

Исследование структуры ЭГД-течений в системе электродов «лезвие-плоскость» при помощи PIV-метода

*Ю. К. Стишков, А. А. Ситников, В. А. Чирков

Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия, *e-mail: y.stishkov@spbu.ru

Представлены экспериментально измеренные поля скоростей электрогидродинамических (ЭГД) течений и соответствующие вольт-амперные характеристики в широком диапазоне напряжений (от 1 до 27 кВ) при обеих полярностях. Измерения проводились с помощью метода лазерной анемометрии (или PIV-метода) с высоким пространственным разрешением (около 50 точек на мм²). В качестве рабочей жидкости использовался органический диэлектрик – оливковое масло. Дано детальное описание структуры ЭГД-течений при различных напряжениях и приведены осевые и профильные распределения скорости. Зарегистрирован особый случай, когда в кювете одновременно существуют два противоположно направленных потока, связанных с доминированием разных механизмов зарядообразования. Показано, что распределение скорости в сечении вдоль заостренного электрода является неоднородным. Полученные экспериментальные поля скоростей могут использоваться для количественной верификации компьютерной модели ЭГД-течений.

Ключевые слова: электроконвекция, электрогидродинамика, инжекция, слабопроводящая жидкость, распределение скорости.

УДК 532.5+537.571

ВВЕДЕНИЕ

Ранее были опубликованы [1–3] результаты экспериментальных исследований структуры электрогидродинамических (ЭГД) течений в системе электродов «провод над плоскостью», полученные методом траекторий, или так называемым PTV-методом [4]. Метод траекторий позволяет исследовать только стационарные ЭГД-течения и требует значительного времени для их обработки. Основные опубликованные результаты касались систематических исследований ЭГД-течений в трансформаторном масле без и с примесями бутанола. Измерения были проведены в широком диапазоне напряжений – от порога возникновения течений до пробоя, показано, что ЭГД-течения имеют пороговый характер, а также неразвитый и развитый режимы [1]. Была выявлена и описана [2] зонная структура центральной струи ЭГД-течения, а также экспериментально установлена экстремальная зависимость расхода (средней скорости) в центральной струе от концентрации примесей (низковольтной проводимости жидкости) [3].

В отличие от более ранних работ настоящее исследование проведено с помощью метода лазерной анемометрии, или так называемого PIV-метода (particle image velocimetry) [4], с использованием современной установки Flow Master от компании La Vision и усовершенствованной методики исследования динамических вольт-амперных характеристик [5]. Ввиду все возрастающего интереса к ЭГД-устройствам с протяженными электродами, которые, в частности, используются в ЭГД-теплообменниках [6],

была рассмотрена система «лезвие-плоскость». Подобная конфигурация удобна для экспериментального изучения прежде всего тем, что ЭГД-течения в ней фактически имеют двумерную структуру и, кроме того, обладают высокой стабильностью в широком диапазоне напряжений. Одновременно это обуславливает то, что данная система уже рассматривалась в работах других авторов [7–9], где были исследованы базовые характеристики ЭГД-течений, проанализировано влияние визуализирующих частиц, а также рассмотрен переходной процесс формирования ЭГД-течения. Однако сама структура центральной струи была получена со сравнительно низким пространственным разрешением, не исследован переход между неразвитым и развитым режимами, а также не проверялась однородность распределения скорости в продольном (ориентированном вдоль лезвия) сечении. Кроме того, различие между данным исследованием и циклом работ [7–9] состоит также в использовании жидкостей с сильно различающимися (практически на два порядка) значениями низковольтной проводимости. За счет этого в проведенных экспериментах ЭГД-течения могли вызываться двумя разными механизмами зарядообразования – инжекцией при пониженной проводимости и эффектом Вина – при повышенной.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

PIV-метод лишен недостатков, присущих методу траекторий, однако требует достаточно

сложной аппаратуры и специального программного обеспечения. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Стенд состоит из управляемого высоковольтного источника ВИДН-30 (1), персонального компьютера (6) и установки FlowMaster, в состав которой входят двухимпульсный Nd-YAG лазер (4), камера ImageProX (2), блок синхронизации (5) и пульт ручного управления. Исследуемая жидкость заливается в специальную измерительную ячейку (3) из оргстекла с системой электродов «лезвие-плоскость», изготовленных из стали. Данная геометрия характеризуется сильной неоднородностью распределения электрического поля, что позволяет создать необходимые условия для активации высоковольтных механизмов зарядообразования, но в то же время избежать раннего электрического пробоя жидкости. Напряжение и ток измеряются при помощи двух отдельных быстродействующих АЦП. В настоящей работе в качестве высоковольтного электрода используется промышленное лезвие с радиусом закругления 10 ± 1 мкм и длиной 6 см, а в качестве рабочей жидкости – оливковое масло. Его свойства: низковольтная проводимость 40 пСм/м, относительная диэлектрическая проницаемость 2,85, плотность 910 кг/м^3 , динамическая вязкость 0,07 Па·с. Искусственные примески добавки не применялись.

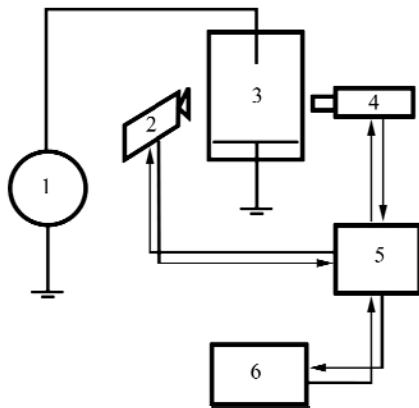


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

Для оценки значения напряженности электрического поля на поверхности высоковольтного электрода было проведено численное моделирование электростатической задачи (без учета объемного заряда) с помощью метода конечных элементов. На рис. 2а представлено рассчитанное распределение электрического поля вдоль пути, проведенного по поверхности лезвия: от заострения к верхней части (схематическое изображение пути представлено на рис. 2б). Напряженность электрического поля имеет выраженный максимум у заострения, где ее значение составляет около 250 кВ/см при межэлектродной разности потенциалов 10 кВ. Однако столь большие значения достигаются лишь на самом

заострении, и напряженность очень быстро спадает при движении вдоль поверхности электрода.

Для сравнения на рис. 2а также представлено аналогичное распределение напряженности электрического поля, получаемое при замене лезвия на иглу с сохранением профиля сечения электрода (то есть при переходе от двумерной модели к осесимметричной). Оба распределения имеют качественное сходство между собой, однако есть одно важное отличие. При одном и том же значении радиуса закругления электрода напряженность электрического поля, а следовательно, и степень неоднородности его распределения в случае лезвиеобразного электрода оказываются на порядок меньше, чем в случае игольчатого. В результате по мере удаления от острия лезвия (при движении от точки «А» к точке «В», рис. 2б) напряженность стремительно снижается и становится меньше среднего значения в межэлектродном промежутке (МЭП), то есть меньше 10 кВ/см. В таких условиях возникновение инжекции с боковой поверхности электрода (выше точки «Б» на рис. 2б) становится практически неосуществимым, что принципиально отличает данную систему электродов от системы «игла-плоскость», в которой инжекция может происходить вдоль всей боковой поверхности, вызывая боковые выбросы заряда и нестабильности течения [10].

Для исследования токовых характеристик в настоящей работе используется метод так называемых динамических вольт-амперных характеристик (ДВАХ) [5], для снятия которых к ячейке с жидкостью прикладывается линейно изменяющееся напряжение и измеряется ток. Экспериментально измеряемый ток в данном случае представляет собой сумму двух компонент: емкостной и ионной. Первая из них зависит лишь от емкости системы электродов и не связана с движением ионов в МЭП, поэтому она вычитается из полученной осциллограммы тока, а для построения ДВАХ оставляется только вторая компонента. Данная методика имеет ряд особенностей и преимуществ, среди которых высокая чувствительность, быстрота сбора данных и простота (по сравнению с другими способами диагностики состояния диэлектрических жидкостей). Детали экспериментальной реализации данной методики можно найти в [5].

PIV-МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ

Метод лазерной анемометрии визуализирующих частиц (или PIV-метод) работает на принципе статистического анализа смещения ансамбля частиц. На рис. 3 представлена оптическая схема установки. Специальная цилиндрическая

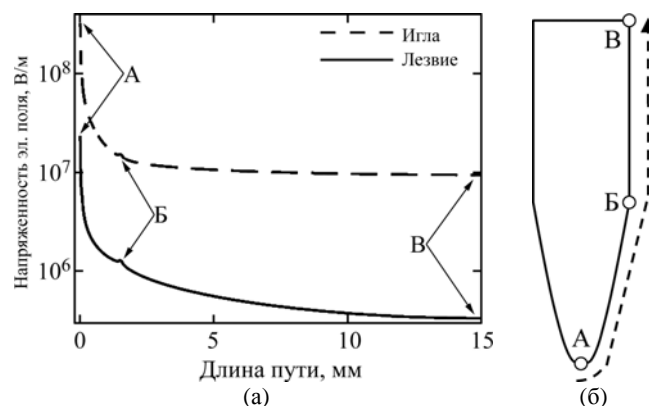


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вдоль лезвия при напряжении 10 кВ (а) и схематическое изображение пути, вдоль которого построено распределение (б).

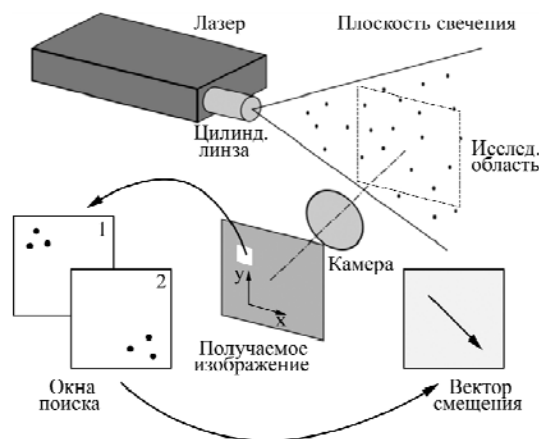


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая принцип работы PIV-метода.

линза создает оптический нож с шириной (в поперечном направлении) 0,5–1 мм. Изображение исследуемой области с визуализирующими частицами регистрируется видеокамерой с разрешающей способностью по интенсивности, равной 14 бит, и размером матрицы 1200×1600 , и потом обрабатывается в коммерческой программе DaVis. Пространственное разрешение при типовом геометрическом размере 12×16 мм составляет 100×100 пикселей на 1 мм^2 . При использовании сканирующего окна с размером 24×24 пикселя и пересечением окон на 50% данное пространственное разрешение соответствует $7 \times 7 = 49$ векторам скорости, получаемым для каждого мм^2 . Во всех экспериментах использовалась концентрация визуализирующих частиц 0,2 г/л.

Для применения PIV-метода производится съемка двух последовательных кадров, во время записи которых подаются две короткие вспышки лазера. Время между вспышками лазера выбирается таким образом, чтобы смещение частиц между кадрами было многократно меньше характерного расстояния, на котором происходит изменение скорости течения. Обработка данных производится с помощью адаптивного алгоритма за несколько итераций. При этом два последовательных кадра разбиваются на сектора, для каж-

дого из которых с помощью операции кросс-корреляции вычисляется наиболее вероятное смещение. Полученные значения смещений преобразуются в векторы. Далее с помощью программного анализа поля скоростей производится удаление ошибочных значений. В результате работы описанного алгоритма получается распределение скоростей визуализирующих частиц, которое отождествляется со скоростью движения жидкости.

В отличие от ранее опубликованных работ [1–3], в которых скорость течения определялась по линиям тока жидкости, относящимся к различным кадрам, в настоящем подходе получаемые данные являются практически мгновенными снимками распределения скоростей во всем межэлектродном промежутке. Поэтому любые локальные флуктуации скорости, связанные с неоднородным поступлением заряда в центральную струю, отражаются в структуре мгновенных снимков поля скоростей. В процессе проведения исследований было снято и обработано несколько сотен мгновенных распределений скорости при различных напряжениях и двух полярностях острия и проведен их анализ.

На рис. 4 приведены мгновенное (рис. 4а) и осредненное (рис. 4б) распределения скорости ЭГД-течений в кювете при напряжении 27 кВ.

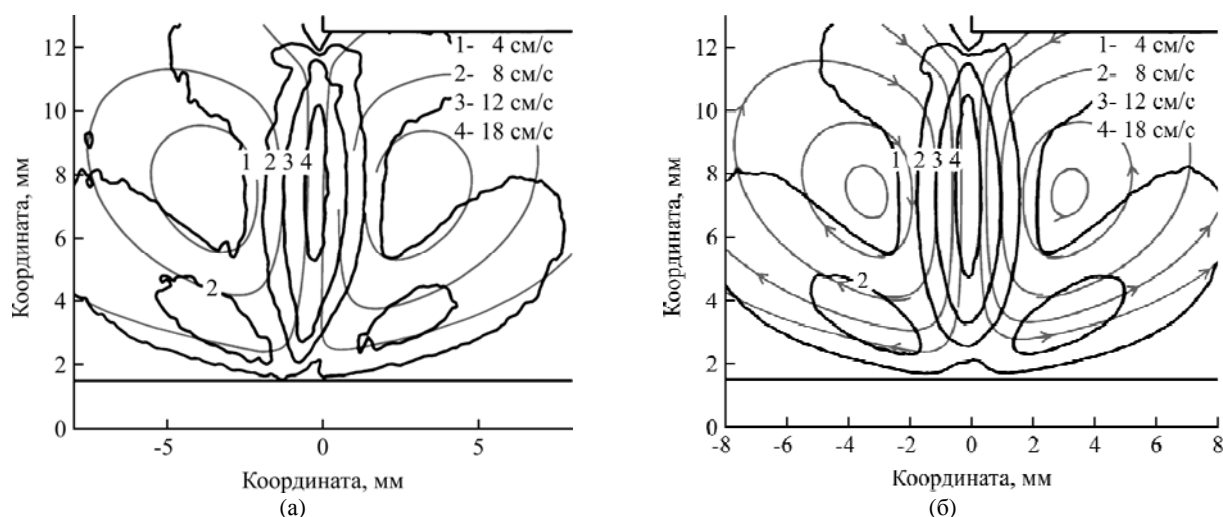


Рис. 4. Мгновенные (а) и усредненные (б) контурные графики скорости и линии тока жидкости при напряжении 27 кВ.

Анализ мгновенных характеристик показал, что при приложении к электродам постоянного напряжения из диапазона 5–25 кВ от электрода-лезвия к плоскости возникает стационарный поток жидкости (оливкового масла). В отличие от очищенного трансформаторного масла в данной системе не наблюдается существенных флуктуаций скорости. Структура поля скоростей ЭГД-потока остается практически неизменной и зависит только от напряжения. Поэтому далее приводятся результаты, полученные путем осреднения множества отдельных мгновенных кадров. Зоной интереса течения является центральная струя, то есть узкая полоска жидкости, простирающаяся от лезвиеобразного электрода к плоскому. В этой области происходит перенос заряда между лезвиеобразным и плоским электродами, и поэтому она является зоной силового воздействия.

В данном исследовании для визуализации течений использовались полые шарики из боросиликатного стекла, которые являются распространёнными частицами для проведения PIV-измерений. Поскольку влияние стеклянных шариков на токовые характеристики и измеряемую скорость ЭГД-течений в схожих системах электродов было изучено ранее [9, 11], то здесь приведем лишь оценку погрешности осреднения скорости. На рис. 5 представлены осевые и профильные распределения скорости и относительной погрешности ее измерения при проведении осреднения по 20 наборам данных при напряжении 27 кВ. Как видно из соответствующих графиков, погрешность осреднения в большей части межэлектродного промежутка в области центральной струи мала и не превышает нескольких процентов. Зоны повышенной погрешности расположены лишь там, где скорость потока пренебрежимо мала – в самом низу струи (рис. 5а) и в области центров завихрений (рис. 5б). Таким образом, в области наибольшего

интереса относительная погрешность осреднения скорости невелика, поэтому полученные результаты имеют количественный характер и могут, например, использоваться для верификации компьютерных моделей ЭГД-течений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поля скоростей и линии тока жидкости при отрицательной полярности электрода-лезвия представлены на рис. 6 и 4б. В диапазоне малых (допороговых) напряжений наблюдаются два очень медленных (около 0,1 мм/с) потока: в верхней части кюветы локализовано течение, направленное вверх вдоль поверхности лезвия, а в нижней части расположен микропоток, направленный от лезвия к противоэлектроду (рис. 6а). Нижний микропоток обусловлен активацией высоковольтных механизмов зарядообразования (инъекции или диссоциации, усиленной электрическим полем), в результате чего у заострения электрода-лезвия формируется область гомозаряда и возникает «классическое» ЭГД-течение. В свою очередь, верхний встречный поток обусловлен наличием неравновесного приэлектродного гетерослоя около верхней части лезвия [12, 13]. Именно на основе данного физического эффекта был создан целый ряд ЭГД-насосов, исследованных как экспериментально [14], так и теоретически [15]. Особый интерес представляет тот факт, что в рассматриваемой системе электродов оба типа ЭГД-течений были зарегистрированы одновременно. Ранее подобная структура была получена лишь в численном эксперименте [16], где показано, что она обусловлена неоднородным распределением напряженности электрического поля по поверхности заостренного электрода.

При повышении напряжения и по мере усиления инъекции встречное течение вдоль поверхности лезвия постепенно исчезает и остается

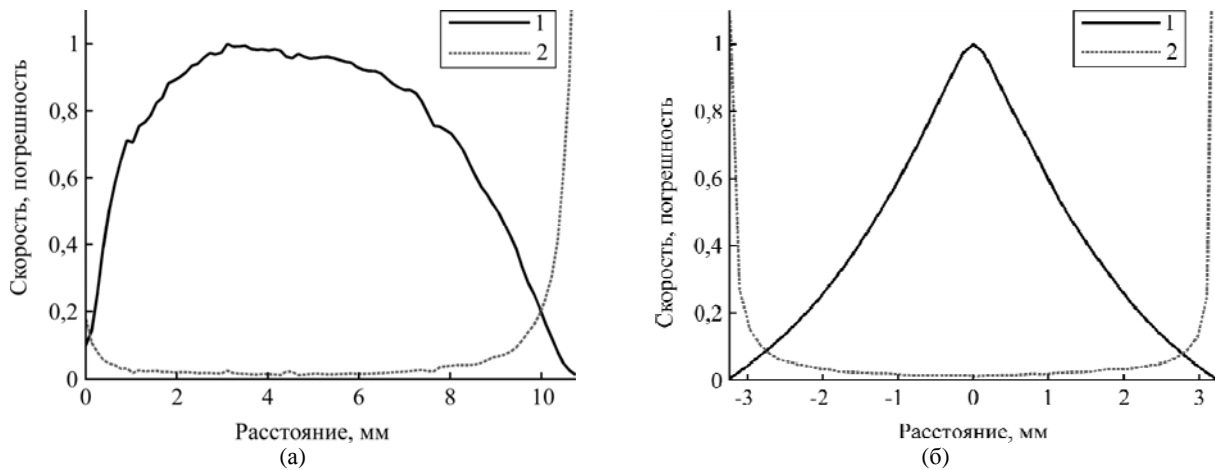


Рис. 5. Линейные распределения скорости жидкости (1), нормированной на максимальное значение, и относительной погрешности осреднения (2) вдоль осевого (а) и профильного (б) путей; осевой путь проведен вертикально от заострения лезвия до центра плоскости, профильный – горизонтально между центрами завихрений.

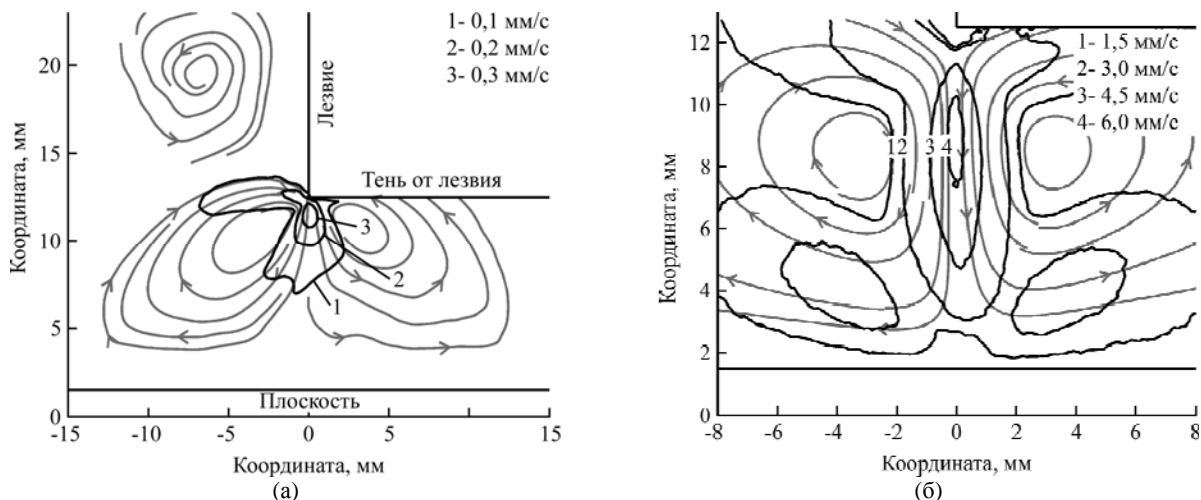


Рис. 6. Контурные графики скорости и линии тока жидкости при напряжениях 1 (а) и 8 кВ (б) при отрицательной полярности.

только один поток, направленный от лезвия вниз. Подобное изменение структуры течения связано со сменой полярности приэлектродного слоя, что детально описано в теоретической работе [17]. Соответствующее напряжение можно считать порогом возникновения ЭГД-течений инжекционного типа. Отметим, что для протяженных электродов переход к инжекционному течению происходит в некотором диапазоне напряжений: в рассмотренном случае в интервале 1–2 кВ. В этом диапазоне напряжений течение имеет неразвитый характер, при этом центральная струя, стартующая с электрода-лезвия, не доходит до противоэлектрода, а растекается в межэлектродном промежутке. При более высоких напряжениях центральная струя достигает противоэлектрода (рис. 6б), а течение становится развитым. В развитом режиме при увеличении напряжения (рис. 4б) скоростная структура центральной струи остается неизменной, изменяется только величина средней скорости течения. Инжекционный поток представляет собой узкую центральную струю, направленную от лезвия к противоэлектроду, в котором зона ускорения распо-

ложена под лезвиеобразным электродом, и два возвратных вихря слева и справа от плоскости симметрии течения. Следует отметить, что усредненные распределения практически неотличимы от мгновенных.

Описанные особенности, а также зонная структура центральной струи ЭГД-течения особенно отчетливо прослеживаются на осевых и профильных распределениях скорости, представленных на рис. 7. В режиме неразвитого течения непосредственно под электродом расположена короткая область ускорения, сразу переходящая в зону торможения, в то время как в случае развитого течения область ускорения переходит в зону квазиоднородного течения, в пределах которой скорость вдоль линий тока практически не изменяется. Эта зона занимает большую часть МЭП и у противоэлектрода сменяется областью торможения. Наличие зоны квазиоднородного течения косвенно подтверждает, что инжекционное зарядообразование в данной системе является преобладающим, поскольку, согласно [18, 19], в случае проявления эффекта Вина скорость центральной струи

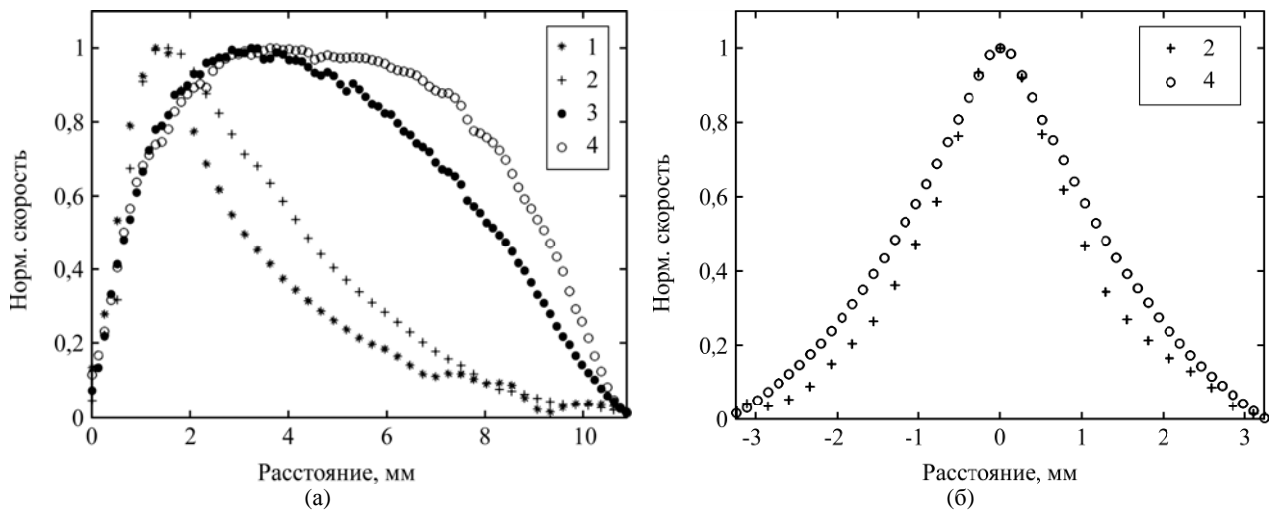


Рис. 7. Осевые (а) и профильные (б) распределения скорости в центральной струе ЭГД-течения с разрешением 85 точек на график при напряжениях, кВ: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 8 и 4 – 27 (при отрицательной полярности).

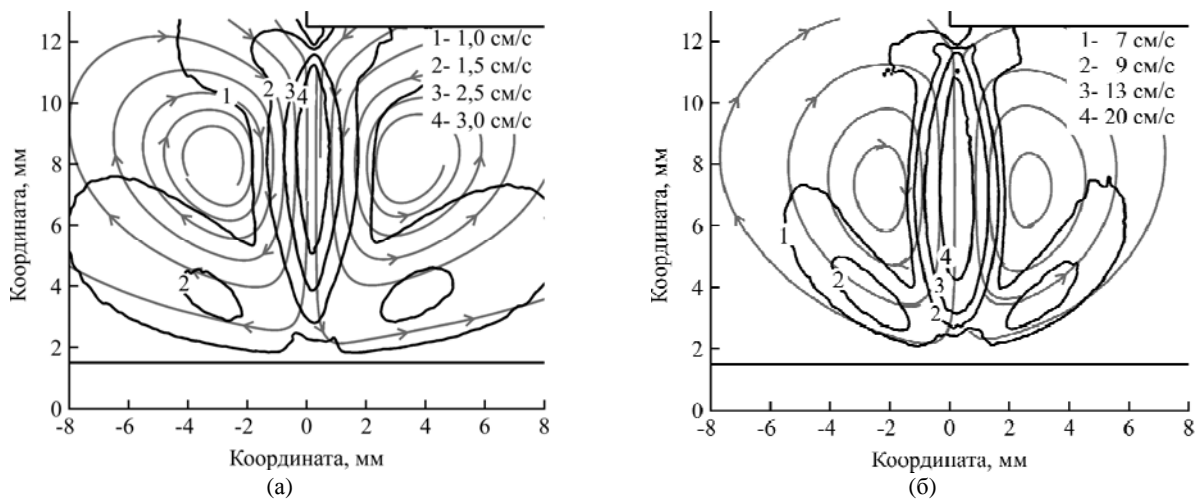


Рис. 8. Контурные графики скорости и линии тока жидкостей при напряжениях 11 (а) и 27 кВ (б) при положительной полярности.

должна спадать на протяжении большей части МЭП.

На рис. 7б приведены профили скорости центральной струи на уровне центров завихрений при двух напряжениях. Экспериментальные точки для различных напряжений совершенно точно описываются единой гауссовой зависимостью. Профили скорости центральной струи при различных напряжениях практически совпадают, что свидетельствует о неизменной толщине силовой зоны течения, то есть заряженной струйки, текущей от лезвия к плоскому электроду. Все распределения имеют плотную насыщенность экспериментальными точками как внутри заряженной области центральной струи, так и во внешних областях. Все распределения отлично воспроизводятся при повторении экспериментов.

На рис. 8 приведены карты линий уровня скорости при положительной полярности лезвиеобразного электрода. Как можно заметить, изменение полярности не повлияло на зонную структуру развитого ЭГД-течения и его стабиль-

ность. Кроме того, можно даже отметить небольшое увеличение интенсивности регистрируемых течений. В свою очередь, все это обозначает, что в оливковом масле изначально присутствует достаточное количество как электроакцепторных, так и электронодонорных примесей, обеспечивающих интенсивное зарядообразование в результате высоковольтных приэлектродных реакций.

Сравним полученные результаты с теми, которые представлены в литературе. Прежде всего, стоит отметить, что измеренные PIV-методом поля скоростей имеют хорошее качественное совпадение с результатами, полученными ранее с помощью PTV-метода для трансформаторного масла и представленными в [1]. Это соответствие касается зонной структуры развитых ЭГД-течений, наличия выраженного участка квазиоднородного течения, а также неизменности профилей скорости центральной струи при изменении напряжения. Вместе с тем сравнение с результатами, полученными также PIV-методом, но для более проводящей жидко-

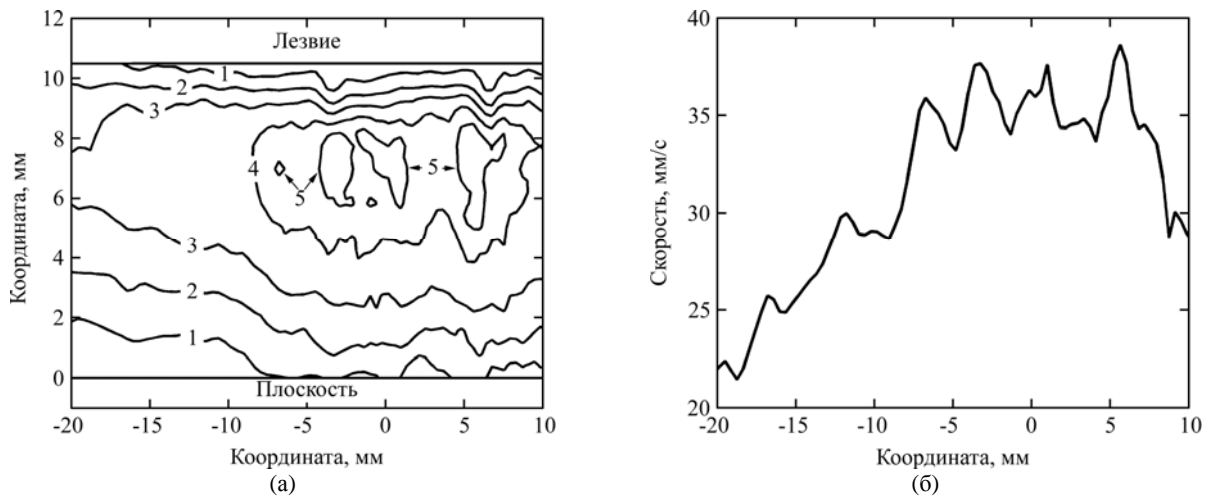


Рис. 9. Контурный (а) и профильный на высоте 7 мм до плоскости (б) графики скорости вдоль лезвия при напряжении 20 кВ; значения скорости, мм/с: 1 – 3, 2 – 12, 3 – 21, 4 – 30 и 5 – 36.

сти [7–9] (по отношению как к оливковому, так и трансформаторному маслам), позволяет выделить несколько отличий. Во-первых, на графиках, представленных в [9], отсутствует область квазиоднородного течения, жидкость разгоняется вплоть до середины МЭП, и, как следствие, максимум скорости располагается на значительно большем удалении от заострения лезвия. Во-вторых, согласно [7], при повышении напряжения снижается стабильность ЭГД-течения и возникают колебания центральной струи. В-третьих, в [8, 9] боковые струи течения распространяются вплоть до самых стенок кюветы и центры завихрений течения расположены примерно посередине между центральным сечением и стенкой; в то же время в настоящей работе линии тока жидкости быстро отклоняются от плоского электрода и центры завихрений расположены на расстоянии всего лишь 2–3 мм (при полуширине кюветы 20 мм). Можно предположить, что подобные качественные различия связаны с преобладанием разных механизмов зарядообразования.

Наконец, рассмотрим экспериментальное поле скоростей в продольном сечении, проходящем через заострение лезвия. Ранее при исследовании структуры ЭГД-течений в системах с протяженными электродами (например, с лезвием или проводом) считалось, что поле скоростей не зависит от расположения сечения, то есть от координаты, отсчитываемой вдоль электрода, однако экспериментальная проверка этого предположения не проводилась. Восполнить этот пробел удалось благодаря использованию современной PIV-методики, которая позволяет равномерно визуализировать поток одновременно во всем объеме, а также дает возможность точно подстраивать лазер, проводя быструю предварительную обработку данных с последующей корректировкой сечения. Соответствующие результаты – контурный график скорости и его гори-

зонтальное сечение – представлены на рис. 9. В область видеозаписи попала половина лезвия (3 из 6 см) с серединой, расположенной в точке с координатой $x = 0$. Как видно из графика, область квазиоднородного течения локализована только лишь в пределах 1 см около середины лезвия, в то время как при движении к его краям интенсивность ЭГД-потока снижается. Более того, как следует из профильного сечения (рис. 9б), даже в центральной области скорость не постоянна, а имеет ряд локальных минимумов и максимумов. У подобной структуры течения есть некоторое качественное сходство с той, которая характерна для электрического ветра при отрицательной полярности электрода, когда силовые области (очаги коронного разряда) расположены периодически [20].

На рис. 10 приведены зависимости средней безразмерной скорости (среднего электрического числа Рейнольдса Re_{el}) от напряжения и ДВАХ кюветы, полученные при положительной и отрицательной полярностях лезвия при скорости изменения напряжения 2 кВ/с. При расчете электрического числа Рейнольдса подвижность ионов принималась равной $10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, средняя напряженность электрического поля рассчитывалась как отношение напряжения к длине МЭП, а в качестве характерной скорости бралось ее среднее значение по профильному сечению, проходящему через центры завихрений. Для обеих полярностей наблюдается практически линейный рост безразмерной скорости, начиная с напряжения 5 кВ; это соответствует квадратичному характеру аналогичной зависимости скорости от напряжения, что, в частности, согласуется с [18]. Небольшой разброс экспериментальных точек относительно аппроксимирующей прямой, возможно, связан со смещением областей пониженной и повышенной скоростей, представленных на рис. 9, перпендикулярно к выбранному поперечному сечению кюветы. Кроме прочего,

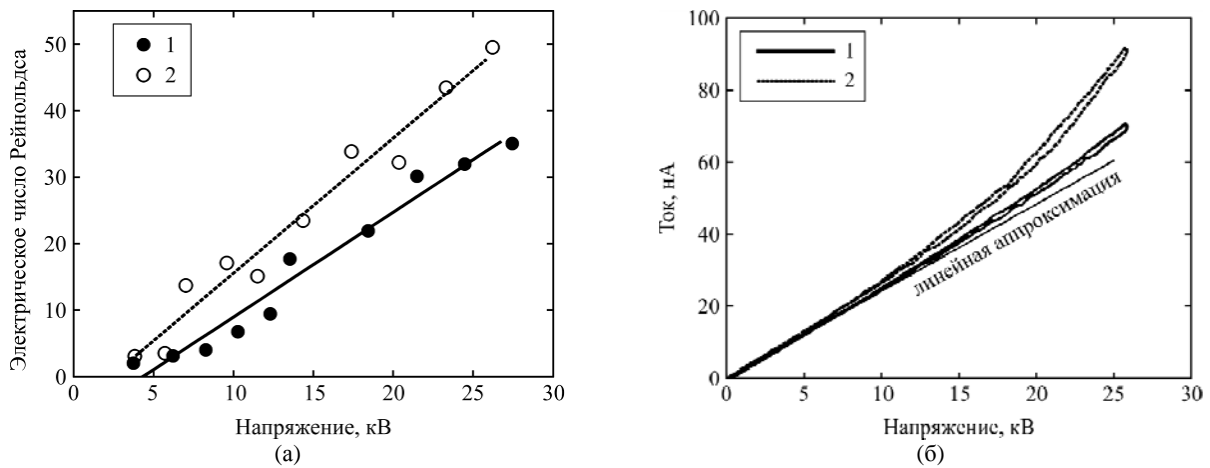


Рис. 10. Зависимость электрического числа Рейнольдса от напряжения (а), динамические вольт-амперные характеристики при отрицательной (1) и положительной (2) полярностях (б) и линейная аппроксимация их начального участка.

стоит отметить, что при положительной полярности скорость оказывается выше. Это согласуется с тем, что полный ток, протекающий сквозь ячейку, также оказывается больше при положительной полярности. Сама вольт-амперная характеристика имеет вполне типовой вид: она начинается с линейной зависимости, одинаковой для обеих полярностей, а далее омический участок переходит в нелинейный высоковольтный. Поскольку ветви роста и спада напряжения на обеих ДВАХ практически совпадают, то, согласно [19], во-первых, данная система успеет подстраиваться под изменяющееся напряжение и, во-вторых, в объеме не происходит накопления объемного заряда. Кроме того, ток практически не флуктуирует, что свидетельствует о значительном количестве естественных примесей, обеспечивающих устойчивый уровень инжекции в жидкость.

ВЫВОДЫ

Приведенные ранее выводы о структуре и режимах ЭГД-течений подтверждаются результатами систематических исследований ЭГД-течений, проведенных PIV-методом на современной установке. Достоверность исследований обеспечена невысокой погрешностью измерений в области интереса, хорошей воспроизводимостью результатов и обширной базой полученных данных.

Особенностями системы «лезвие-плоскость» являются наличие двух противоположно направленных потоков в диапазоне низких напряжений, а также высокая стабильность ЭГД-течений во всем диапазоне их существования (от порога возникновения до пробоя). Кроме того, спецификой системы с протяженным электродом является неоднородность распределения скорости в продольном сечении. Структурные особенности ЭГД-течений обусловлены оригинальной зарядовой структурой центральной струи и носят универсальный характер, то есть касаются не

только оливкового или трансформаторного масла, но и иных диэлектрических жидкостей (по крайней мере с близкими значениями низковольтной проводимости). Характер полученных данных свидетельствует об инжекционном механизме образования заряда в оливковом масле. Высокая интенсивность инжекции обеспечивается наличием естественных электроноакцепторной и электронодонорной примесей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-07628. Экспериментальные измерения проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Геомодель» и «Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники».

ЛИТЕРАТУРА

1. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Магнитная гидродинамика*. 1979, (4), 46–52.
2. Стишков Ю.К. *Магнитная гидродинамика*. 1984, (3), 136–139.
3. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Магнитная гидродинамика*. 1979, (1), 74–79.
4. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T. and Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry: a Practical Guide*, 2nd edition. Berlin: Springer, 2007, 448 p.
5. Chirkov V.A., Stishkov Yu.K., Sitnikov A.A. Features of Current Passage Processes in Liquid Dielectrics at the Injection and Dissociation Mechanisms of Charge Formation. *Proc. Intern. Symp. on Electrohydrodynamics, ISEHD 2014*. Okinawa (Japan), 2014, 1–6.
6. Жакин А.И., Кузько А.В. *ТБТ*. 2001, **39**(5), 840–842.
7. Traoré Ph., Daaboul M., Louste Ch. *J Phys D Appl Phys*. 2010, **43**, 1–8.
8. Daaboul M., Louste Ch. and Romat H. *J Electrostat*. 2009, **67**, 359–364.
9. Daaboul M., Louste Ch. and Romat H. *IEEE T Dielect El In*. 2009, **16**(2), 335–342.
10. Стишков Ю.К., Чирков В.А. *ЖТФ*. 2012, **82**(1), 3–13.

11. Daaboul M., Louste C., Traoré P. Intrusion of Seeding Particles on PIV Measurements of an EHD Flow. *Proc. Intern. Conf. on Modern Problems of Electrophysics and Electrohydrodynamics, MPEE 2015*. St. Petersburg (Russia), 2015. 13–16.
12. Atten P. and Seyed-Yagoobi J. *IEEE T Dielect El In.* 2003, **10**(1), 27–36.
13. Гросу Ф.П., Болога М.К. *ЭОМ*. 2007, **43**(1), 47–51.
14. Jeong S.-I., Seyed-Yagoobi J. *J Electrostat.* 2002, **56**, 123–133.
15. Feng Y., Seyed-Yagoobi J. *Phys Fluids.* 2007, **19**, 057102.
16. Стишков Ю.К., Чирков В.А. *ЖТФ*. 2013, **83**(12), 119–127.
17. Жакин А.И. *Успехи физических наук*. 2012, **182**(5), 495–520.
18. Apfelbaum M.S., Apfelbaum E.M. *J Electrostat.* 2001, **50**, 129–142.
19. Chirkov V.A., Stishkov Yu.K., Sitnikov A.A. *IEEE T Dielect El In.* 2015, **22**(5), 2763–2769.
20. Елагин И.А., Яковлев В.В., Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование эффективности охлаждения протяженного нагревателя электрическим ветром. *Сб. докл. XI Междунар. науч. конф. «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики»*. Санкт-Петербург, 2015, 330–333.

*Поступила 04.09.15
После доработки 28.10.15*

Summary

The paper presents experimentally measured velocity distributions of electrohydrodynamic (EHD) flows and corresponding current-voltage characteristics in a wide voltage range (from 1 up to 27 kV) at both polarities. Measurements were carried out by the particle image velocimetry (or PIV) with a high spatial resolution (about 50 values per mm²). An organic dielectric – olive oil – was used as working liquid. The detailed description of the EHD-flow structure at various voltages as well as axial and profile velocity distributions are presented. A special case was observed when there were two reversely directed vortexes caused by the concurrent effect of two different mechanisms of charge formation. The velocity distribution in the section along the sharpened electrode was shown to be non-uniform. The results can be used for the quantitative verification of computer models of EHD flows due to high measurement accuracy.

Keywords: electroconvection, electrohydrodynamics, injection, low-conducting liquid, velocity distribution.