

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОМЕЖУТКА НА КИНЕМАТИКУ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ

*\*Научно-исследовательский институт радиофизики  
Санкт-Петербургского государственного университета,  
ул. Ульяновская, д. 1, 198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Россия*

*\*\* Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

### Введение

Ранее [1–3] был предложен алгоритм моделирования ЭГД-течений методом конечных элементов в пакете моделирования ANSYS и рассчитаны некоторые задачи. На основе этих моделей и результатов эксперимента выявлена зонная структура ЭГД-течений: зона неподвижной жидкости, примыкающая к поверхности активного электрода, далее зона ускорения, зона равномерного течения и зона торможения у противоиэлектрода. Кроме того, в нижней части ЭГД-течения наблюдается структура, происхождение которой требует объяснения. Показано, что основное преобразование электрической энергии в кинетическую энергию жидкости происходит в пределах зоны ускорения. Анализ структуры неподвижной приэлектродной зоны и зоны ускорения показывает, что их размеры не могут уменьшаться пропорционально величине межэлектродного промежутка (далее МЭП). Поэтому следует ожидать аномальных эффектов при малых размерах МЭП. Моделирование проводится в системе “провод над плоскостью”, причем под размером МЭП понимается расстояние от нижней кромки цилиндрического электрода до плоскости пассивного электрода. По результатам экспериментальных исследований и компьютерного моделирования выявлена зонная структура ЭГД-течений и показано, что зона ускорения жидкости имеет экстремум, отстоящий от поверхности электрода. Экстремальный характер зон ускорения связан с наличием приэлектродных областей пониженного давления. Показано, что размеры зон ускорения коррелируют с размерами активного электрода. Предшествующие исследования проведены для случая, когда размер межэлектродного промежутка существенно превышает размеры зоны ускорения.

С научной и практической точек зрения представляет интерес исследование процесса формирования течений, когда размеры зон ускорения жидкости близки к размерам МЭП. Подобные начальные условия позволят оценить влияние приэлектродных зон на структуру течения.

Результаты компьютерного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, полученными и опубликованными ранее [4]. Как и в работах [2, 3], рассматривается система электродов “провод над плоскостью”, размеры модели совпадают с размерами экспериментальной кюветы. В качестве исследуемой жидкости выбрано трансформаторное масло. Радиус активного электрода  $r_0 = 0,5$  мм, приложенное напряжение – 20 кВ. Кроме того, влияние размеров МЭП на кинематическую структуру ЭГД-течения имеет также важное прикладное значение. Так, например, при конструировании ЭГД-устройств размер межэлектродного промежутка зачастую выбирают произвольно, опираясь в основном на необходимые размеры конструкции и величину напряжения. Результаты работы позволяют выбирать эти размеры обоснованно.

### 1. Численный эксперимент

В данной работе представлены результаты численного исследования изменения структуры течения при варьировании межэлектродного расстояния  $l_0$  от 0,5 мм до 12 см, что перекрывает диапазон относительных расстояний  $d = l_0/r_0$  от 240 до 1.

Подробно алгоритм моделирования описан в работе [3]. Он основан на последовательном решении двух задач – электрической и гидродинамической. В первой определяются распределения электрического поля и плотности электрических сил при заданных напряжении и распределении объемного заряда. Во второй по заданному распределению электрических сил вычисляются распределения скоростей и давления при течении. При этом предполагается, что ионы «вморожены» в жид-

кость, то есть их движением относительно жидкости можно пренебречь. Путем сравнения полученных результатов с экспериментальными распределениями скоростей ЭГД-течения выявлено, что распределение заряда имеет следующую структуру: вокруг цилиндрического электрода находится тонкий (порядка 0,1 мм) слой заряженной жидкости, внутри межэлектродного промежутка имеет вид тонкой полоски, простирающейся от цилиндрического электрода к плоскому. Наблюдается небольшое спадание плотности заряда внутри полоски по мере его продвижения к плоскому электроду. В [2] показано, что у активного электрода  $\rho = a\sqrt{E}$  и эта зависимость использована в нашей модели.

## 2. Результаты моделирования

На рис. 1 приведены распределения скоростей ЭГД-течений при «малом» и «большом» межэлектродных промежутках.

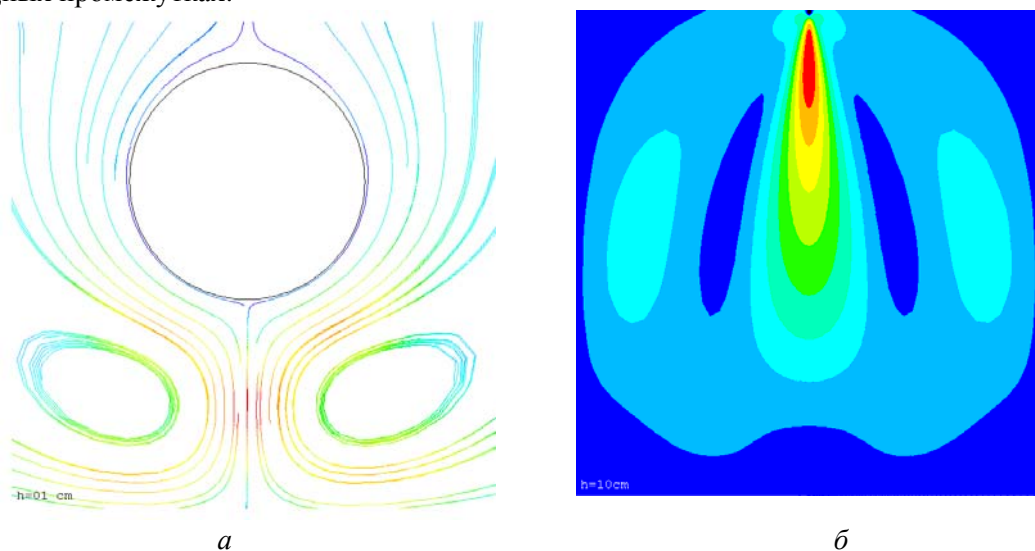


Рис. 1. Линии тока (а) и контурный график скорости (б)

В первом случае зонная структура выражена недостаточно четко: зона ускорения сразу переходит в зону торможения, в то время как во втором зоны ускорения и торможения разделены достаточно большой промежуточной зоной однородного течения. На рис. 2 приводится зависимость максимальной скорости в центральной струе ЭГД-течения от размера межэлектродного промежутка при постоянном напряжении. Эта зависимость имеет максимум при  $l_0 = 5$  мм.

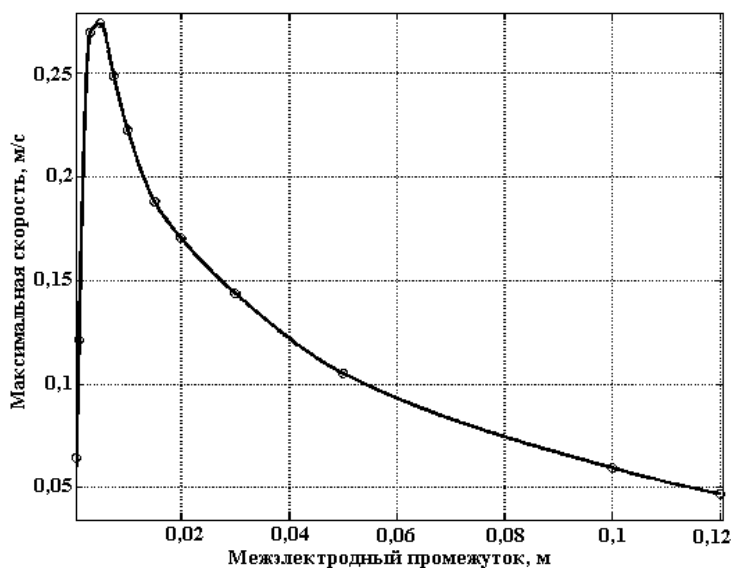


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости ЭГД-течения от величины межэлектродного промежутка

Аналогичная экстремальная зависимость скорости течения от размера межэлектродного промежутка обнаружена ранее экспериментально [4]. Совпадение касается не только характера кривых, но и местоположения максимума. Разобьем зависимость на две части: аномальную область 1 (малых

МЭП  $l_0 < 5$  мм) и нормальную 2 ( $l_0 > 5$  мм). В нормальной области спад скорости обусловлен падением средней напряженности электрического поля при увеличении длины МЭП, а в аномальной спад скорости происходит на фоне роста средней напряженности поля. Следует заметить, что в аномальной области наблюдается также спад эффективности ЭГД-преобразования, то есть отношения кинетической энергии ЭГД-течения к затрачиваемой электрической энергии. Для объяснения особенностей зависимости рис. 2 проанализируем результаты моделирования.

На рис. 3 приведены распределения скорости и ускорения вдоль центральной оси течения.

Значения скорости и ускорения нормированы к их максимальным значениям, а расстояния – к длине межэлектродного промежутка. Для больших межэлектродных промежутков зоны ускорения и торможения разделены промежуточной зоной слабоизменяющегося течения.

Как видно из рис. 3, б, для малых межэлектродных расстояний зона ускорения резко переходит в зону торможения. Причем модули ускорений (замедлений) в этих зонах практически одинаковы. Кривая симметрична относительно центра межэлектродного промежутка. При увеличении межэлектродного промежутка появляется некоторая переходная область. Зона ускорения уменьшается. В зоне торможения изменения скорости становятся менее интенсивными. При больших межэлектродных расстояниях зона ускорения занимает менее 5% межэлектродного промежутка, а в зоне торможения не наблюдается характерной впадины, следовательно, торможение происходит только в результате действия вязких сил.

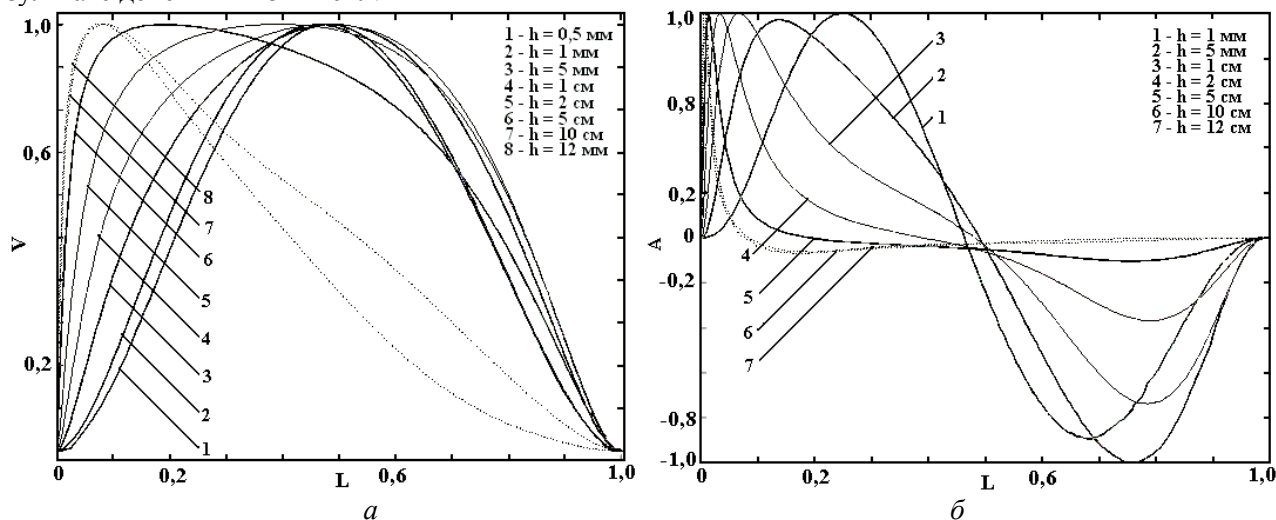


Рис. 3. Распределения скорости (а) и ускорения (б) вдоль центральной оси ЭГД-течения для разных межэлектродных расстояний

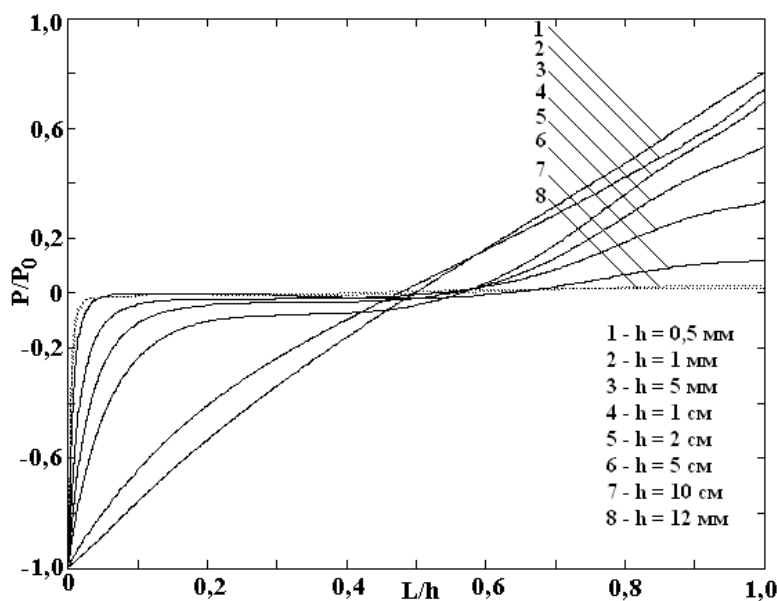


Рис. 4. Изменение распределения давления в жидкости при разных межэлектродных расстояниях

Поскольку преобразование электрической энергии в гидродинамическую происходит в основном в зоне ускорения, это приводит к уменьшению эффективности ЭГД-преобразования.

Кинематика и динамика ЭГД-течений в слабопроводящих жидкостях определяются типом электрохимических реакций около электродов, особенностями структуры жидкости в присутствии объемного заряда, конфигурацией как внешнего электрического поля, так в большей степени и внутреннего электрического поля, наведенного объемным зарядом. Таким образом, внимательно исследуя кинематическую и динамическую структуры ЭГД-течений, можно сделать существенные выводы о процессах, происходящих при ЭГД-эффектах. В предыдущих наших работах проведены подробные исследования и сформулированы основные свойства ЭГД-течений.

Влияние приэлектродных зон на кинематику ЭГД-течения при малых межэлектродных расстояниях объясняется характером распределения давлений (рис. 4, 5). Из рис. 5 видно, что при больших межэлектродных расстояниях (справа) давление на большей части промежутка постоянно. Имеются лишь локальные области пониженного (у активного электрода) и повышенного давления у плоского электрода. Размеры зоны пониженного давления практически не зависят от размеров МЭП, а определяются в основном размерами активного электрода. При уменьшении межэлектродного промежутка обе эти зоны захватывают все большую часть его, а при достаточно малых расстояниях перекрываются в середине межэлектродного промежутка.

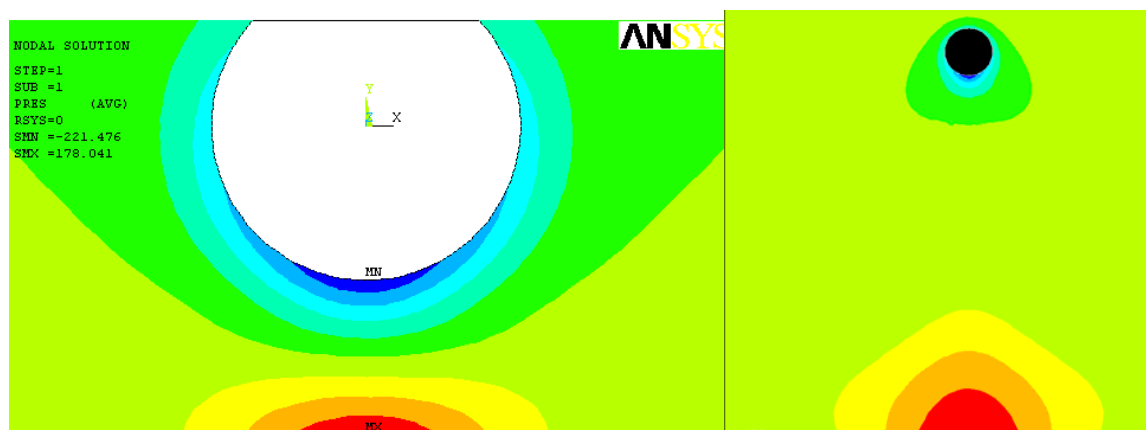


Рис. 5. Распределение зон давления в межэлектродном промежутке

Как уже отмечалось в работе [2], местоположение максимума ускорения жидкости определяется размерами зоны пониженного давления. У активного электрода ускорение жидкости определяется равнодействующей электрических сил и сил давления. Кулоновские электрические силы имеют монотонно ниспадающий характер, а отрицательное давление в приэлектродной области максимально у поверхности электрода. От этой структуры и зависит распределение ускорения в приэлектродной зоне. Местоположение максимума ускорения определяется структурой приэлектродной зоны пониженного давления и ее размерами. В свою очередь эта структура определяется размерами и характером обтекания цилиндрического электрода и не связана с размерами МЭП.

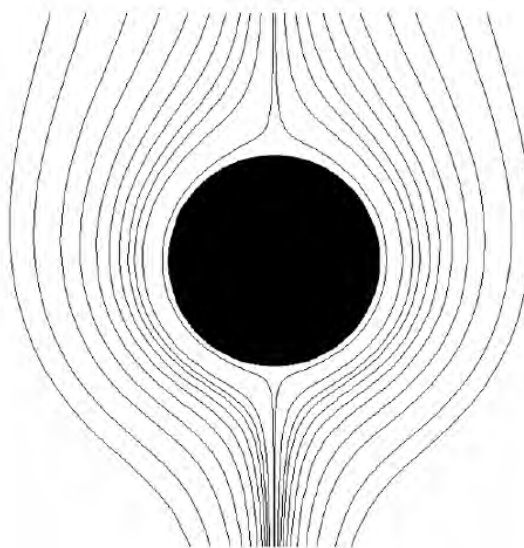


Рис. 6. Линии тока ЭГД-течения

На рис. 6 приведены линии тока ЭГД-течения. Видно, что в окрестности активного электрода картина обтекания электрода несимметрична: именно под электродом линии тока в приэлектродной

области быстро сужаются, формируя узкую заряженную струйку. Это связано с наличием зоны пониженного давления в приэлектродной области, локализованной под активным электродом.

Чем больше радиус электрода, тем обширнее эта зона, и, следовательно, наблюдается более пологий рост кривой ускорения. В дальней части приэлектродная область уже не оказывает влияния, и ускорение жидкости определяется чисто электрическими силами. Следует заметить, что преобразование электрической энергии в кинетическую происходит на протяжении всей зоны ускорения. При малых размерах МЭП, когда зоны ускорения и торможения перекрываются, степень этого преобразования оказывается ниже, несмотря на рост электрических сил, что и определяет аномальную ветвь кривой рис. 1. Можно предположить, что при уменьшении размеров МЭП ниже определенного значения ЭГД-течение возникать вообще не будет. Судя по характеру спада скорости, этот порог лежит на уровне 0,1 мм. На наш взгляд, именно этим можно объяснить изменение различных электрофизических характеристик диэлектрических жидкостей в малых зазорах.

**3. ЭГД-течение в 3-электродной системе.** Значительное уменьшение зоны торможения следует ожидать в случае замены плоского электрода на два взаимно параллельных провода ( $\varnothing 1$  мм) (рис. 7), 1 образующих совместно с активным электродом систему “провод два провода”. При этом происходит перераспределение электрического поля в МЭП, что усложняет алгоритм моделирования ЭГД-течения. В практическом плане наибольший интерес представляет случай расположения трехпроводной системы в плоском канале шириной менее 10 мм, нагруженном на замкнутый контур в виде цилиндрического трубопровода. Исследования ЭГД-течения в трансформаторном масле теневым методом показали, что при подаче напряжения  $U = 25$  кВ от активного электрода 2 (рис. 7) отходят во все стороны отдельные струйки жидкости (рис. 7), где  $S$  – ширина зазора между пассивными электродами. Затем следует вихреобразование между активным и пассивными электродами. Возникают потоки жидкости, направленные от центрального электрода к стенкам канала и в противоположную сторону от пассивных электродов, установленных в канале шириной 6,5 мм на расстоянии 2 мм от активного электрода. По мере их развития и перехода вихревого течения в хаотичное движение жидкости в межэлектродном промежутке происходит уменьшение интенсивности сквозной прокачки рабочей среды вплоть до ее исчезновения.

Иная картина наблюдается при нанесении на центральный провод частичного изоляционного покрытия (до  $2/3$  его поверхности) со стороны, противоположной боковым электродам (рис. 8,а). Движение жидкости в основном осуществляется в виде ячеек между электродами. Турбулизация среды, имеющая место в отсутствие диэлектрического покрытия (рис. 8,б), со стороны активного электрода, обращенного к входному патрубку канала, не наблюдается. В начальный момент от оголенной поверхности центрального электрода отходит веерообразный поток жидкости (рис. 9), направленный в сторону боковых электродов. Около каждого электрода образуется вихревое течение, проникающее частично за межэлектродный промежуток, из которого по центру канала интенсивно выбрасывается диэлектрическая жидкость, что приводит к возникновению сквозной прокачки (рис. 10, кривая 5,  $\delta$  – ширина канала в МЭП). При этом замечено некоторое флуктуирование центральной струи между боковыми электродами.

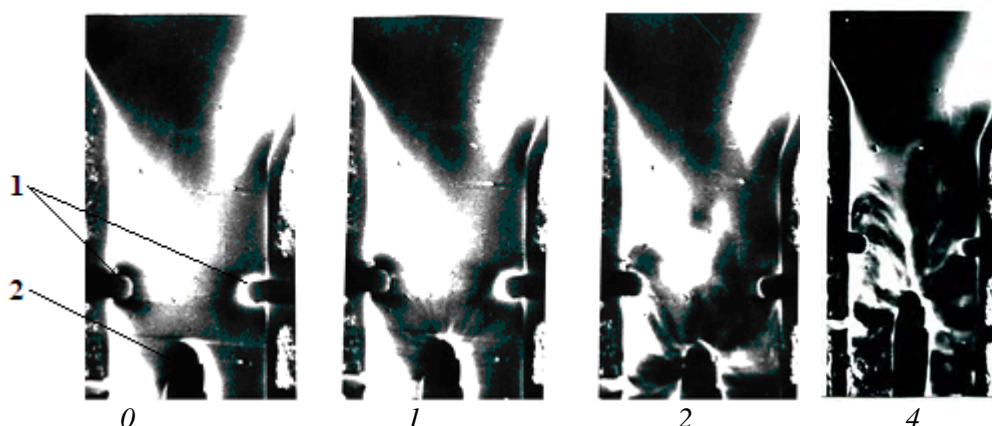
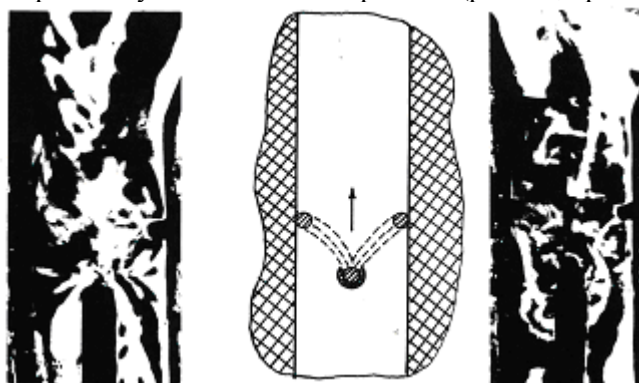


Рис. 7. Развитие ЭГД-течения в отсутствие изоляционного покрытия.  $U = - 25$  кВ,  $l_0 = 2$  мм,  $S = 5$  мм. 0, 1, 2, 4 – последовательность кадров. Скорость киносъемки – 48 кадр./сек

Значительно увеличивается интенсивность прокачки при введении четвертого дополнительного провода (рис. 10, кривые 5 и 6), за межэлектродным промежутком, на расстоянии  $d_1$  от пассивных электродов. Это свидетельствует о том, что поток жидкости, проникающей за МЭП, имеет заряд,



противоположный знаку потенциала боковых электродов. Возможно, зона ускорения простирается за МЭП, где проявляется влияние зоны торможения. Но эти эффекты слабее выражены в случае узкого канала, соответственно зазора между боковыми электродами (рис. 10, кривые 1, 2 и 3, 4).



а

б

Рис. 8. Влияние изоляционного покрытия активного электрода на структуру ЭГД-течения: а – с изоляцией; б – без изоляции.  $U = -20$  кВ,  $l_0 = 2$  мм,  $S = 5$  мм



0

1

2

6

Рис. 9. Развитие ЭГД-течения при наличии изоляционного покрытия на активном электроде.  $U = -20$  кВ,  $l_0 = 2$  мм,  $S = 5$  мм. 0, 1, 2, 6 – последовательность кадров. Скорость киносъемки – 48 кадр./сек

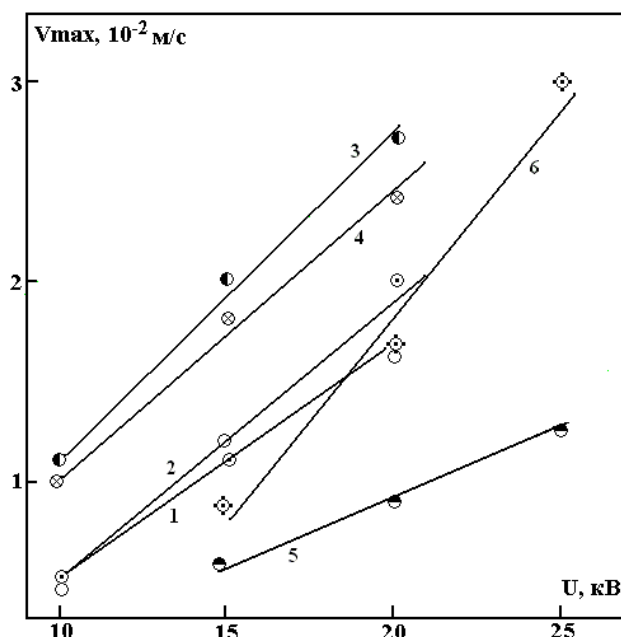


Рис. 10. Зависимость максимальной скорости течения трансформаторного масла в трубопроводе от напряжения. 1 –  $l_0 = 1,6$  мм,  $S = 1,6$  мм; 2 –  $l_0 = 1,6$  мм,  $S = 1,6$  мм,  $d_1 = 1,2$  мм;  $\delta = 3,5$  мм;  $\sigma = 3,7 \cdot 10^{-12}$  См·м<sup>-1</sup>; 3 –  $l_0 = 1,6$  мм,  $S = 1,6$  мм,  $d_1 = 3$  мм; 4 –  $l_0 = 1,6$  мм,  $S = 1,6$  мм;  $\delta = 3,5$  мм; 5 –  $l_0 = 2$  мм,  $S = 5$  мм,  $\delta = 6,5$  мм; 6 –  $l_0 = 2$  мм,  $S = 5$  мм,  $d_1 = 3,5$  мм,  $\delta = 6,5$  мм;  $\sigma = 8 \cdot 10^{-12}$  См·м<sup>-2</sup>

Сужение канала и одновременно зазора между электродами понижает интенсивность возвратных течений в МЭП и повышает устойчивость центральной струи, в результате чего увеличивается максимальная скорость течения рабочей среды по замкнутому контуру (рис. 10, кривые 4 и 5).

Структуры ЭГД-течений, зарегистрированные в узком канале, показаны на рис. 11. Движение жидкости между электродами осуществляется в виде ячеек около каждого бокового электрода. Иногда за счет флуктуации в среде наблюдается смещение центральной струи в сторону одного из электродов, изменяющее масштабы ячеек. При более высоких напряжениях увеличивается неустойчивость центральной струи, ячеек, прослеживается со временем переход из двухячейного движения в одноячейное, и наоборот. Влияния четвертого провода за МЭП на скорость сквозной прокачки не обнаружено.

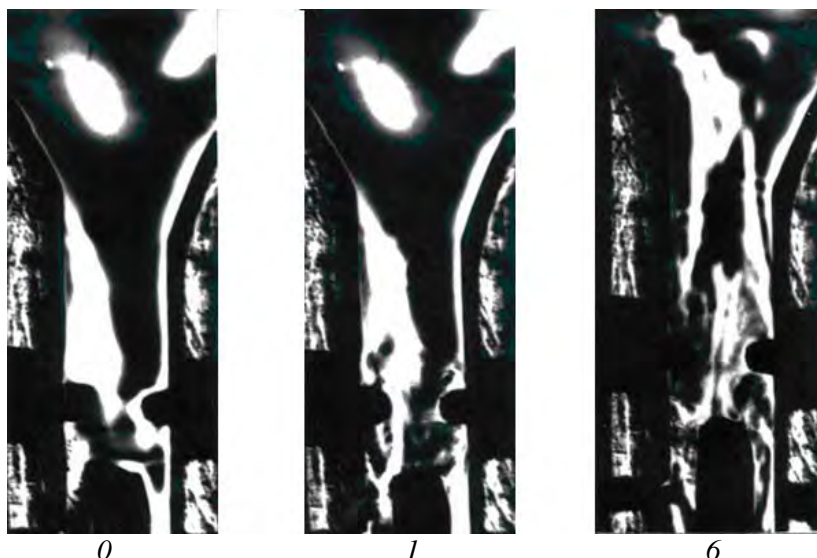


Рис. 11. Развитие ЭГД-течения в узком канале.  $U = - 25$  кВ,  $l_0 = 1,6$  мм,  $S=1,7$  мм,  $\delta = 3,5$  мм. 0, 1, 6 – последовательность кадров. Скорость киносъемки – 48 кадр./сек

Смещение активного электрода от плоскости симметрии на 0,7 мм снижает скорость сквозной прокачки с 1,6 до 1,3 см/сек. Поэтому в трехэлектродной системе большое значение имеет симметричное расположение активного электрода относительно пассивных.

**4. Обсуждение результатов.** Прежде всего заметим, что многие свойства ЭГД-течений как в качественном, так и количественном плане носят общий характер и присущи различным системам электродов, в нашем случае – “провод-плоскость” (компьютерное моделирование) и “3-проводная” система (экспериментальное исследование). Речь идет прежде всего о наличии практически у всех ЭГД-течений ячеистых структур (рис. 1, 8, 9), которые искажают одномерность течений, уменьшая тем самым эффективность ЭГД-устройства. В этой связи важно понять механизм образования этих структур, чтобы устранить их отрицательный эффект. Система электродов “плоскость-провод” является предельным случаем некоаксиальной системы цилиндрических электродов, когда радиус наружного цилиндра  $R$  стремится к бесконечности (рис. 12). Но, как известно, в коаксиальной системе количество ячеистых структур (валов) четное, причем наименьшее их число равно 4 (см. рис. 12) [5]. А это позволяет понять структуру ЭГД-течения в компьютерной интерпретации (рис. 1). Действительно, при постоянном расстоянии ( $l_0$ ) между нижними образующими цилиндров увеличение радиуса ( $R \rightarrow \infty$ ) наружного цилиндра приводит к вырождению верхних ячеек в потоки. При этом нижние испытывают соответствующие деформации.

Таким образом, в перспективе теоретическое рассмотрение задач следует осуществлять в цилиндрической системе некоаксиальных цилиндров, которая в свою очередь методами теории функций комплексного переменного может быть сведена к коаксиальной. Однако это весьма сложная математическая задача, заслуживающая отдельного рассмотрения.

Другая общая особенность ЭГД-течений, как установлено и отмечено выше, – это наличие максимума максимальной скорости в зависимости от межэлектродного расстояния  $l_0$ . Эта

особенность также свойственна и цилиндрической системе, по крайней мере, для средней радиальной безразмерной скорости, которая для модели электрического ветра равна [5]:

$$\bar{v}_{rm} = -0,26 - 0,167\xi - \xi \ln \xi,$$

где  $\xi \equiv r_0 / R$  – отношение радиусов внутреннего и внешнего цилиндров. Максимум скорости приходится на  $\xi_m \cong 0,31$ . Отсюда отношение  $l_0 / r_0 = 10$  ( $l_0 = 5$  мм, рис. 2). Но совпадения и нельзя было ожидать, так как в последнем случае речь идет о максимальной скорости, в то время как в приведенных значениях применительно к цилиндрическому конденсатору речь идет о средней скорости. Кроме того, анализируются различные электродные системы.

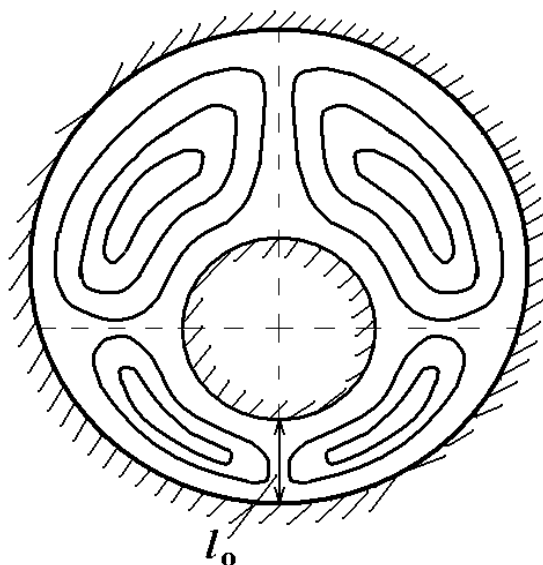


Рис. 12. Структура ЭГД-течений в системе цилиндрических электродов

Другая особенность ЭГД-течений, установленных компьютерным моделированием, о которой было упомянуто, – это резкое падение скорости в непосредственной близости к активному электроду, что объясняется, на наш взгляд, неоднородностью электрического поля с максимумом сразу за поляризационным слоем (неподвижная зона) гетерозаряда, толщина которого обуславливается не столько геометрией системы электродов, сколько электрохимическими процессами, происходящими в пограничных приэлектродных слоях активного электрода, о чем было сказано выше.

Что касается рис. 6, на котором изображены линии тока ЭГД-течения, то четко видно, что средняя по сечению потока скорость в нижней части электрода значительно выше, чем в верхней. В дальнейшем представляется перспективным введение понятия скорости как плотности линий тока (на ед. площади поперечного сечения потока). С помощью этого понятия смогут быть рассчитаны расходные характеристики ЭГД-устройств.

#### **Заключение**

Компьютерное исследование дополнено экспериментальным, что, с одной стороны, позволило подтвердить основные результаты предыдущего исследования, с другой – расширить перспективы дальнейшего изучения и применения изучаемых ЭГД-явлений.

Обсуждены основные результаты с физических позиций и начертаны пути теоретических исследований – применительно к разработкам новых ЭГД-технологий. Проведено численное моделирование ЭГД-течений в широком диапазоне межэлектродных расстояний. Результаты численных экспериментов хорошо соответствуют ранее проведенным натурным экспериментам. Предложенная физическая модель позволяет рассчитывать поля скоростей ЭГД-течения при различных межэлектродных расстояниях, описывать и объяснять особенности ЭГД-течений в малых промежутках. Показано, что при малых расстояниях между электродами на кинематику ЭГД-течения значительное влияние оказывает перекрытие заряженных приэлектродных зон по-



вышенного и пониженного давления. Описан механизм снижения эффективности ЭГД-преобразования при малых МЭП и оценен пороговый размер МЭП, в котором возможно возникновение ЭГД-течений в трансформаторном масле. При конструировании ЭГД-устройств необходимо учитывать описанную зонную структуру ЭГД-течений и наличие приэлектродных зон пониженного давления.

Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-91020-Мол/А и Академии наук Молдовы 06.13CRF.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стишков Ю.К., Павлейно М.А.* // Электронная обработка материалов. 2000. № 1. С. 14–21.
2. *Стишков Ю.К., Буянов А.В., Лазарев А.С.* Моделирование структуры электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов // ЖТФ.2005. № 5. С. 46–51.
3. *Буянов А.В., Стишков Ю.К.* Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов // ЖТФ 2004. № 8. С. 120–123.
4. *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Зависимость характеристик ЭГД течений от размера межэлектродного промежутка // Магнитная гидродинамика. 1984. № 1. С. 131–134.
5. *Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.

*Поступила 26.10.06*

## Summary

At designing electrohydrodynamic (EHD) devices small interelectrode gaps (IEG) are usually used. It is believed that they contribute to the increasing of flow rate or pressure drop. At the same time a significant decrease of velocity of EHD flow was found experimentally. In the work under consideration this drawback was resolved by numerical simulation of EHD flows in the system of electrodes wire-plane. Analysis of structure of region of fluid acceleration reveals the existence of extremum at some distance from the active electrode. The size of the region does not exceed radius of the active electrode. A region of increased pressure also appears near the passive electrode. At decreasing of IEG near the electrode regions begin to interfere with each other and there are regions with decreased velocities of EHD flows in spite of the increase of field intensity. Data on kinematical and charge structures of the near electrode regions as well as the whole interelectrode gap at the variation of the sizes of IEG are given.

---