

Структуры микроЭГД течений в постоянных электрических полях

* А. И. Жакин, ** А. Е. Кузько, *** С. А. Харламов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, 305040, Россия, *e-mail: zhakin@mail.ru, **e-mail: kuzko@mail.ru, ***e-mail: unanimity@list.ru*

Поступила 13.09.2018

После доработки 15.02.2019

Принята к публикации 15.02.2019

Приводятся результаты наблюдения вихревых электрогидродинамических (ЭГД) течений в различных геометриях электродов в областях размером порядка 1 мм и постоянных внешних электрических полях. В качестве рабочих жидкостей использовался раствор трансформаторного масла с йодом, в котором формировалась униполярная проводимость за счет электрохимической инжекции отрицательных ионов с катода. ЭГД течение в виде микровихрей наблюдалось с помощью оптического микроскопа и снималось цифровой видеокамерой. Линии тока фиксировались треками светорассеивающих микрочастиц микронного размера. Скорости течения составляли до 10 см/с при напряжении на электродах 3 кВ.

Ключевые слова: инжекция, напряжение, жидкость, диэлектрик, ЭГД течение, электрический заряд, электрод.

УДК 537.58

DOI: 10.5281/zenodo.3244407

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектрогидродинамические течения (МЭГДТ) развиваются не только в диэлектрических жидкостях, но и в водных и неводных электролитах. По этой причине для объяснения развития микроЭГД течений необходимо использовать методы самых разных научных направлений: физико-химической гидродинамики, электродинамики, электрохимии и т.д. Масштабы микроЭГД течений изменяются от наноразмеров до размеров порядка 1 мм (рис. 1). В настоящее время это направление интенсивно развивается, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в специализированных журналах, например “Microfluid Nanofluid” (см., в частности, обзор [1]).

В настоящее время в области исследований электрогидродинамических (ЭГД) течений широко используются численные методы при униполярной (инжекционной) модели проводимости [2–5]. Следует отметить, что такой подход вызывает в основном теоретический интерес и малоприменим для практического использования. Дело в том, что в высокоомных жидкостях, какими являются жидкие диэлектрики, отсутствуют двойные электрические слои (ДЭС), всегда присутствующие в водных электролитах [6]. Поэтому разрядка инжектируемых ионов на коллекторе имеет активационный характер. Это приводит к их накоплению на коллекторе и, как следствие, затуханию ЭГД течения. Так как время разрядки инжектируемых ионов на

коллекторе, конечно, то приходится отключать напряжение в ячейке на несколько часов, что позволяет восстановить работу ЭГД устройства [7]. Тем не менее, исследование ЭГД течений в постоянных полях вызывает интерес с научной точки зрения для выяснения основных закономерностей развития электроконвекции.

Особый интерес вызывают микро ЭГД течения в пограничных ЭГД слоях [8]. Так, в случае охлаждения горячей плоской поверхности набегающей ЭГД струей теплоотдача происходит через ЭГД пограничный слой, толщина которого имеет размер долей миллиметра. Поэтому инжектирующий острейковый электрод можно располагать на расстоянии порядка 1 мм. В этом случае для развития температурного пограничного ЭГД слоя можно прилагать сравнительно небольшое напряжение на электродах порядка нескольких кВ, например 4–5 кВ, что чрезвычайно важно в технологическом плане.

В данной работе описываются структуры МЭГДТ в диэлектрических жидкостях при максимальном масштабе порядка 1 мм. Исследуются структуры и зависимость скоростей течений от прикладываемых напряжений при различных электродных геометриях и материалах инжектирующих электродов.

МЭГДТ МЕЖДУ ДВУМЯ ЛЕЗВИЯМИ

В настоящее время общепризнано, что ЭГД течения в диэлектрических жидкостях в посто-

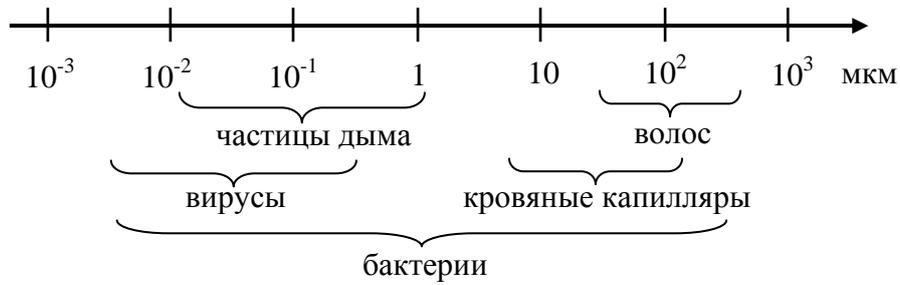


Рис. 1. Масштабы микроЭГД течений.

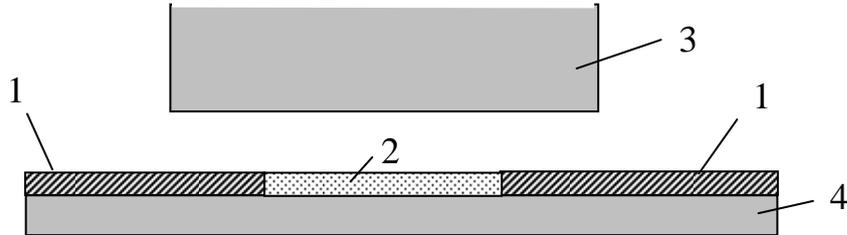


Рис. 2. Схема установки: 1 – электроды; 2 – жидкость; 3 – тубус микроскопа; 4 – оргстекло.

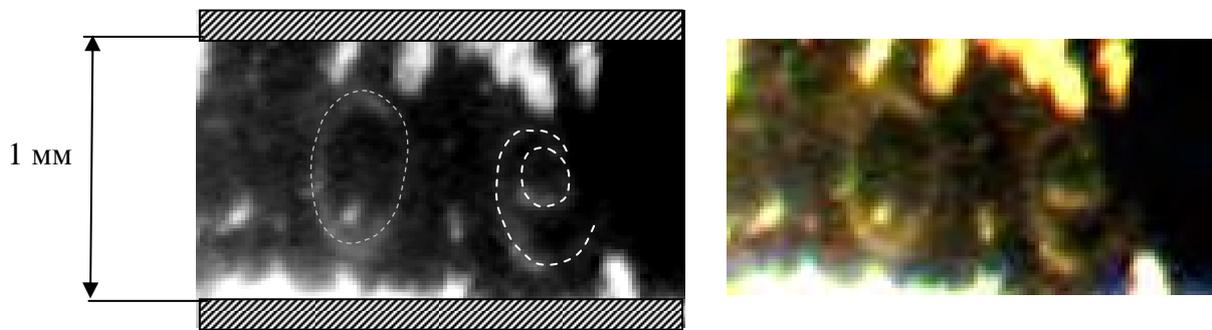


Рис. 3. Структура микровихрей в межэлектродном промежутке (вид сверху).

янных внешних электрических полях развиваются за счет инъекции зарядов с электродов. Наиболее характерно это проявляется в несимметричных электродных системах типа острие-плоскость в неполярных жидких диэлектриках с легирующей добавкой. Например, молекулы растворенного молекулярного йода являются электрооакцепторами, усиливающими инъекцию отрицательных зарядов с катода [9, 10].

Известно, что реальные электроды являются шероховатыми, причем размер микронеоднородностей даже на хорошо полированных электродах имеет порядок 1 мкм и более. При этом коэффициенты усиления напряженности электрического поля на кончиках микронеоднородностей могут достигать значений до 100 и более [11]. Отсюда следует, что микровыступы могут быть эффективными инжекторами зарядов, в окрестности которых могут формироваться вихревые микроЭГД течения. Для проверки этой гипотезы было проведено наблюдение ЭГД течений в межэлектродном промежутке, представляющем собой тонкую щель шириной 1 мм между двумя лезвиями (рис. 2).

В качестве рабочей жидкости использовался раствор трансформаторного масла с йодом (ТМ+J), в котором, как указано выше, реализуется электрохимическая инъекция зарядов с катода. Микронеоднородности на электродах создавались с помощью клея, которым приклеивались лезвия к подложке из органического стекла. Эксперименты показали, что в растворе ТМ+J вблизи микронеоднородностей наблюдаются микровихри (рис. 3). Скорость течения при напряжении на электродах 2 кВ можно оценить по длине треков и времени выдержки кадра (рис. 4), что дает около 0,5 см/с.

Следует отметить, что подобное макроЭГД течение было отмечено в системе «плоский – периодически изогнутый электрод» [9]. Как показывают представленные результаты наблюдений, подобные ЭГД течения наблюдаются и при микромасштабных размерах области.

МЭГДТ В СИСТЕМЕ ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ

Геометрии электродных систем представлены на рис. 5. В качестве острых электродов использовались медь (проволока диаметром

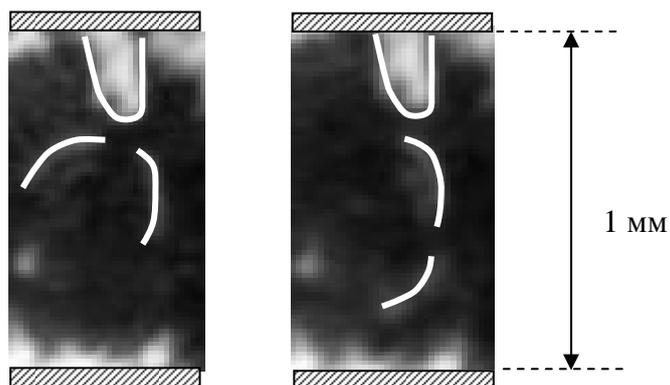


Рис. 4. Последовательные кадры треков светорассеивающих частиц вблизи микровыступа. Время выдержки кадра 1/30 секунды.

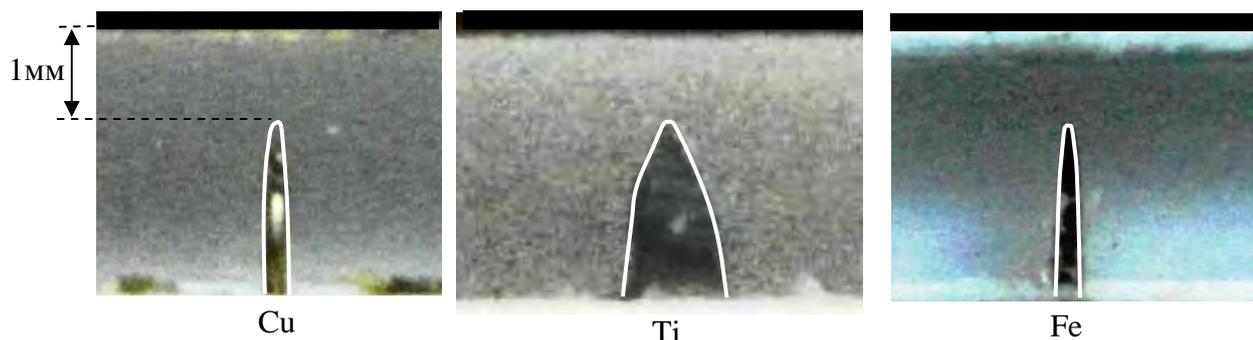


Рис. 5. Фото электродных систем.

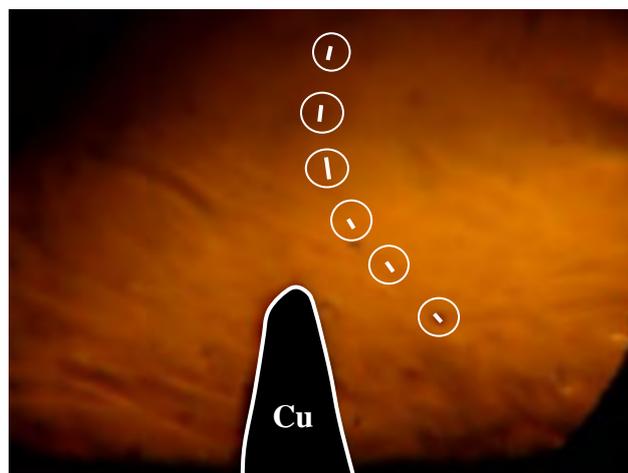


Рис. 6. Треки микрочастиц при медном электроде. Скоростная съемка при 240 кадров в секунду (к/с).

0,25 мм), титан и стальная игла. Плоский противоэлектрод изготовлялся из алюминиевой фольги. Жидкость представляла насыщенный раствор трансформаторного масла с молекулярным йодом, в который добавлялись малые частицы из боросиликатного стекла размером порядка 1 мкм. Острийковые электроды являлись катодами, а плоские – анодами. На электроды подавалось постоянное напряжение 2 кВ.

Как и в предыдущих экспериментах, структура течений фиксировалась цифровой скоростной камерой по трекам светорассеивающих стеклянных частиц. Видеосъемка производилась с помощью микроскопа. Обработка

последовательных кадров позволила построить линии тока и тем самым определить структуру течений. Результаты по обработанным кадрам при различных скоростях съемки представлены на рис. 6–8.

Исследования показали, что течение при любом материале игольчатых электродов направлено от острия и имеет вихревую структуру. При длине трека 0,1 мм и времени выдержки 1/240 с (240 к/с) максимальная скорость течения составляет порядка 2 см/с (см. треки на рис. 6). Наиболее интенсивно микрочастицы прилипают к титановому электроду (см. рис. 7а). Этот эффект обусловлен

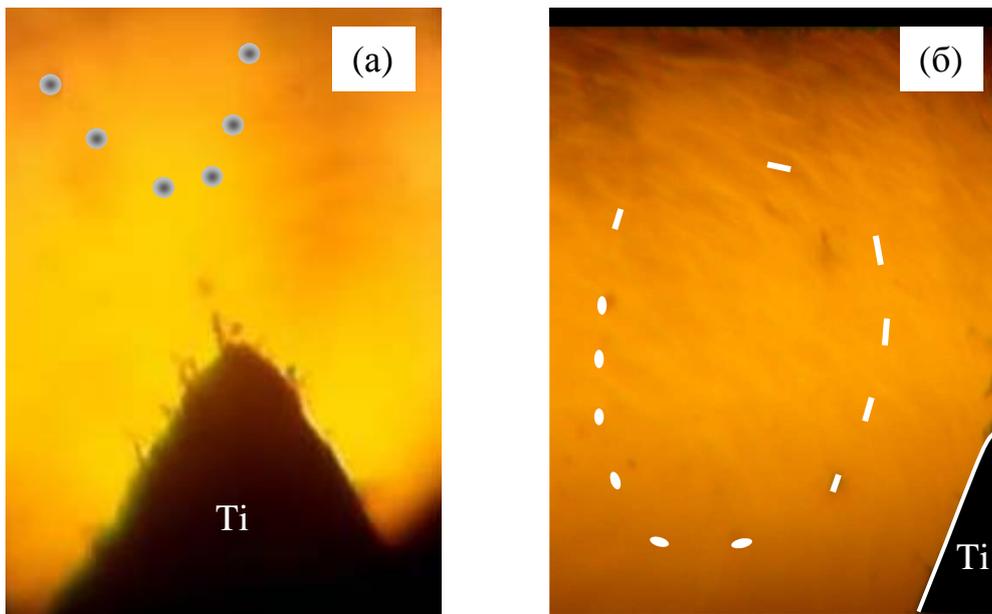


Рис. 7. Структуры течений при титановом электроде: (а) – 240 к/с; (б) – 30 к/с.



Рис. 8. Структуры течений при стальном электроде при 30 к/с.

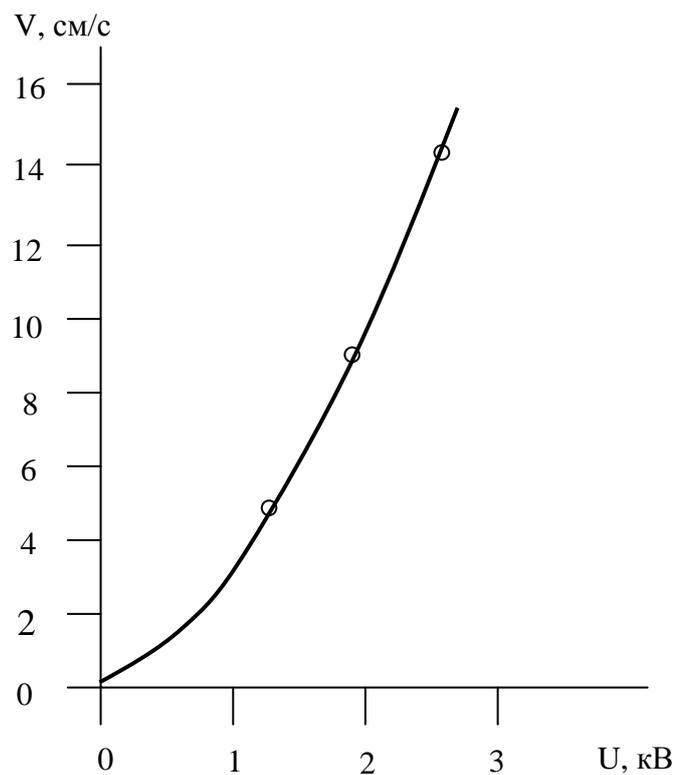


Рис. 9. Зависимость скорости в центральной струе от U при Ti электроде.

сильной его шероховатостью. Эксперименты также показали, что при открытой электродной системе, контактирующей с воздухом, с течением времени в ячейке появляются пылевые частицы, замыкающие электроды (рис. 8). По этой причине электродную систему необходимо делать изолированной. Во всех случаях максимальные скорости течений наблюдаются с кончиков острий (центральные струи – ЦС).

Особый интерес представляет исследование зависимости скорости микроЭГД течений от прикладываемых напряжений при Ті острийковом электроде (рис. 7), так как в этом случае электрод можно считать химически инертным (индифферентным). В этом случае наблюдается только физическая адсорбция легирующей добавки (молекулярного йода J_2), тогда как при медном электроде на его поверхности образуется йодид меди CuJ [12]. Обработка треков микро-частиц в ЦС при Ті электроде и различных напряжениях (рис. 7) позволила построить график зависимости скорости течения от приложенного напряжения U , представленный на рис. 9. Видно, что в этом случае при напряжении 3 кВ скорость течения достигает порядка 15 см/с, а в интервале 1,5–3 кВ линейно зависит от прикладываемого напряжения.

ВЫВОДЫ

1. Структуры вихревых течений МЭГДТ в областях масштаба 1 мм подобны структурам ЭГД течений в областях масштаба порядка 1 см и более.

2. Скорости микроЭГД течений в системе «электродов игла–плоскость» («лезвие–плоскость») достигают значений порядка 5 мм/с при сравнительно низких напряжениях на электродах порядка 2 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chong Z.Z., Tor S.B., Ganán-Calvo A.M., Chong Z.J. et al. *Microfluid Nanofluid.* 2016, 20:66, 14 pages. DOI 10.1007/s10404-016-1722-5.
2. Kang Luo, Jian Wu, Hong-Liang Yi and He-Ping Tan. *Phys Fluids.* 2018, **30**(2), 023602. <https://doi.org/10.1063/1.5010421>.
3. Kang Luo, Tian-Fu Li, Jian Wu, Hong-Liang Yi et al. *Phys Fluids.* 2018, **30**(10), 103601. <https://doi.org/10.1063/1.5047283>.
4. Chirkov V.A., Stishkov Yu.K. *J Electrostat.* 2013, **71**, 484–488.
5. Стишков Ю.К., Чирков В.А. *ЖТФ.* 2012, **82**(1), 3–13.
6. Жакин А.И. УФН, 2006, **186**(3), 289–310.
7. Кожевников И.В., Гросу Ф.П., Болога М.К. *ЭОМ.* 2018, **54**(5), 68–74.
8. Жакин А.И., Кузько А.Е. *Теплофизика высоких температур.* 2001, **39**(5), 1–4.
9. Жакин А.И. *Магнитная гидродинамика.* 1982, (2), 70–78.
10. Жакин А.И. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа.* 1986, (4), 3–13.
11. Месяц Г.А. УФН. 1995, **165**(6), 601–626.
12. Жакин А.И., Кузько А.Е. *Сборник докладов X Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей».* 25–28 июня, С.-Петербург, Россия. С.-Петербург: Издательство СОЛО, 2012, с. 59–61.

Summary

The results of EHD flows in a thin gap (1 mm width) with irregular electrodes and constant external electric fields are presented. The liquid was solution of a transformer oil with iodine. The conductivity was unipolar due to electro-chemical injection of negative ions from the cathode. The flow lines were observed using a microscope. The EHD flows represent micro vortexes with an average velocity 10 cm/s at voltage 3 kV.

Keywords: injection, voltage, liquid, dielectrics, EHD flows, electric charge, electrode.