2004. Том 74. Вып. 8. С. 120–123.
4. *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.*
5. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Nithiarasu P.* *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*, 6th edition, Elsevier, 2005.
6. *Жакин А.И.* Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках // *Успехи физических наук*, март 2006.
7. *Proceedings of 7th Intern. Conf. On Cond. And Breakd. In Dielectric Liquids (I.C.D.L.), Berlin – West – Germany, 1981.*
8. *Афанасьев С.Б., Елагин И.А., Стишков Ю.К.* Электрофизические процессы в жидкостях и газах. Раздел 2. Электрогидродинамические процессы в жидкостях. СПб., 2007.
9. *Глуценко П.В., Стишков Ю.К.* Электрические процессы в технике и химии. Моделирование структуры сквозного ЭГД-течения в системе провод–провод // *Электронная обработка материалов.* № 4. 2007. С. 34–41.
10. *Грошев А.К., Михайлов С.А., Стишков Ю.К.* Влияние свойств границы электрод–жидкость на высоковольтную проводимость жидких диэлектриков // *Тезисы докладов III Межреспубликанского семинара.* Гродно, 1992.

Поступила 21.07.09

Summary

In this paper we presented a computer model electrohydrodynamic (EHD) flow through a complete system of equations in a symmetric system of electrodes of the wire-wire. Based on this model were carried out three numerical experiments: the case of unipolar injection, symmetric and asymmetric bipolar injection. As a result, a comprehensive analysis of these numerical experiments it was found that structure of the pass-through EHD-flow in the case of the asymmetric bipolar injection is ideal for the realization of cross-cutting move fluid on the closed channel, necessary for the operation of EHD-pump.
