

Компьютерное моделирование инжекционного механизма возникновения ЭГД-течений в жидкостях с повышенным уровнем низковольтной проводимости

* Ю. К. Стишков, Д. В. Богданов

Научно-образовательный центр «Электрофизика» физического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета,
ул. Ульяновская, 1, Старый Петергоф, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия,
* e-mail: y.stishkov@spbu.ru

Представлены результаты компьютерного моделирования структуры ЭГД-течений в системе электродов «провод над плоскостью» в рамках инжекционного механизма образования объемного заряда. Показано, что инжекционный механизм возникновения заряда способен объяснить пороговый характер ЭГД-течений, режимы неразвитого и развитого ЭГД-течений, их зонную структуру, зависимость структуры от низковольтной проводимости жидкости, слабую зависимость структуры и свойств ЭГД-течений от геометрических размеров электрода.

Ключевые слова: ЭГД-течение, электроконвекция, численное моделирование, инжекция, диссоциация, провод-плоскость.

УДК 532.5+537.571

ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный механизм формирования объемного заряда [1] в жидких диэлектриках состоит в образовании ионов в приэлектродных реакциях. В ходе реакции поверхностного зарядообразования электрон переходит с поверхности металлического электрода на молекулу примеси, обладающую повышенными электронно-акцепторными свойствами, при этом у поверхности электрода (инжектирующего) образуются отрицательные ионы (инжектированные), вызывающие электрогидродинамические (ЭГД) течения инжекционного типа в слабопроводящих жидкостях. Ранее инжекционный механизм формирования ЭГД-течений для системы электродов «провод над плоскостью» моделировался в жидкостях, не имеющих собственной низковольтной проводимости [2]. Однако в экспериментах по исследованию ЭГД-течений [1] для усиления инжекции в исходную диэлектрическую жидкость вводились примеси, обладающие повышенными электронно-акцепторными свойствами, например йод либо бутанол. Введение примесей обычно повышает также и фоновый уровень низковольтной проводимости в диапазоне от 0,1 пкСм/м для чистой жидкости до 100 нСм/м для жидкости с высокой концентрацией примеси. Повышение низковольтной проводимости приводит к формированию в приэлектродных областях неравновесных рекомбинационных слоев [3, 4]. Рекомбинационные гетерослои существенно влияют на проникновение инжектируемого с электрода заряда в объем жидкости, а следовательно, влияют на структуру и интенсив-

ность возникающих ЭГД-течений. В предлагаемой работе изучены особенности ЭГД-течений инжекционного типа в системе электродов «провод-плоскость» с помощью компьютерного моделирования в пакете COMSOL Multiphysics для электродов различного диаметра, то есть в полях сильно и слабо неоднородных. Процедура численного расчета схожей задачи методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics подробно описана в работе [7].

Моделирование проводилось методом конечных элементов путем решения полной системы уравнений электрогидродинамики:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \operatorname{div}(-c_i b_i F z_i \nabla\varphi - D_i \nabla c_i) + \vec{u} \nabla c_i = \alpha_d - \alpha_r c_1 c_2; \quad (2)$$

$$\rho = (F(z_1 c_1 + z_2 c_2)); \quad (3)$$

$$\gamma \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \gamma(\vec{u}, \nabla)\vec{u} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{u} - \rho \nabla \varphi; \quad (4)$$

$$\operatorname{div}(\vec{u}) = 0; \quad (5)$$

$$\alpha_r = \frac{2bF}{\varepsilon\varepsilon_0}; \quad (6)$$

$$\alpha_d = \frac{\sigma_0^2}{\varepsilon\varepsilon_0 2bF}; \quad (7)$$

$$D_i = \frac{k_B T}{e} b_i, \quad (8)$$

где φ – электрический потенциал; γ – плотность жидкости; \vec{u} – скорость жидкости; P – давление; η – динамическая вязкость; t – время; ρ – объем-

ная плотность заряда; c – концентрация ионов; b – подвижность ионов; D – коэффициент диффузии ионов; z_i – валентность ионов; e – элементарный электрический заряд; α_2 – коэффициент диссоциации; α_r – коэффициент рекомбинации; F – константа Фарадея; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость и ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; k_B – постоянная Больцмана; T – температура; σ_0 – низковольтная проводимость жидкости, индекс i указывает на сорт ионов.

Распределение потенциала и электрического поля находится из уравнения Пуассона (1), которое наряду с полем электродов учитывает поле, создаваемое распределением объемного заряда. Концентрации положительных и отрицательных ионов рассчитываются с помощью двух уравнений Нернста-Планка (2), в правой части учитывающих диссоциационно-рекомбинационные процессы. Эта запись характерна для слабых электролитов с очень малым коэффициентом диссоциации примесей [6]. После расчета концентраций ионных компонент и объемного заряда по (3) рассчитываются поле скоростей из уравнения Навье-Стокса (4) и уравнения неразрывности для несжимаемой вязкой жидкости (5). Объемная сила $f = -\rho E$ в правой части (4) – это кулоновская сила, обобщенная на случай пространственного распределения заряда ρ .

Эту систему дифференциальных уравнений в частных производных удается решить только с помощью методов численного моделирования. В программном пакете COMSOL Multiphysics имеется возможность совместного решения системы связанных дифференциальных уравнений (Нернста-Планка, Навье-Стокса и Пуассона) [7]. При этом для решения уравнений Нернста-Планка и Навье-Стокса применяются методы переходного анализа, так как уравнения не стационарны. При моделировании полное время решения и отдельные шаги по времени выбирались таким образом, чтобы получить как квазистационарные распределения физических величин, так и наблюдать процесс развития и установления ЭГД-течения.

СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Жидкость – трансформаторное масло: $\epsilon = 2,2$ – относительная диэлектрическая проницаемость, подвижность ионов; коэффициент диффузии рассчитывается из соотношения Эйнштейна; собственная проводимость σ_0 варьируется от 0 до 10^{-7} См/м; начальные концентрации ионов задаются, как плотность, где Кл/моль – постоянная Фарадея; вязкость $\eta = 0,01$ Па·с.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для уравнения Пуассона на электродах задается разность потенциалов, линейно растущая со временем от 0 до 20 кВ, на оси симметрии и на стенках – равенство нулю нормальной составляющей поля; считается, что заряд, оседая на стенках, экранирует поле. Для уравнения Навье-Стокса выполняется условие прилипания на стенках кюветы и на электродах, а также равенство нулю нормальной составляющей скорости на оси симметрии модели. Для уравнений Нернста-Планка на оси симметрии и стенках кюветы задается равенство нулю потока ионов через данные поверхности, а на положительном электроде – ток инжекции по формуле типа Шоттки [4]:

$$\vec{J} = A\sigma_0 \exp\left(\frac{B\sqrt{|\vec{E}|}}{k_b T}\right) \text{step}\left(|\vec{E}| - E_0\right) \cdot \vec{n},$$

где коэффициент A , зависящий от типа рассматриваемых электродов, был выбран равным 3,28 для всех радиусов электрода, $B = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi \epsilon \epsilon_0}}$,

\vec{E} – локальная напряженность электрического поля; σ_0 – значение собственной низковольтной проводимости, локальное значение напряженности электрического поля на поверхности цилиндрического электрода, соответствующее пороговому межэлектродному напряжению начала инжекции, полученное при расчете электростатической задачи; $\text{step}\left(|\vec{E}| - E_0\right)$ функция сглаженной единичной ступеньки, позволяющая моделировать пороговый характер инжекции, то есть инжекция начинается после того, как значение напряженности электрического поля около электрода достигает порогового значения E_0 . На каждом из электродов задается беспрепятственная гибель заряда противоположного знака $\vec{J} \cdot \vec{n} = -(-D\nabla c - zbFc\nabla\phi + c\vec{u}) \cdot \vec{n}$, то есть весь приходящий на электрод гетерозаряд гибнет, и накопления заряда не происходит.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ: ВЛИЯНИЕ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЖИДКОСТИ (КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ)

Моделирование проводилось в режиме линейного роста напряжения в диапазоне напряжений 0–20 кВ. Расчеты производились для проводимостей 10, 100 пкСм/м, 1, 10 нСм/м и диаметров проволочного электрода 10, 80, 200, 500 и 2000 мкм, условия численного эксперимента близко соответствовали натурным [1]. Резуль-

таты моделирования для различных напряжений в жидкости с проводимостью 10 пкСм/м приведены на рис. 1 и 2. Для напряжений 0,5–0,6 кВ выведены увеличенные распределения в окрестности проволочного электрода.

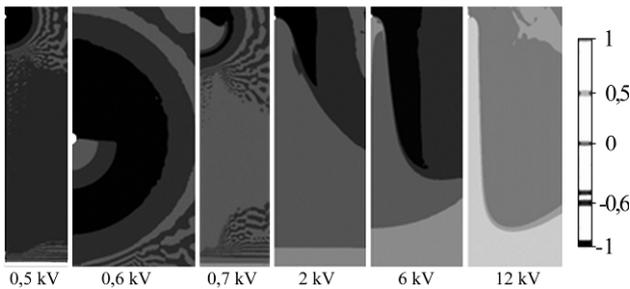


Рис. 1. Распределение объемного заряда в межэлектродном промежутке (МЭП) для различных напряжений в жидкости с проводимостью $\sigma_0 = 10^{-11}$ См/м, радиус электрода 80 мкм.

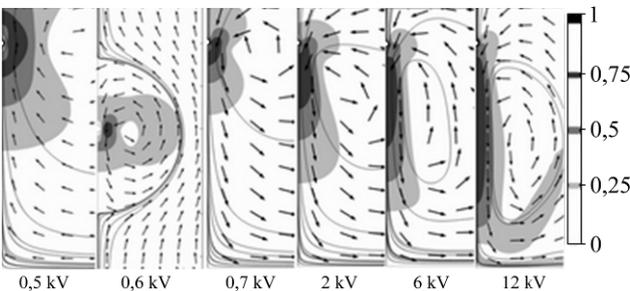


Рис. 2. Векторное поле и распределение скоростей в межэлектродном промежутке для различных напряжений в жидкости с проводимостью $\sigma_0 = 10^{-11}$ См/м, радиус электрода 80 мкм.

Анализ результатов показывает: в жидкостях с относительно низким уровнем низковольтной проводимости до 10 пкСм/м в развитом режиме ЭГД-течение сохраняет черты, присущие течениям при униполярной инжекции в непроводящую жидкость, а возникающие рекомбинационные слои сравнимы с размерами межэлектродного промежутка (МЭП) и не оказывают существенного влияния на структуру зарядовой струйки в межэлектродном промежутке и характер возникающих ЭГД-течений.

Однако в диапазоне околопороговых напряжений 0,5–0,6 кВ имеются существенные различия: до порога у электродов формируются приэлектродные рекомбинационные гетерослои, вызывающие аномальные ЭГД-течения, направленные на проволочный электрод. При некотором пороговом напряжении 0,6 кВ, когда появляется инжекция и плотность тока инжекции на поверхности электрода сравнивается с плотностью тока проводимости, ЭГД-течение меняет направление и переходит в режим неразвитого течения 0,7–6 кВ. В этом режиме от нижней поверхности проволочного электрода в объем жидкости распространяется тонкая одноименно заряженная центральная струйка ЭГД-течения. При напряжениях до 6 кВ эта струйка не доходит

до противоэлектрода, а рассеивается в межэлектродном промежутке. В диапазоне более высоких напряжений реализуется режим развитого ЭГД-течения, в котором заряженная струйка достигает поверхности плоского электрода, а осевое распределение и профили скорости остаются практически неизменными при росте напряжения. В этом режиме растет только модуль скорости течения в центральной струе. Как видно из графиков на рис. 4, распределение скорости вдоль центральной струи течения имеет зонную структуру: короткую зону ускорения порядка 1 мм и длинную зону торможения (для режима неразвитого течения). В режиме развитого течения после зоны ускорения имеется зона квазиоднородного течения, а затем зона торможения у плоского электрода. При этом (см. рис. 3) распределение плотности объемного заряда вдоль заряженной струйки в режиме развитого течения при напряжениях выше 6 кВ также остается практически постоянным, с ростом напряжения возрастает только ее величина. Все описанные особенности ЭГД-течений: пороговый характер, два режима, зонная структура были зарегистрированы и описаны ранее на базе натуральных экспериментов в растворах бутанола и йода в трансформаторном масле и описаны в монографии [1].

На рис. 5–8 приведены распределения плотности объемного заряда и скоростей ЭГД-течения в МЭП для различных напряжений в жидкости с повышенным уровнем низковольтной проводимости 10 нСм/м для электрода диаметром 80 мкм. Следует отметить, что при сохранении прежнего уровня инжекции ионы, инжектируемые с поверхности проволочного электрода, полностью рекомбинируют в приэлектродном слое, не проникая в объем жидкости, и поэтому в жидкости не возникает ЭГД-течений. Для проникновения заряда за пределы рекомбинационного слоя необходимо существенно (пропорционально низковольтной проводимости) повысить уровень инжекции. В модели для проводимости 10 нСм/м он повышен пропорционально изменению проводимости, то есть на 3 порядка. В экспериментах этого эффекта добиваются повышением концентрации электронно-акцепторной примеси. На рис. 5 и 6 приведены распределения объемного заряда и скорости ЭГД-течений в диапазоне напряжений от 0,3 до 15 кВ. Для низких околопороговых напряжений распределения приведены в увеличенном масштабе. Видно, что с увеличением проводимости общая картина возникновения и развития структуры ЭГД-течений сохраняется, однако наблюдаются некоторые количественные изменения. Во-первых, как и следовало ожидать

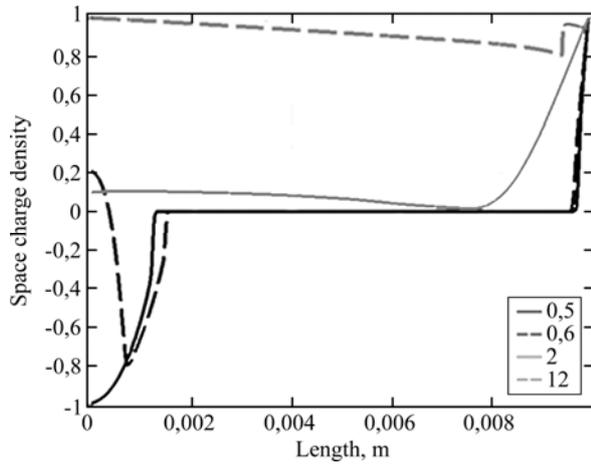


Рис. 3. Продольное распределение нормированной на максимальное по модулю значение плотности объемного заряда в МЭП при различных напряжениях (кВ), радиус электрода 80 мкм.

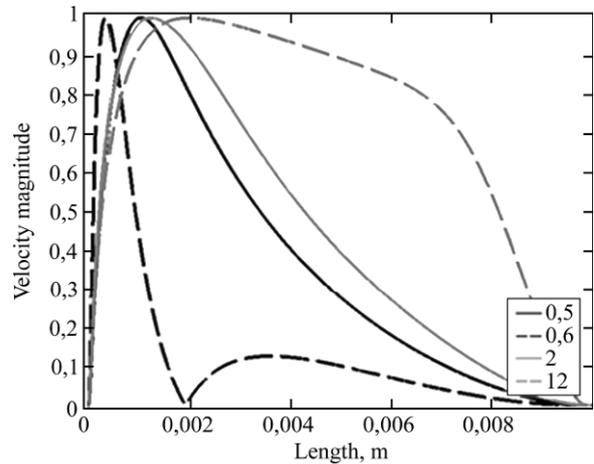


Рис. 4. Продольное распределение нормированной на максимальное значение скорости в МЭП при различных напряжениях (кВ), радиус электрода 80 мкм.

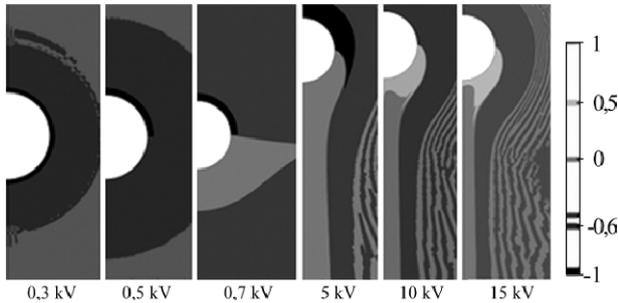


Рис. 5. Распределения объемной плотности заряда в МЭП для различных напряжений в жидкости с проводимостью 10 нСм/м, $R = 80$ мкм.

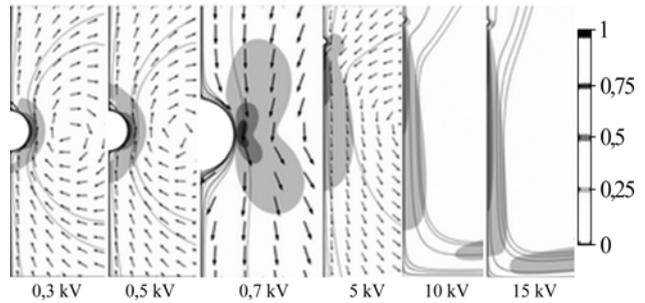


Рис. 6. Векторное поле и распределение скоростей, а также линии тока жидкости для различных напряжений 10 нСм/м, $R = 80$ мкм.

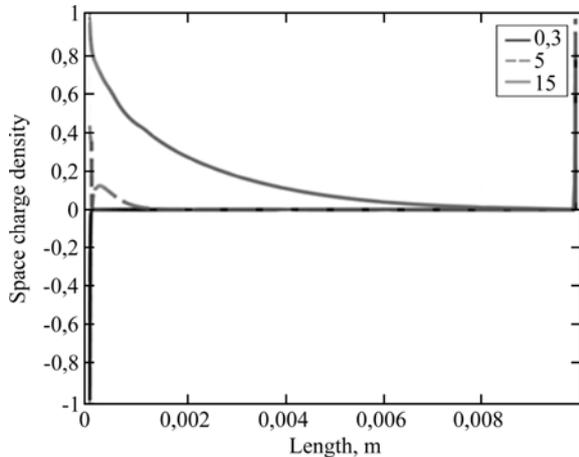


Рис. 7. Продольное распределение нормированной объемной плотности заряда в МЭП при различных напряжениях (кВ).

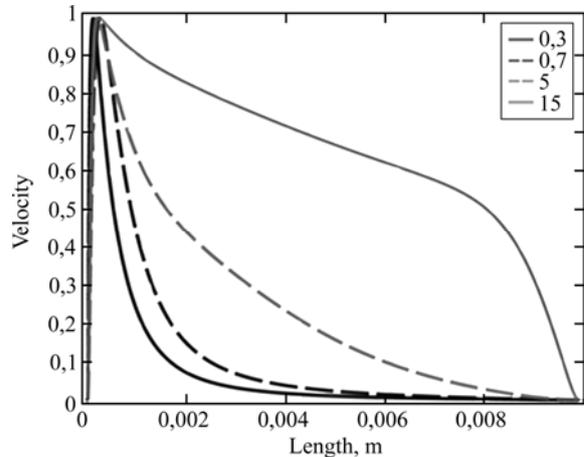


Рис. 8. Продольное распределение нормированной скорости в МЭП при различных напряжениях (кВ).

[1], существенно уменьшаются размеры приэлектродных рекомбинационных слоев, так как увеличен ток рекомбинации, во-вторых, увеличивается пороговое напряжение возникновения ЭГД-течения. Кроме того, начальная плотность инжектированного заряда значительно выше в связи с повышенной интенсивностью инжекции, однако плотность инжектированного заряда, проникающего в жидкость, существенно ослабевает по мере распространения заряженной струйки к противоэлектроду из-за повышенной

рекомбинации с противоионами собственной проводимости, поступающими в приэлектродную область и заряженную струйку из жидкости. Это сопровождается увеличением порогового напряжения прорыва приэлектродного инжекционно-рекомбинационного слоя, а также отражается на характере зонной структуры продольных распределений скорости и продольных распределений плотности объемного заряда (рис. 7 и 8): плотность объемного заряда и скорость ЭГД-течений быстро спадают от про-

волочного электрода к плоскому, далее темпы спадаания уменьшаются.

При проводимости 10 нСм/м значительно уменьшаются поперечный размер заряженной струйки, а также глубина проникновения инжектированного заряда в МЭП. Плотность заряда вдоль заряженной струйки быстро падает, и поэтому часть МЭП остается электронейтральной. Следовательно, и зона действия кулоновских сил существенно сокращается и занимает лишь малую часть межэлектродного промежутка, из-за чего, в свою очередь, изменяется распределение скоростей вдоль оси течения: после очень короткой зоны ускорения (менее 1 мм) вместо зоны однородного течения появляется зона торможения, занимающая большую часть МЭП. Зона квазиоднородного течения появляется лишь при значительных напряжениях (выше 15 кВ).

Следует отметить, что течение интенсивно распространялось вдоль поверхности плоского электрода даже при больших радиусах проволочного электрода, в то время как при меньшей проводимости течение, доходя до плоского электрода, довольно резко меняло свое направление на противоположное, отражаясь от него под углом, близким к 60° , и образуя компактный вихрь. В связи с тем, что интенсивность инъекции беспредельно повышать невозможно, инжекционный механизм формирования объемного заряда реализуем только в жидкостях с относительно невысоким уровнем низковольтной проводимости, не выше чем 100 нСм/м. В жидкостях с более высокой проводимостью наиболее вероятен эффект Вина. Эти результаты находятся в хорошем качественном соответствии с экспериментальными результатами по исследованию влияния концентрации электронно-акцепторных примесей (низковольтной проводимости) на структуру и интенсивность ЭГД-течений [1, 5].

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПРОВОЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА

Для проверки влияния степени неоднородности поля на инжекционный механизм формирования объемного заряда далее приводятся результаты моделирования в тех же жидкостях, но для электрода большего радиуса (250 мкм). На рис. 9–12 приведены результаты моделирования в жидкости с невысокой проводимостью 10 нСм/м.

При увеличении радиуса проволочного электрода до 250 мкм локальная напряженность электрического поля у нижней поверхности электрода-проволоки уменьшается в 2 раза по сравнению с электродом радиусом 80 мкм, что приводит к увеличению относительных размеров

диссоциационно-рекомбинационных слоев, увеличивается также и поперечный размер заряженной струи. Для этого электрода более отчетливо прослеживаются все стадии околопороговой трансформации течения.

В связи с понижением приэлектродной напряженности поля напряжение начала инъекции увеличивается более чем вдвое (до 2 кВ), что можно увидеть из распределений плотности объемного заряда в МЭП для различных напряжений (рис. 9), при этом аномальное встречное ЭГД-течение, обусловленное неравновесным гетерозарядным слоем, реализуется в более широком диапазоне напряжений (до 1 кВ), а нормальное струйное ЭГД-течение возникает лишь при 3 кВ. В диапазоне 1–3 кВ реализуется локальный боковой приэлектродный вихрь, что видно из распределений скоростей ЭГД-течения в МЭП для различных напряжений (рис. 10), обусловленный градиентом давлений между верхней изолированной и нижней инжектирующей поверхностями проволочного электрода. Как показано на графике линейных распределений плотности объемного заряда вдоль заряженной струйки (рис. 11), при напряжении 3 кВ происходит прорыв отрицательного гетерослоя инжектированным положительным зарядом и формируется струйное течение в сторону плоского электрода. При этом происходят формирование заряженной струи и смещение основной зоны ускорения течения с боковых поверхностей проволочного электрода под него.

Однако из-за того что инъекция слабее, чем в случае электрода меньших размеров, плотность заряда, а значит, и скорости в МЭП меньше, как видно из рис. 12, на котором представлены линейные распределения скорости вдоль центральной струи течения, развитие течения происходит значительно медленнее (если при радиусе электрода 80 мкм и напряжении 10 кВ можно наблюдать развитое течение, то при радиусе 250 мкм развитое течение реализуется только при 15 кВ).

На рис. 13–16 приведены распределения плотности объемного заряда и модуля скорости ЭГД-течений в жидкости повышенной проводимости для проволочного электрода радиусом 250 мкм. Как видно из анализа динамики структуры ЭГД-течений, в целом картина развития течений сохраняется, однако количественные характеристики сдвигаются в область более высоких напряжений. Это соответствует результатам натуральных экспериментов [1]. Из рис. 15, на котором приведены линейные распределения плотности объемного заряда вдоль заряженной струйки, видно, что плотность инжектируемого заряда значительно уменьшается уже на толщине приэлектродного гетерослоя. Это связано с тем,

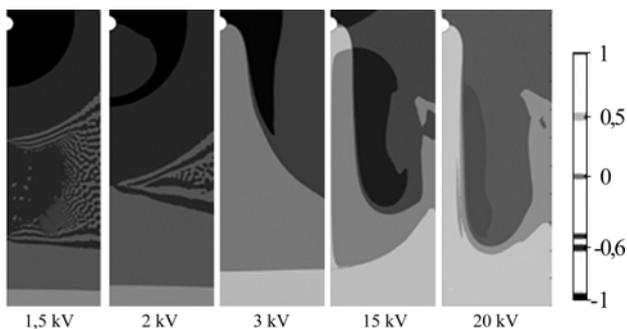


Рис. 9. Распределения объемной плотности заряда в МЭП для различных напряжений, $R = 250$ мкм, $\sigma_0 = 10^{-11}$ См/м.

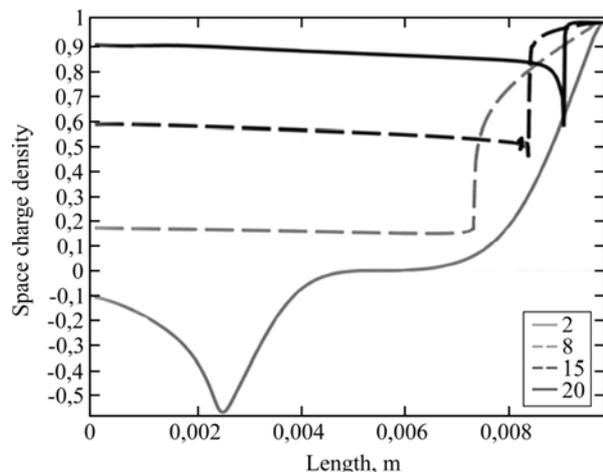


Рис. 11. Продольное распределение нормированной на максимальное по модулю значение объемной плотности зарядов МЭП при различных напряжениях (кВ).

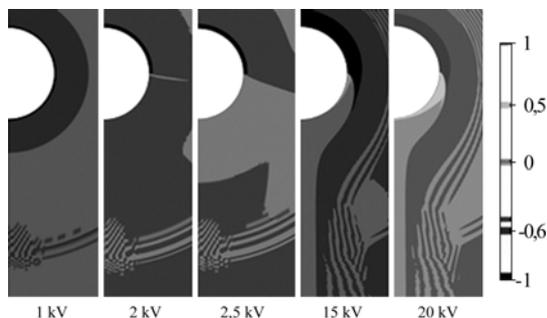


Рис. 13. Распределения объемной плотности заряда в МЭП для различных напряжений, $R = 250$ мкм, $\sigma_0 = 10^{-8}$ См/м.

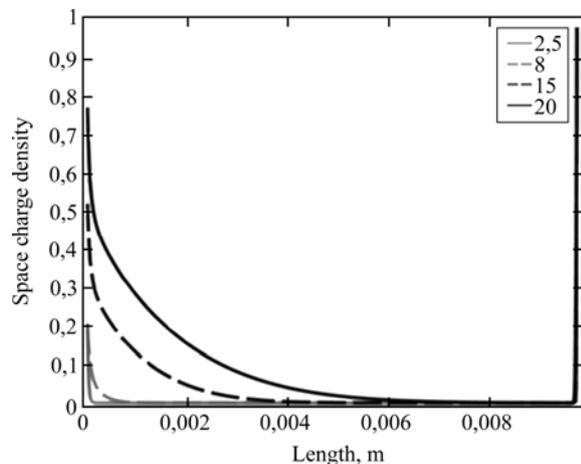


Рис. 15. Продольное распределение нормированной на максимальное по модулю значение объемной плотности зарядов МЭП при различных напряжениях (кВ).

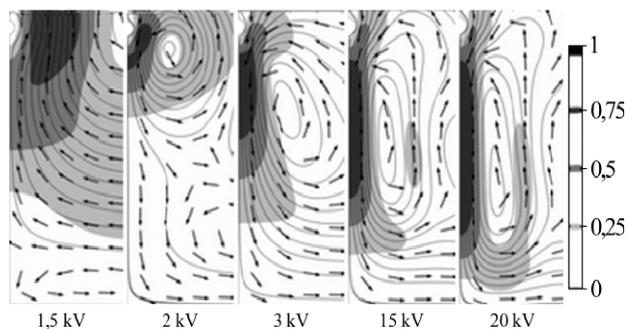


Рис. 10. Распределения поля скоростей и линии тока жидкости в МЭП для различных напряжений, $R = 250$ мкм, $\sigma_0 = 10^{-11}$ См/м.

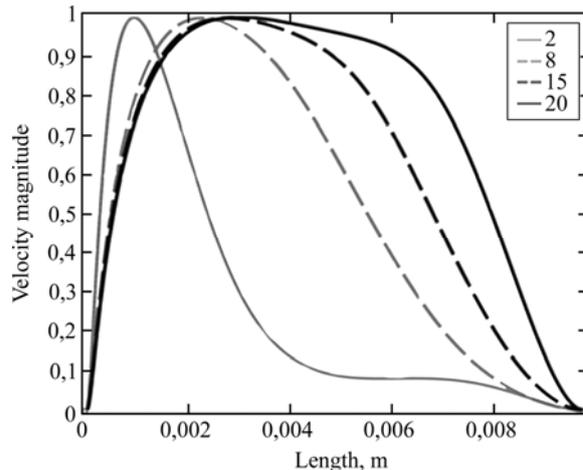


Рис. 12. Продольное распределение нормированной на максимальное значение скорости в МЭП при различных напряжениях (кВ).

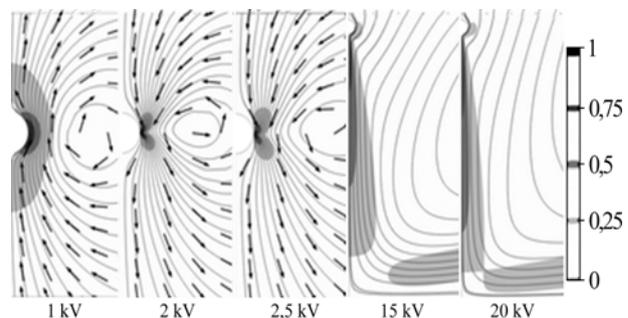


Рис. 14. Распределения поля скоростей и линии тока жидкости для различных напряжений, $R = 250$ мкм, $\sigma_0 = 10^{-8}$ См/м.

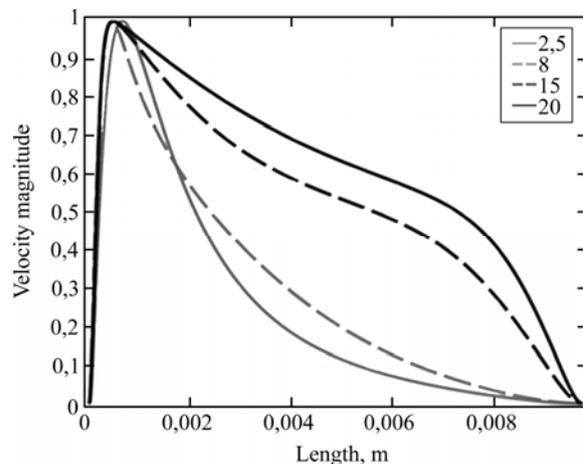


Рис. 16. Продольное распределение нормированной на максимальное значение скорости при различных напряжениях (кВ).

что ионы инжекции испытывают встречную рекомбинацию с ионами проводимости. Из-за ослабления уровня инжекции при увеличении радиуса электрода рекомбинация инжектированных ионов с ионами отрицательного гетерослоя нарушает однородность распределения плотности объемного заряда в струе, что приводит к уменьшению зоны равномерного течения и увеличению зоны интенсивного торможения. Поэтому в межэлектродном промежутке развиваются значительно меньшие скорости. Это видно, например, из линейных распределений скорости вдоль центральной струи течения, представленных на рис. 16.

При проводимости 10 нСм/м с увеличением радиуса электрода сохраняются общие черты динамики развития ЭГД-течений, однако значительно уменьшаются размеры приэлектродных рекомбинационных слоев, что видно из рис. 13 (распределения объемной плотности в МЭП для различных напряжений в жидкости), а также увеличиваются пороговое напряжение и напряжение формирования заряженной струйки (15 кВ). Уменьшаются также глубина проникновения инжектированного заряда в МЭП (часть МЭП остается практически электронейтральной), а значит, и зона действия кулоновских сил, из-за чего, в свою очередь, уменьшаются средние скорости течения. Как видно из графиков распределения скоростей ЭГД-течения в МЭП для различных напряжений, приведенных на рис. 14, течение интенсивно распространяется вдоль поверхности плоского электрода даже при больших радиусах проволочного электрода.

Таким образом, как показывает моделирование, структура и свойства ЭГД-течений инжекционного типа определяются, прежде всего, наличием неравновесных приэлектродных рекомбинационных слоев и слабо зависят от размеров активного электрода. Показатели компьютерного моделирования приближаются к результатам натуральных экспериментов в жидкостях, содержащих электронно-акцепторные примеси [1, 5].

ВЫВОДЫ

Проведено компьютерное моделирование структуры ЭГД-течений в системе электродов «провод над плоскостью» в рамках инжекционного механизма образования объемного заряда. Показано, что инжекционный механизм возникновения заряда способен объяснить основные свойства ЭГД-течений: пороговый характер,

режимы неразвитого и развитого ЭГД-течений, их зонную структуру, зависимость структуры от низковольтной проводимости жидкости, слабую зависимость структуры и свойств ЭГД-течений от геометрических размеров электрода.

Компьютерное моделирование проведено с использованием вычислительных ресурсов «Вычислительного центра СПбГУ» (<http://cc.spbu.ru>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках*. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 174 с.
2. Traor'e Ph., Daaboul M., Louste Ch. *J Phys D-Appl Phys*. 2010, **43**(22), 1–8.
3. Стишков Ю.К., Чирков В.А. *Сборник докладов XI Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики»*. Санкт-Петербург, Россия, 29 июня – 3 июля 2015. С. 211–215.
4. Жакин А.И. *Успехи физических наук*. 2006, **176**(3), 289–310.
5. Стишков Ю.К., Ситников А.А., Чирков В.А. *Сборник докладов XI Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики»*. Санкт-Петербург, Россия, 29 июня–3 июля 2015. С. 49–54.
6. Полянский В.А., Панкратьева И.Л. *Сборник докладов XI Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей»*. Санкт-Петербург, 2015. С. 219–223.
7. Samusenko A., Stishkov Yu. and Zhidkova P. *Proceedings of the COMSOL Conference*. Rotterdam, Netherland, 23–25 October 2013. P. 1–4.

Поступила 07.10.15
После доработки 17.12.15

Summary

This article presents the results of computer simulation of the patterns of the injection-type EHD flows in the wire-plane electrode system in a cell with dielectric walls filled with a dielectric liquid. The threshold character of the EHD flows, regimes of undeveloped and the developed EHD flows, the zone structure of the EHD flows, the influence of low-voltage conductivity values and weak influence of radius of a wire electrode on the structure and features of the EHD flows are explained via the injection mechanism of charge formation.

Keyword: EHD flow, electroconvection, numerical modeling, injection, dissociation, wire-plane.