

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНЖЕКЦИОННОГО ТИПА

И.А. Ашихмин, Ю.К. Стишков

*НОЦ «Электрофизика» физического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета,
ул. Ульяновская, д. 3, Петродворец, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия,
Stishkov@paloma.spbu.ru*

Данная статья является продолжением цикла работ по электрогидродинамическим преобразователям электрохимического типа. Ее цель – компьютерное моделирование процесса формирования и развития ЭГД-течений в симметричной и сеточной системе электродов, находящейся в канале с диэлектрическими стенками. Исследованы три типа сеточных ЭГД-преобразователей: расфокусирующая, симметричная и фокусирующая системы. Объяснены физические причины возникновения возвратных вихрей в расфокусирующих системах электродов: формирование в заэлектродной области зарядовой пробки, тормозящей сквозную прокачку жидкости. Показано, что для устранения зарядовой пробки необходимо размещать один противозлектрод вдоль оси течения и подбирать примесный состав жидкости таким образом, чтобы инжекция шла на поверхности не только активного электрода, но и пассивного. При этом в заэлектродной области образуется биполярно заряженная структура, компенсирующая возвратный тормозящий эффект. Впервые для усиления эффекта сквозной прокачки предложено использовать фокусирующие системы электродов.

УДК 53.072, 53.072.127, 621.317.329

ВВЕДЕНИЕ

Устройства, которые способны выводить ЭГД-течения из зоны силового воздействия электрического поля за пределы межэлектродного пространства и доставлять жидкий диэлектрик по замкнутому гидравлическому контуру к обслуживаемым объектам, чаще всего называют электрогидродинамическими насосами (ЭГДН). В 1959 году Штуцер [1] разработал такие устройства для разомкнутого гидравлического контура и экспериментально доказал возможность создания избыточного давления таким течением, а значит, и выхода течения жидкости за пределы межэлектродного пространства, обнаружив перепад давления на трубчатом манометре. В 1960 году он построил такой же ЭГД-насос [2] в замкнутый гидравлический контур, заполненный разного рода жидкими диэлектриками, и исследовал его работу в режиме циркуляции текучей среды по контуру.

Наиболее распространенной и, как оказалось (это будет показано далее), довольно неудачной конструкцией ЭГД-насоса является система типа “игла-кольцо”, предложенная Штуцером. Конструктивные особенности различных устройств обычно связаны с изменением формы и размещения электродов [3, 4]. По мнению разработчиков, механизм работы этих конструкций аналогичен работе соответствующих устройств в газах: у острия игольчатого электрода возникает аналог «короны» (известной в жидкостях как эффект Вина), вызывающей появление в жидкости объемного заряда, а следовательно, и направленного ее движения [5, 6]. Такая система должна работать в любой слабопроводящей жидкости, откуда и название ЭГД-насос, нередко с припиской «для перекачки слабопроводящих сред [4]». В некоторых современных работах их называют ЭГД-насосами, работающими за счет диссоциации жидкости в сильном электрическом поле [15].

Как уже отмечалось выше, основной проблемой ЭГД преобразования является получение одностороннего движения среды. Наблюдения показали, что в реальных конструкциях ЭГД-преобразователей большая часть энергии идет на образование внутренних вихрей. Как известно, ЭГД-течение – это следствие эффекта преобразования энергии движения ионов, то есть электрического тока, в энергию механического движения среды [5]. Электрический ток протекает в основном в пределах межэлектродного промежутка, а движение жидкости часто необходимо вывести во внешний контур. Для этого следует устранить причины, способствующие замыканию течения между электродами. Одним из основных факторов является конфигурация силовых линий электрического поля внутри межэлектродного промежутка. В классических системах типа “игла-кольцо” силовые линии поля в области кольца расходятся от оси к кольцу и обладают расфокусирующим действием, способствующим образованию внутренних вихрей. Более удачной считается система электродов “провод-провод” или “сетка-сетка”. Эти системы при одинаковом диаметре проволочных электродов

имеют симметричное распределение электрического поля в межэлектродном промежутке. В работе [8] приведено описание ЭГД-течений в симметричной системе электродов и впервые описано сквозное ЭГД-течение, возникающее из-за электрохимической асимметрии. Физические проблемы образования сквозного течения в геометрически симметричных системах решены в работе [9].

С учетом этих данных было введено [10, 18–20] понятие «ЭГД-преобразователь», но не насос, то есть понимать его следует как устройство для преобразования энергии электрического тока в энергию механического течения рабочей жидкости. При этом в качестве рабочей жидкости используется не любая слабопроводящая жидкость, а обладающая определенным набором электрофизических и электрохимических свойств. Структура и направление ЭГД-течений обусловлены свойствами границы раздела электрод-жидкость, и, следовательно, электрофизические свойства жидкости, а также свойства смоченной поверхности электродов являются основными конструктивными признаками преобразователя.

Простейшей опорной конструкцией преобразователя может служить система двух параллельных проводов в канале из диэлектрического материала. Эта система работает в режиме сквозной прокачки, например при использовании в качестве рабочей жидкости трансформаторного масла с добавлением бутилового спирта.

Основные отличия ЭГД-преобразователя нового типа от традиционных конструкций ЭГД-насосов – это полное отсутствие геометрической асимметрии электродов; фокусирующее действие электродной системы, способствующее устранению внутренних вихрей; возможность использования электрохимической асимметрии для получения прокачки. Электрохимическая асимметрия достигается благодаря либо электродам, выполненным из различных материалов [11], либо различным покрытиям электродов, либо рабочей жидкости с полярными добавками. При прочих равных условиях интенсивность сквозной прокачки существенно зависит от концентрации полярных примесей.

В работах [12–14, 21] приведены результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования сквозного ЭГД-течения в симметричной системе электродов типа “провод-провод”. Видно, что при правильном подборе коэффициентов «инъекции» реализуется режим сквозного ЭГД-течения без возникновения внутренних вихрей. Совместный анализ результатов показал, что сквозное течение образуется в результате появления в заэлектродной области трехслойной биполярной зарядовой структуры.

Помимо системы “провод-провод”, отдельный интерес представляют сеточные системы электродов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование процесса формирования и развития ЭГД-течений в симметричной и сеточной системе электродов, находящейся в канале с диэлектрическими стенками. ЭГД-течения инициируются пространственным зарядом, инжектируемым с поверхности геометрически подобных электродов.

Полная система ЭГД-уравнений имеет вид

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

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

$$\Delta \phi = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_2 - z_2 \mu F c_2 \nabla \phi) = \alpha c_1 c_2 - \vec{v} \cdot \nabla c_2.$$

Здесь: ρ – объемная плотность заряда; γ – плотность вещества; \vec{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; μ – подвижность; α – коэффициент рекомбинации; c_1, c_2 – концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно; z_1, z_2 – зарядовые числа. Все константы в модели брались из справочных данных [22].

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

1. Электростатика. Для уравнения Пуассона на электродах задавалась разность потенциалов 10 кВ. Внешняя область по условию должна представлять собой открытое пространство, в котором потенциал имеет нулевую асимптотику. Для моделирования такой постановки задачи использовался бесконечный домен с граничным условием на бесконечности равенства нулю потенциала. Бесконечный домен – это область нашей модели, на которой задается преобразование координат по формуле

$$x' = x_0 \frac{\Delta x}{x_0 + \Delta x - x}, \quad (5)$$

где x_0 – координата на границе нашей модели; Δx – ширина домена; x' – координата в новой системе отсчета; x – координата в старой системе. Таким образом, это преобразование «растягивает» домен на бесконечности и позволяет построить модель с граничными условиями по электростатике на бесконечности. Для остальных уравнений расчет в этой области не производится.

2. Гидродинамика. Для уравнения Навье-Стокса на электродах и стенках канала задавалось условие прилипания $\vec{v} = 0$. На правой и левой границах задавалось условие «открытой границы»:

$$\left[-p\hat{I} + \eta \begin{pmatrix} 2\frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & 2\frac{\partial v_y}{\partial y} \end{pmatrix} \right] \cdot \vec{n} = 0. \quad (6)$$

3. Уравнение Нернста – Планка. На диэлектрических стенках задавалось условие изоляции, на входе и выходе канала – условие полного выноса заряда. Для этого на границе ставится следующее условие на нормальную составляющую потока:

$$\vec{J} \cdot \vec{n} = (-D\nabla c - zbFc\nabla\phi + c\vec{v}) \cdot \vec{n}.$$

На обоих электродах задается ток инжекции по формуле типа Шоттки [9]:

$$\vec{J} = A \exp\left(\frac{B\sqrt{|\vec{E}|}}{kT}\right) \cdot \vec{n}, \quad (7)$$

где коэффициент A зависит от типа рассматриваемых электродов и соответственно определяется из ВАХ, а

$$B = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}.$$

Для моделирования электрохимической асимметрии отношение коэффициентов A для активного и пассивного электродов в нашей модели было равно 3:1, если не указано иное. Кроме этого типа инжекции в данной модели при величинах электрического поля порядка 10^8 В/м может наблюдаться инжекция по формуле Фаулера-Нордгейма [9], но, как показывает расчет уравнения Пуассона, для нашей модели максимальное значение электрического поля составляет порядка 10^7 В/м, поэтому данный тип инжекции можно не учитывать.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. РАСФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДОВ

Рассмотрим ЭГД-преобразователь, система электродов которого состоит из одного активного и двух пассивных проволочных электродов одинакового диаметра, размещенных в щелевом канале с плоскими диэлектрическими стенками (рис. 1). Ширина щели была выбрана равной 15 мм, длина – 30 мм. В таком канале задачу можно считать двумерной. На левый электрод (активный) подается потенциал +5 кВ, на оба правых (пассивных) – -5 кВ, расстояние между электродами $L = 10$ мм, расстояние в паре электродов $D = 5$ мм, радиус электродов – 50 мкм. Эта система является аналогом системы типа «игла-кольцо». Аналогия состоит в том, что центральная заряженная струйка от активного

электрода распространяется вдоль оси, а поверхность пассивных электродов расположена на некотором отдалении D от оси течения. Это приводит, как будет показано далее, к неэффективной работе преобразователя.

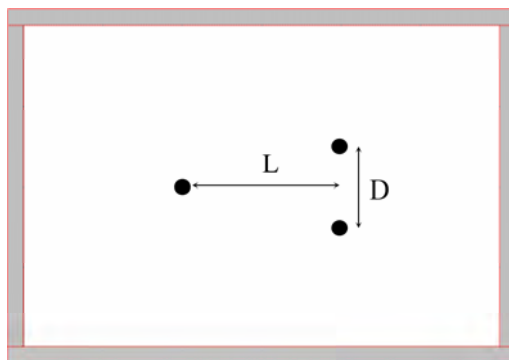


Рис. 1. Геометрия модели

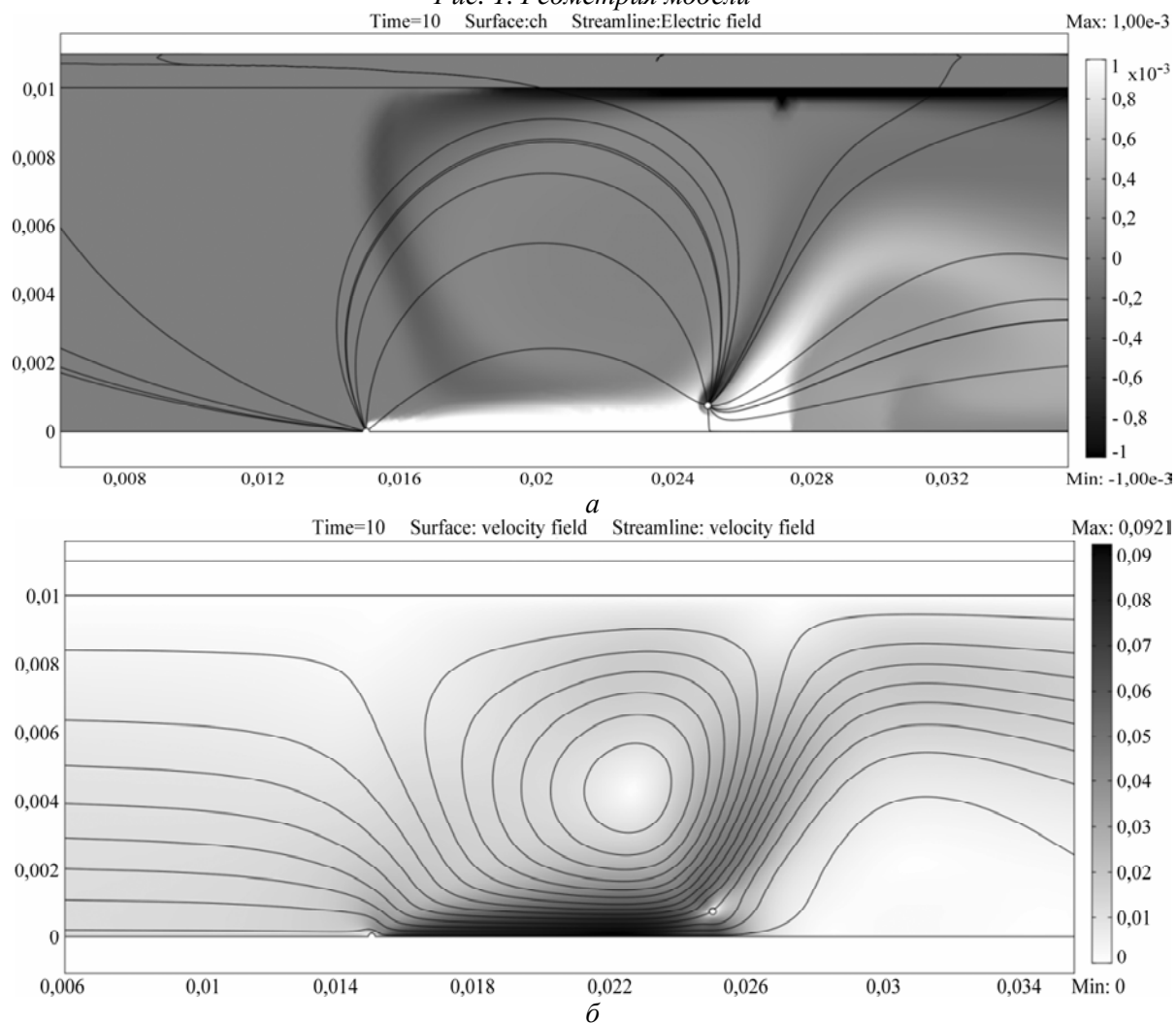


Рис. 2. Распределение плотности электрического заряда и силовых линий электрического поля (а), а также скоростей и линии тока жидкости (б)

На рис. 2,а представлены результаты расчета: распределения заряда и силовых линий электрического поля в такой системе электродов. Ввиду симметрии модели распределения приведены только в верхней области кюветы. Видно, что от активного электрода распространяется одноименно заряженная струйка (светлая), которая ускоряется в межэлектродном промежутке. На этом участке электрическое поле и электрические силы направлены к пассивным электродам и ускоряют жидкость вдоль плоскости симметрии модели. Когда струйка попадет в промежуток между двумя пассивными электродами, то направление электрического поля меняется: силовые линии загибаются от плоскости симметрии к пассивным электродам. В этой области электрические силы приобретают нормальную к оси течения составляющую и приводят к изменению направления (дефокусировке) течения: раздвое-

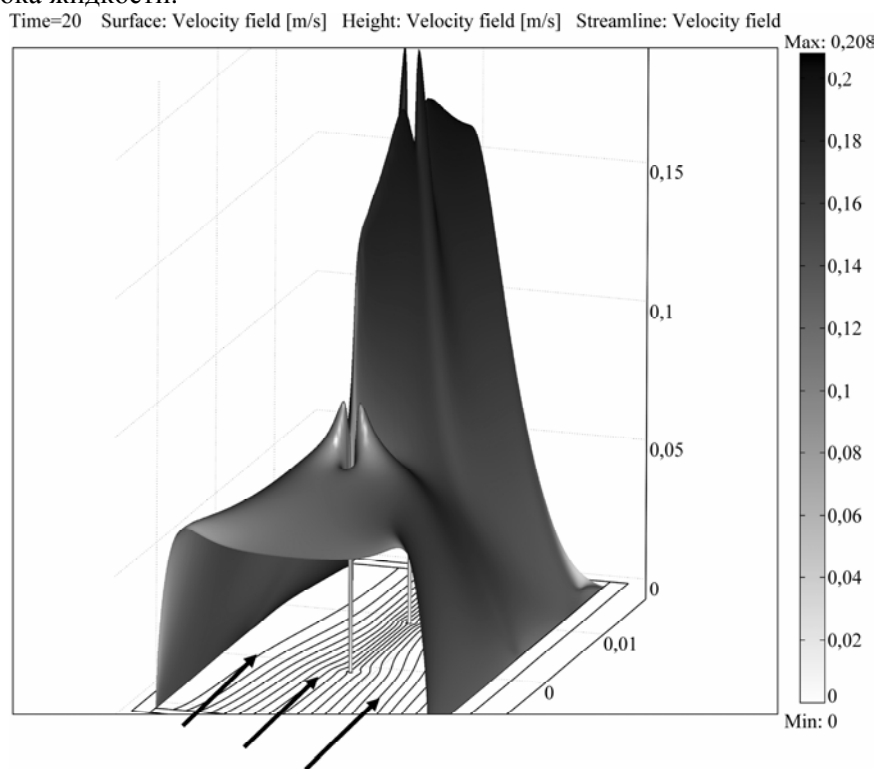
нию струи в направлении, нормальном к оси. В области за электродами направление электрических сил изменяется на обратное к направлению течения жидкости. Под областью за электродами следует понимать область, расположенную вдоль плоскости симметрии течения. Под действием тормозящего эффекта осевая составляющая скорости течения резко падает, и в заэлектродной области образуется застойная (светлая) зона, заряженная одноименно с активным электродом (рис. 2,б). Эта зарядовая пробка мешает прохождению сквозного течения: линии тока жидкости огибают ее и способствуют образованию возвратных вихрей.

Заряженные струйки, обтекая зарядовую пробку, достигают поверхности пассивных противозлектродов. При наличии некоторого уровня инъекции с пассивных электродов в жидкость инжектируется заряд противоположного знака, и струйка, обтекающая противозлектрод, приобретает биполярную структуру. Поэтому электрические силы вновь приобретают составляющую, направленную слева направо, то есть в направлении сквозного течения. Эти силы способствуют сквозной прокачке жидкости. В результате часть жидкости, контактировавшая с пассивным электродом и поэтому получившая от него противозаряд, огибая зарядовую пробку, протекает к задней части канала, а внешняя часть струйки, имеющая одноименный с активным электродом заряд, заворачивает обратно к активному электроду, образуя возвратный вихрь. На рис. 2,а видна биполярная зарядовая структура сквозной и возвратной струек (чередование темной и светлой областей). Видна также зарядовая пробка (светлая) в заэлектродной области, лежащая у прямой D вдоль центральной оси течения (см. рис. 1).

Моделирование показало, что эффект образования внутренних вихрей тем сильнее, чем дальше от плоскости симметрии расположены пассивные электроды. Для снижения эффекта дефокусировки необходимо размещать пассивные электроды непосредственно на оси течения. В этом случае целесообразно применять не пару, а всего один пассивный электрод.

СИММЕТРИЧНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДОВ

На рис. 3 приведены результаты расчетов для симметричной системы электродов типа провод-провод, расположенных на центральной плоскости канала с диэлектрическими стенками. Видно, что при правильном подборе коэффициентов «инъекции» (1:3) в канале реализуется режим сквозного ЭГД-течения без образования внутренних вихрей. Совместный анализ результатов показал, что в такой системе зарядовая пробка практически не образуется, а сквозное течение реализуется в результате образования в заэлектродной области трехслойной (чередование светлой и темной областей) биполярной зарядовой структуры. Рассмотрим типичный результат численного решения системы ЭГД-уравнений. Ширина канала здесь выбрана равной 1,5 см, расстояние между электродами – 1 см, отношение токов инъекций составляет 1:3. На рис. 3 приведено распределение модуля скорости течения и линии тока жидкости.



a

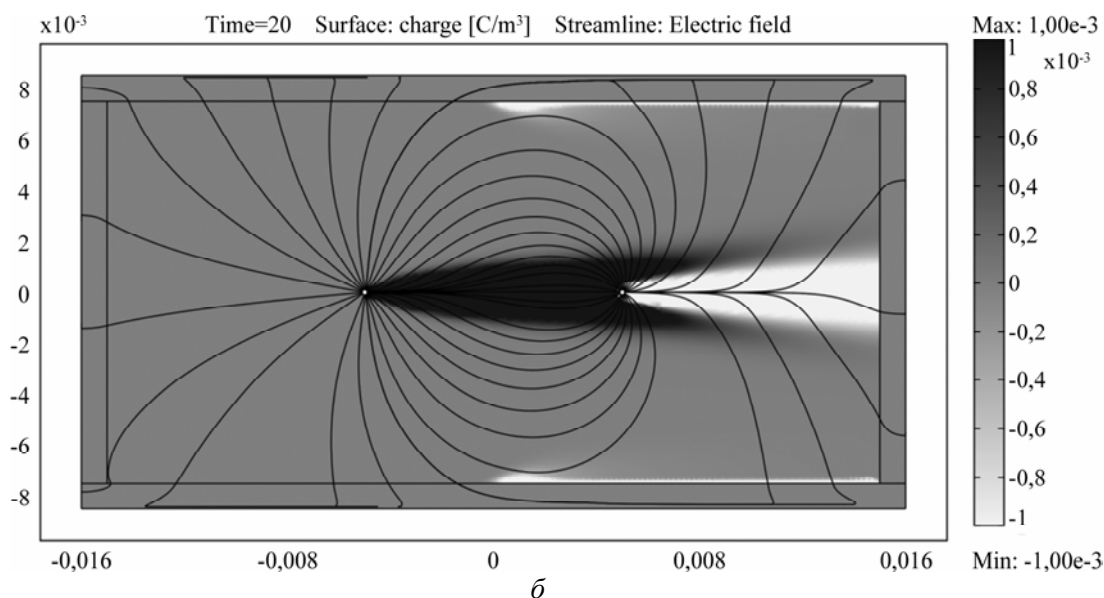


Рис. 3. Трехмерное распределение скоростей и линии тока жидкости (а), а также плотности электрического заряда и линий электрического поля (б) для системы провод-провод

На рис. 3 представлена типовая кинематическая и зарядовая структуры сквозного ЭГД-течения. На зарядовой структуре видно, что от активного электрода распространяется струйка жидкости (темная), заряженной одноименно с активным электродом. В данном случае при подходе к пассивному электроду расфокусировки не происходит, поскольку силовые линии электрического поля в этой области направлены к противоэлектроду, концентрируя зарядовую струйку вдоль оси течения. Поэтому центральная струйка ускоряется вплоть до подхода к его поверхности. У лобовой поверхности пассивного электрода центральная струйка раздваивается и обтекает противоэлектрод вдоль его боковых поверхностей, образуя за ним две струйки, расходящиеся под острым углом. Однако в этом случае на поверхности пассивного электрода образуется заряд противоположного знака (светлый). Поэтому внутри струек, заряженных одноименно с активным электродом, распространяется внутренняя струйка, заряженная одноименно с пассивным электродом. При этом противоположно заряженные струйки притягиваются, а результирующая электрическая сила направлена, как и ранее, вдоль оси течения и не образует в заэлектродной области неподвижной зарядовой пробки. Именно эта вафлеобразная биполярная зарядовая структура и обеспечивает эффективный режим сквозного течения без образования внутренних вихрей.

Итак, как было показано выше, что если в качестве противоэлектрода используются два электрода, то система получается расфокусирующей. При этом в ней возникают внутренние вихри, которые уменьшают сквозную прокачку. Когда мы переходим к симметричным системам электродов, то получаем эффективную сквозную прокачку без внутренних вихрей.

ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДОВ

Возникает вопрос: а что будет, если вместо одного активного выбрать пару электродов, смещенных относительно центральной плоскости канала? В этом случае получаем геометрию системы, обратную той, что рассматривали для расфокусирующих систем.

Рассмотрим для начала получившиеся распределения электрического поля и заряда в установленном режиме для фокусирующей системы электродов: из графиков распределения заряда (см. рис. 4) видно, что от пары активных электродов распространяются две одноименно заряженные (темные) струи, которые при подходе к противоэлектроду, благодаря стягиванию силовых линий поля, притягиваются друг к другу. За пассивным электродом эффект «фокусировки» усиливается, так как с его поверхности стекает и распространяется струйка, заряженная одноименно с ним (светлая). На эту струйку электрическое поле оказывает ускоряющее, а не тормозящее действие. Поэтому за электродами, как и в случае симметричной двухэлектродной системы типа «провод-провод», распространяется вафлеобразная биполярная зарядовая структура, фокусирующая течение вдоль центральной оси. Результирующее действие электрических сил в заэлектродной области носит ускоряющий характер. Это приводит к значительному ускорению жидкости не только в пределах межэлектродного промежутка, но и за ним. Зарядовая пробка не образуется.

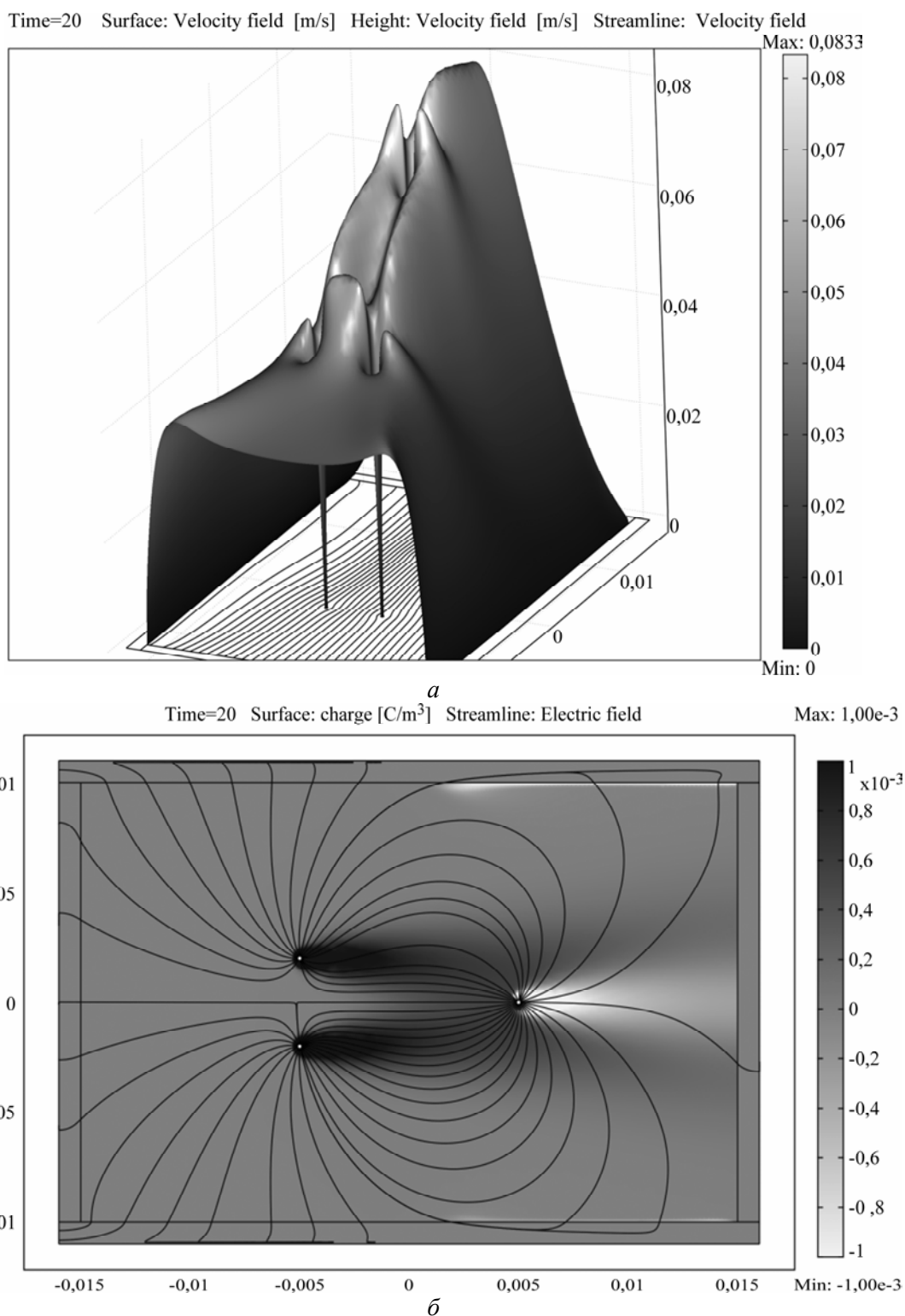


Рис. 4. Трехмерное распределение скоростей и линии тока жидкости (а), а также плотности электрического заряда и линий электрического поля (б) для системы два провода-провод

На графиках распределения скоростей (см. рис. 4) видно, что в пределах межэлектродного промежутка (МЭП) имеются две струи, формирующие, благодаря взаимному притяжению, за пассивным электродом единый профиль и образующие в заэлектродной области, благодаря слиянию двух струй, единую биполярно заряженную струйку, которая существенно ускоряется. Из этого графика следует, что у нас в системе сформировалось сквозное течение без внутренних вихрей. Зарядовые струи на выходе из канала имеют выраженную слоистую структуру, в пределах которой происходит активная рекомбинация противоположно заряженных ионов.

Отличительной особенностью этого типа течения является то, что за пассивным электродом мы видим не застойную зону, как в случае расфокусирующей системы, а зону интенсивного ускоре-

ния, благодаря чему эффект сквозной прокачки усиливается. Это объясняется, во-первых, тем, что за пассивным электродом образуется вафлеобразная биполярная зарядовая структура, которая интенсифицирует ускорение и позволяет уменьшить вынос заряда. Во-вторых, поскольку обтекание пассивного электрода двумя струйками происходит сбоку, то уменьшаются потери на лобовое обтекание противозлектрода.

Расчитанные энергетические характеристики фокусирующего преобразователя таковы:

- затрачиваемая мощность: 2,8 мВт
- джоулев нагрев: 1,1 мВт
- диссипация: 1,1 мВт

Следовательно, КПД фокусирующего преобразователя составляет ~20%. Довольно высокое значение КПД обусловлено прежде всего тем что за счет объединения двух струй у пассивного электрода происходит расширение результирующей струи за пассивным электродом и уменьшаются потери энергии на обтекание противозлектрода.

ВЫВОДЫ

1. В данной работе исследованы три типа сеточных ЭГД-преобразователей: “провод–два провода” (расфокусирующая), “провод-провод” (симметричная) и “два провода-провод” (фокусирующая). Показано, что наихудшими свойствами обладает расфокусирующая система, поскольку в ней возникают внутренние вихри, которые ухудшают прокачку жидкости.

2. Рассчитана структура зарядовой пробки в расфокусирующих системах электродов, тормозящей сквозную прокачку жидкости.

3. Показано, что для устранения зарядовой пробки необходимо размещать не два, а один противозлектрод вдоль оси течения и подбирать примесный состав жидкости таким образом, чтобы инжекция шла на поверхности не только активного, но и пассивного электрода. При этом в заэлектродной области образуется биполярно заряженная структура, компенсирующая возвратный тормозящий эффект.

4. Для усиления ускорения жидкости за пределами МЭП целесообразно использовать систему электродов, состоящую из двух активных и одного пассивного электродов, фокусирующую течение в центральной плоскости плоского канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stuetzer O.M. Ion Drag Pressure Generation. *J. Appl. Phys.* 1959, **30**(7), 984–994.
2. Stuetzer O.M. Ion Drag Pumps. *J. Appl. Phys.* 1960, **31**(1), 136–146.
3. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев, 1977. 320 с.
4. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Электродинамические течения в жидких диэлектриках*. Л.: Издательство ЛГУ, 1989. 174 с.
5. Янговский Е.И. Об изотермической и неизотермической электроконвекции в жидких диэлектриках. *Тез. докл. 9-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике*. Рига, 1978. Т.1. С. 182.
6. Апфельбаум М.С., Янговский Е.И. О силе, действующей на игольчатый электрод, и вызываемых ею течениях. *Магнитная электродинамика*. 1977, (4), 35–38.
7. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Макаров П.А. Электродинамические преобразователи. *Магнитная гидродинамика*. 1982, (2), 120–125.
8. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Рычков Ю.М. Объемный заряд и ЭГД-течения в симметричных системах электродов. *Электронная обработка материалов*. 1982, (1), 59–61.
9. Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования. *Докл. АН СССР*. 1986, **288**(4), 861–865.
10. Стишков Ю.К. ЭГД-преобразователи электрохимического типа. *Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. физ.* 1984, (22), 26–31.
11. 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. С. 40.
12. Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности кинематической структуры электродинамического течения в системах электродов “провод-провод” и “провод-плоскость”. *ЖТФ*. 2003, **73**(8), 34–39.
13. Glushchenko P.V., Stishkov Y.K. Modeling of the Through EHD-flow Structure in a Wire-wire System. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007, **43**(4), 257–264.

14. Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование сквозного ЭГД-течения в симметричной системе электродов на основании полной системы уравнений ЭГД. *Труды СПЭЭЖГ СПб*: СПбГУ, 2009. С. 169–173.
15. Pearson M.R. and Seyed-Yagoobi J. Advances in Electrohydrodynamic Conduction Pumping. *Proceedings of 16th International Conference on Dielectric Liquids*. France, pp. 8–13, June 2008.
16. Болога М.К., Кожевников И.В. и др. Теплообмен при электрогидродинамических течениях. *Тепловые процессы в технике*. 2010, (11), 507–511.
17. Bologa M.K., Grosu F.P. and Kozhevnikov I.V. Features of Electrohydrodynamic Flows in a Multielectrode System. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007, **43**(6), 434–438.
18. А.с. 1195876. *Многоступенчатый ЭГД-преобразователь*. Болога М.К., Молдавский Л.М. и др. 14.05.84 г. ДСП.
19. А.с. 1353295. *Многоступенчатый ЭГД-преобразователь*. Болога М.К., Кожевников И.В. и др. 28.02.86 г. ДСП.
20. Болога М.К., Кожевников И.В. и др. Теплообмен при электрогидродинамических течениях. *Тепловые процессы в технике*. 2010, (11), 507–511.
21. Стишков Ю.К., Дерновский В.Л., Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожевников И.В. Влияние размеров межэлектродного промежутка на кинематику ЭГД-течений. *Электронная обработка материалов*. 2006, **42**(6), 28–36.
22. Адамчевский И. *Электрическая проводимость жидких диэлектриков*. Л.: Энергия, 1972.

Поступила 26.10.11

После доработки 05.12.11

Summary

This work is a continuation of work on electrohydrodynamic converters of electrochemical type. The goal of this work was a computer simulation of the formation and development of the EHD flow in symmetric and grid electrode system, located in a channel with dielectric walls. Three types of grid EHD converters was investigated: defocusing, symmetrical and focusing. Physical cause of the return of vortices was explained in defocused electrode system: the formation of a charge plug behind the passive electrode, retarding the pass-through flow. It is shown that to eliminate the charge plug, it is necessary to place a counter electrode along the axis of the flow and pick up the impurity composition of the liquid so that the injection was not only on the surface of the active electrode, but also on the surface of the passive. For the bipolar electrode is formed charged structure compensates for the inhibitory effect of the return. For the first time through enhancement of the effect of pumping is proposed to use the focusing electrode system.
