

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Ю.К. Стишков, С.Ю. Красильников, В.А. Чирков

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

Представлены результаты экспериментального исследования ЭГД-течений, возникающих в системе со сверхсильнонеоднородным электрическим полем. Высокая степень неоднородности определена благодаря использованию активного электрода-иглы с радиусом закругления 3 мкм. Получены стационарные и динамические вольт-амперные характеристики и зависимость скорости ЭГД-течений от напряжения. Показано, что при высокой скорости модуляции напряжения динамические вольт-амперные характеристики имеют гистерезисный характер. Проведено исследование влияния электронно-акцепторных примесей на вид вольт-амперных характеристик и интенсивность ЭГД-течений. Зарегистрированы возвратные ЭГД-течения, возникающие после выключения напряжения. Результаты исследования сопоставлены с аналогичными данными, имеющимися в литературе, в случае менее неоднородных полей.

УДК 532.5+537.571

ВВЕДЕНИЕ

Ранее [1–4] при помощи экспериментального исследования и численного моделирования была изучена структура электрогидродинамических (ЭГД) течений в сильнонеоднородных электрических полях для электродов типа игла над плоскостью, а также изучен процесс установления ЭГД-течений [5]. Показано, что течения сохраняют типовую зонную структуру, описанную ранее для электродов типа провод над плоскостью. Силовая структура течений определяется тонкой струйкой заряженной жидкости, распространяющейся от игольчатого электрода к плоскому. Типовые механизмы зарядообразования в жидких диэлектриках описаны, в частности, в [6]. В случае сильнонеоднородных электрических полей преобладающим механизмом зарядообразования является инжекция с поверхности игольчатого электрода. Непосредственно под кончиком иглы формируется зона пониженного давления, причем понижение давления в этой зоне весьма существенно и достигает 0,1 атм при напряжении 30 кВ. В настоящей работе приводятся результаты исследования ЭГД-течений в сверхсильнонеоднородном электрическом поле. Увеличение степени неоднородности поля достигнуто тонкой заточкой игольчатого электрода, при помощи которой удалось уменьшить радиус закругления игольчатого электрода до 3 мкм.

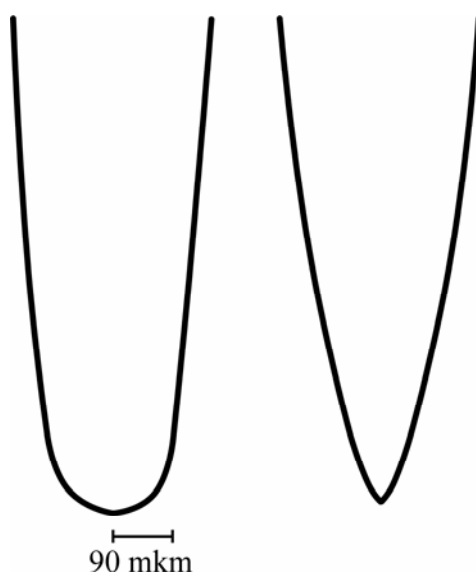


Рис. 1. Контуры электродов-игл (№ 1 – слева, № 2 – справа)

На рис. 1 представлены контуры игольчатых электродов, полученные по экспериментальным фотографиям, снятым при помощи оптического микроскопа с цифровой видеокамерой. Игла № 1 использовалась в серии экспериментов, описанных ранее [3–5], игла № 2, полученная путем заточки, – в настоящей работе.

По мнению некоторых авторов, использование микроострий, обеспечивающих сверхвысокие локальные электрические поля, должно обеспечить эффективное зарядообразование и эффективные ЭГД-течения даже при относительно низких напряжениях. Исследованию вопроса интенсификации зарядообразования в жидкости и изучению соответствующей структуры ЭГД-течений в сверхвысоких электрических полях и посвящена данная статья. Новизна настоящего исследования заключается в уменьшении радиуса заострения электрода–иглы до размера порядка единиц микрометров, а также в сочетании применения микроостриевого электрода с введением в хорошо очищенную диэлектрическую жидкость электронно-акцепторных добавок.

Характерные значения локальной напряжённости электрического поля в большинстве имеющихся работ (в частности, в [3–5]) не превышали 10^8 В/м в рабочем диапазоне напряжений. В данной работе благодаря малому радиусу электрода удалось обеспечить локальные напряжённости электрического поля как минимум на порядок выше. Чтобы их оценить, было проведено моделирование электростатической задачи без учёта объёмного заряда. Распределения напряжённости электрического поля вдоль поверхности игольчатых электродов (от кончика иглы и до расстояния 1 мм) представлены на рис. 2,а (в логарифмическом масштабе по оси ординат). Из этих графиков видно, что на поверхности иглы № 2 напряжённость электрического поля примерно на порядок выше, чем в случае иглы № 1.

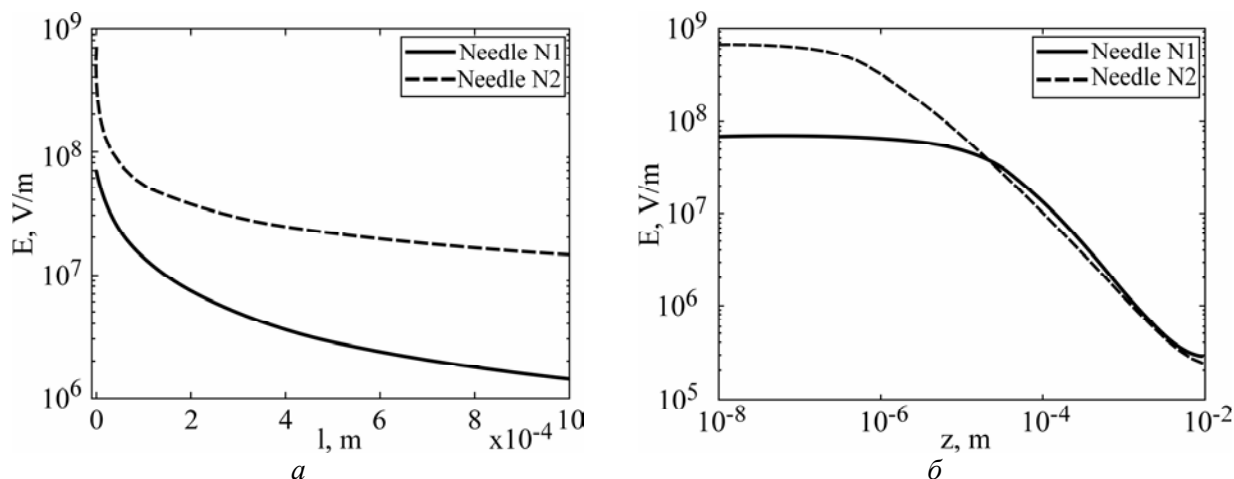


Рис. 2. Распределение напряжённости электрического поля: а – вдоль поверхности игл; б – вдоль оси моделей при напряжении 10 кВ

На рис. 2,б представлены осевые графики распределения напряжённости электрического поля. Из них видно, что в ближайшей окрестности игольчатого электрода с характерным размером в 10 мкм напряжённость электрического поля в системе с острой иглой выше, чем в системе с тупой иглой. В основной части межэлектродного промежутка (МЭП) – от 1 мм до 10 мм – напряжённости электрического поля близки, и различия между ними не превышают 10%.

При межэлектродной разности потенциалов 15 кВ на кончике электрода иглы (№ 2) максимальная напряжённость электрического поля достигает значений около 10^9 В/м, что соответствует уровню внутриатомных полей. Можно ожидать, что в таких сверхсильных электрических полях возможно проявление новых эффектов. Во-первых, становится возможной автоэлектронная эмиссия в жидкость с последующей локализацией электронов в так называемых электронных пузырях. Соответствующий эффект изучался ранее в ряде работ и использовался, в частности, для повышения объёмной плотности заряда в ЭГД-распылителях [7]. Во-вторых, в столь сильных полях должен проявиться эффект Вина, что в свою очередь должно изменить структуру возникающих в жидкости ЭГД-течений. Кроме того, под кончиком игольчатого электрода в зоне пониженного давления вполне возможно появление кавитации.

ЭГД-ТЕЧЕНИЯ В ЧИСТОМ ВАЗЕЛИНОВОМ МАСЛЕ

В качестве хорошо очищенного диэлектрика использовалось вазелиновое масло с низкой вольтной проводимостью $\sigma = (2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-14}$ Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$. Соответствующее время максвелловской релаксации

$$\tau = \epsilon\epsilon_0/\sigma$$

составляет около 700 с.

Экспериментальная кювета представляет собой цилиндрический сосуд из прозрачного пластика диаметром 6 см и высотой 7 см; стальной игольчатый электрод расположен на оси кюветы на расстоянии 1 см от плоскости. Высокое напряжение прикладывается к электроду-игле.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемой системы были получены как в стационарном, так и в динамическом режиме (рис. 3), то есть при модуляции напряжения пилообразным сигналом с различными скоростями модуляции. Благодаря автоматизации процесса получения и обработки ВАХ измерения проводились многократно, что позволило убедиться в воспроизводимости соответствующих результатов. Снятые динамические ВАХ были сопоставлены с ВАХ, полученными обычным способом, когда значения тока измерялись при фиксированных напряжениях после завершения всех переходных процессов. Измерения тока производились при помощи пикоамперметра Keithley 6485, что позволило измерять токи порядка пикоампер, начиная с напряжений в несколько сотен вольт.

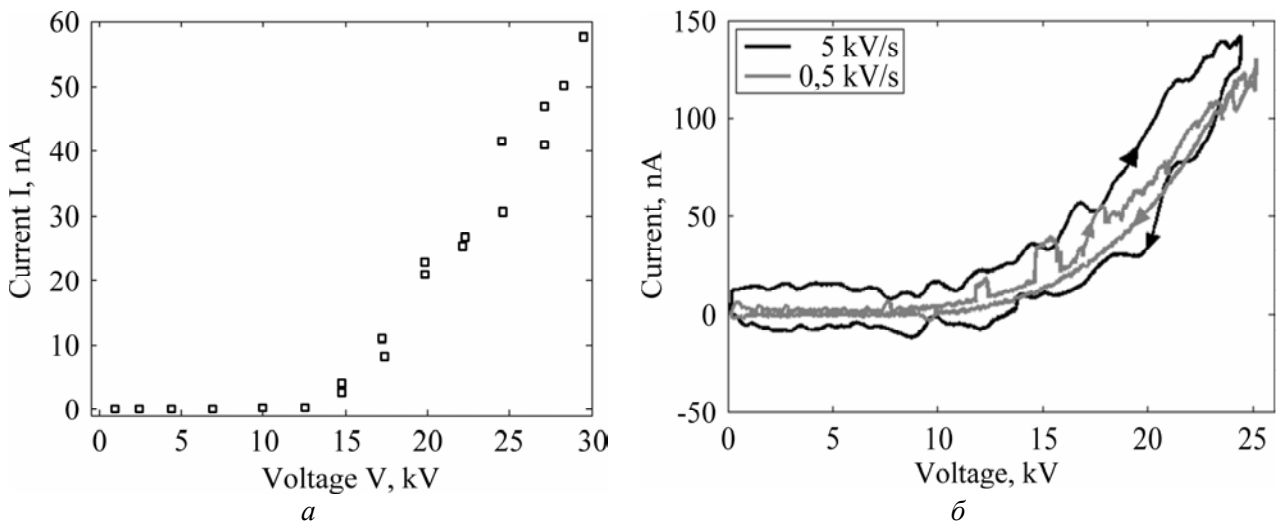


Рис. 3. Стационарная (а) и динамические (б) ВАХ, снятые при двух скоростях изменения напряжения (5 и 0,5 кВ/с) при отрицательной полярности

Изучение динамических ВАХ показывает, что при определенных условиях, а именно при достаточно высокой скорости изменения напряжения ВАХ имеют гистерезисный характер. Так, ток в режиме увеличения напряжения выше тока в режиме уменьшения напряжения, что особенно отчетливо видно при скорости изменения напряжения 5 кВ/с. На фоне плавного роста тока заметны его флуктуации. При малых скоростях модуляции напряжения гистерезис вырождается, и динамические ВАХ совпадают со стационарными. Величины токов незначительны и не превышают полутора ста nanoamper. Порог возникновения ЭГД-течений составляет 9000 ± 500 В. В той же жидкости с иглой № 1, радиус заострения которой примерно в 30 раз больше, чем у иглы № 2, порог заметно выше и составляет 20 кВ.

Обработка и анализ кинематики течений проводились с помощью оригинальной программы EHD Reader [8–9]. Съёмка ЭГД-течений для восстановления поля скоростей производилась в установленном режиме после завершения всех переходных процессов, временной масштаб которых оценивался по времени максвелловской релаксации. Максимальная зарегистрированная скорость течения при напряжении 26,3 кВ составила 42 см/с (рис. 4,а). Для всех рассмотренных напряжений кинематическая структура полученных ЭГД-течений весьма идентична (рис. 4,б). Особенностью полученных результатов является то, что зона ускорения жидкости достаточно широкая и достигает 3–4 мм, в отличие от типового значения 1–1,5 мм. Область торможения занимает значительную часть МЭП, и в результате этого зона однородного течения практически отсутствует.

Для сравнения на рис. 5 представлены аналогичные графики для системы с тупой иглой (№ 1). Контурные графики скорости ЭГД-течений различных в системах с разной степенью неоднородности электрического поля и в разных диэлектрических жидкостях (вазелиновое и трансформаторное масла) имеют как ряд сходств, так и ряд различий. Сходства состоят в том, что в обоих случаях течение представляет собой узкую струйку, скорость в которой быстро падает при удалении от оси модели. Различия, в свою очередь, проявляются в величине и области локализации зоны ускорения – в системе с тупой иглой (в трансформаторном масле) разгон жидкости начинается выше кончи-

ка иглы, и максимальная скорость достигается на расстоянии 1,5–2 мм ниже его. А в системе с острой иглой (в вазелиновом масле) разгон жидкости начинается непосредственно у самого кончика, и зона ускорения в 2–3 раза протяжённее.

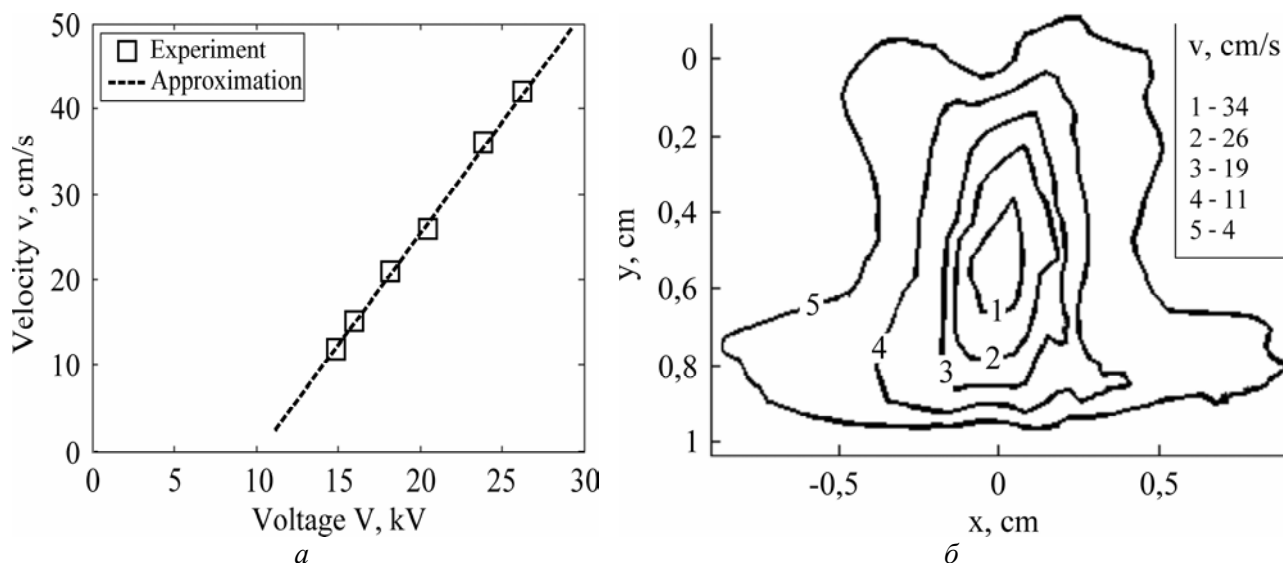


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости течения от напряжения в середине МЭП (а) и контурный график скорости для электрода-иглы № 2 в чистом вазелиновом масле (б)

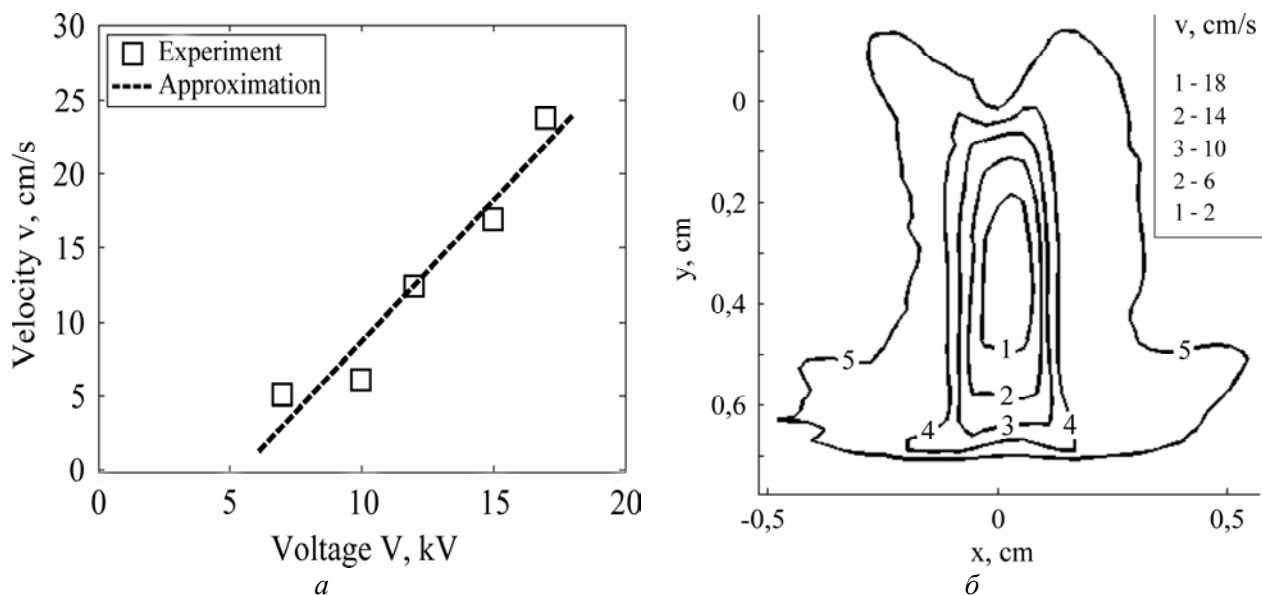


Рис. 5. Зависимость максимальной скорости течения от напряжения в середине МЭП (а) и контурный график скорости для электрода-иглы № 1 в трансформаторном масле без примесей [10] (б)

ЭГД-ТЕЧЕНИЯ В ВАЗЕЛИНОВОМ МАСЛЕ С ЭЛЕКТРОННО-АКЦЕПТОРНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

При растворении йода в вазелиновом масле происходит увеличение его низковольтной проводимости. При концентрации йода 10^{-4} г/см³ низковольтная проводимость рабочей жидкости увеличилась на два порядка и составила $1,7 \cdot 10^{-12}$ Ом⁻¹·м⁻¹. Соответствующее время максвелловской релаксации составляет около 10 с. Известно, что йод обладает электронно-акцепторными свойствами, что существенно облегчает рождение ионов на катоде. Поэтому в растворе йода в вазелиновом масле следует ожидать повышения уровня «инъекции» заряда с иглочатого электрода в жидкость и увеличения интенсивности ЭГД-течений [1].

На рис. 6,а представлены экспериментальные ВАХ при отрицательной и положительной полярностях и их аппроксимации квадратичными функциями. Как и ожидалось, введение электронно-акцепторной примеси привело к увеличению тока при отрицательной полярности и практически не изменило ВАХ при положительной полярности. Вместе с увеличением тока при малых напряжениях

произошло значительное уменьшение порога возникновения ЭГД-течений, который составил (1200 ± 300) В.

Исходя из представленных аппроксимаций квадратичными функциями, можно сделать вывод, что на участке от 0 до 15 кВ рост тока имеет квадратичный характер, что хорошо согласуется с данными, представленными, например в [1]. Однако при более высоких напряжениях скорость роста тока существенно увеличивается как при отрицательной, так и при положительной полярностях. Причём должное «пороговое» напряжение соответствует тому напряжению, при котором начинается стремительное увеличение тока в чистом вазелиновом масле и напряжённость электрического поля на заострении электрода-иглы начинает превышать значение 10^9 В/м (согласно электростатическому расчёту). Можно предположить, что соответствующее усиление зарядообразования связано с активацией эффекта Вина [11].

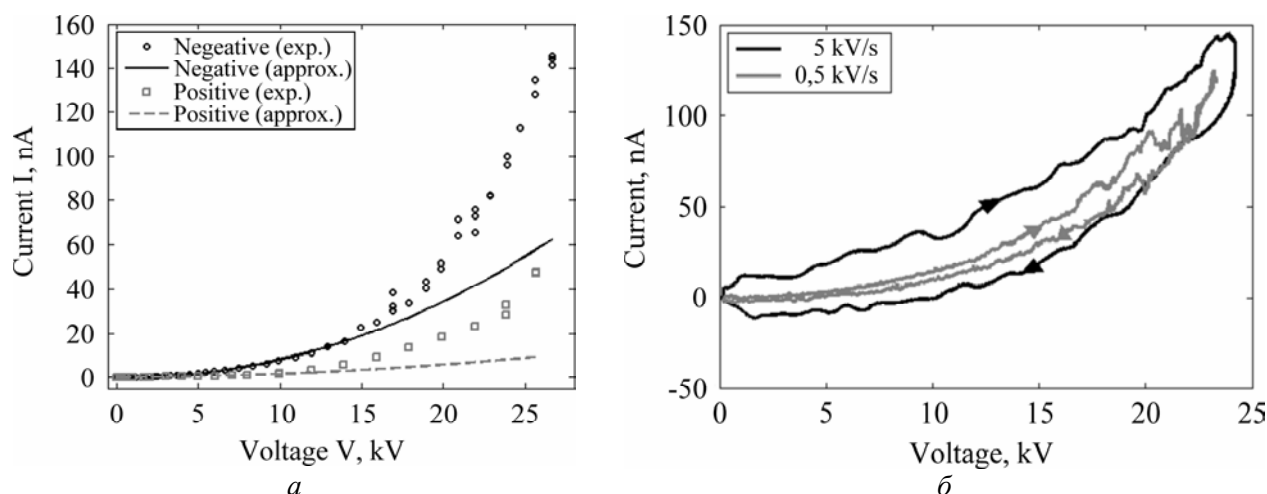


Рис. 6. Стационарные ВАХ при положительной и отрицательной полярности электрода-иглы (а) и динамические ВАХ при разной скорости модуляции напряжения при отрицательной полярности (б); рабочая жидкость — вазелиновое масло с йодом (концентрация йода 10^{-4} г/см³)

На рис. 6,б представлены динамические ВАХ, снятые при скоростях модуляции напряжения 0,5 и 5 кВ/с. При большей скорости модуляции был получен существенный гистерезис, а на участке уменьшения напряжения от 10 до 0 кВ было зафиксировано изменение знака тока. Полученные значения скорости ЭГД-течения при введении в жидкость электронно-акцепторной добавки выше, чем в чистом вазелиновом масле.

АНАЛИЗ ВОЗВРАТНЫХ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА

Одной из особенностей исследуемой системы является то, что после выключения напряжения на протяжении десятка секунд в жидкости регистрируются ЭГД-течения, причём в момент выключения напряжения направление течения жидкости изменяется на противоположное. Это свидетельствует о накоплении в жидкости объёмного заряда, который не успевает нейтрализоваться на противоэлектроре. И действительно, поскольку ввиду низкой проводимости исследуемых жидкостей характерное время максвелловской релаксации составляет десятки и сотни секунд (в зависимости от концентрации примесей), то разрядка жидкости после выключения напряжения не может происходить мгновенно. В результате даже после отключения внешнего электрического поля в жидкости регистрируются ЭГД-течения, особенность которых состоит в том, что электрическое поле, действующее на объёмный заряд, создаётся непосредственно самим объёмным зарядом (с учётом равенства нулю потенциала на обоих электродах).

Утверждение про накопление объёмного заряда также подтверждается динамической ВАХ: при высокой скорости модуляции напряжения регистрируемые токи выше, чем при малой скорости. И при снижении напряжения, особенно при наличии в жидкости электронно-акцепторных примесей, наблюдается область ВАХ с отрицательными токами. Именно накапливающийся в кювете объёмный заряд экранирует электрическое поле и тем самым приводит к снижению тока инжекции в режиме роста тока. А в режиме спада напряжения объёмный заряд инвертирует поле и создает отрицательный ток. В итоге можно говорить об образовании «зарядовой пробки» и переходе в режим токов, ограниченных пространственным зарядом.

Причём возвратные течения более интенсивны, когда в жидкость введены электронно-акцепторные добавки, и соответствующее время движения заряженной жидкости после отключения источника нарастает при увеличении напряжения от 0 до 10 кВ. А при относительно высоких напряжениях (более 10 кВ) время «нейтрализации заряда», то есть время существования обратных течений, не меняется и составляет 60–70 секунд. В случае чистой жидкости данный эффект проявляется только при напряжениях выше 15 кВ, когда суммарный ток, протекающий через систему, превышает наноамперный уровень.

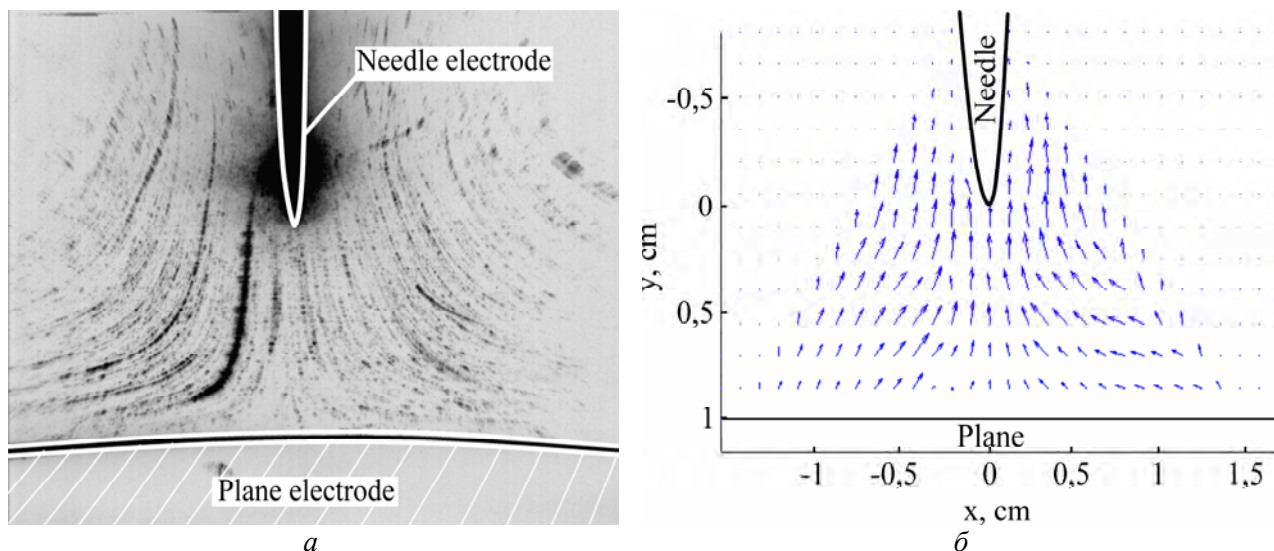


Рис. 7. Фотография возвратных ЭГД-течений (а) и векторное поле скоростей после выключения напряжения (б)

На рис. 7,а представлена фотография, полученная путём суммирования видеок кадров за период около 5 секунд. Приведённые на этой фотографии треки соответствуют движению визуализирующих пузырьков воздуха благодаря наличию возвратных ЭГД-течений. Течение жидкости направлено от плоского электрода к электроду-игле, и оно симметрично относительно оси кюветы, что видно из рис. 7,б, на котором представлено соответствующее векторное поле скоростей, полученное по результатам обработки двадцати траекторий. Максимальная скорость возвратного течения составляет 1,5–2 см/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механическая заточка электрода-иглы позволила повысить степень неоднородности электрического поля практически до 1000 и в результате достигнуть максимальной напряжённости электрического поля 10^9 В/м при межэлектродной разности потенциалов 15 кВ. Благодаря этому в очень слабопроводящей жидкости — чистом вазелиновом масле — были получены достаточно интенсивные ЭГД-течения. Возникновение ЭГД-течений было сопряжено с резким увеличением тока, протекающего через жидкость, — с десятков пикоампер до десятков наноампер, которое в рассматриваемом случае происходило при напряжении около 15 кВ. При этом анализ ВАХ позволяет сделать вывод о том, что порог резкого увеличения тока не зависит ни от введения в жидкость примесей, ни от полярности напряжения. А это в свою очередь позволяет считать, что соответствующий рост тока не связан ни с автоэлектронной эмиссией, ни с инжекцией и, видимо, происходит благодаря эффекту Вина.

Специфика зарядообразования и токопереноса в исследуемой системе сказывается и на кинематической структуре, которая в данном случае несколько отличается от типового вида. Это выражается в отсутствие зоны разгона выше кончика иглы и в несколько раз более протяжённой зоне ускорения внутри МЭП. Сочетание применения очень острого электрода с введением в жидкость электронно-акцепторных добавок позволило снизить прежде всего порог возникновения ЭГД-течений (в данном случае до 1 кВ), но привело к появлению нестабильности тока инжекции и скорости ЭГД-течения, увеличению эффективного зарядообразования и в итоге к образованию «зарядовой пробки». А это в свою очередь должно было привести к снижению электрического поля у поверхности иглы и, как следствие, ухудшить зарядообразование. Поэтому на основе анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что применение сверхвысоких локальных электрических полей для получения интенсивных ЭГД-течений при низких межэлектродных напряжениях неэффективно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках*. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 174 с.
2. Афанасьев С.Б., Елагин И.А., Стишков Ю.К., Шапошников А.М. *Электрофизические процессы в жидкостях и газах*. СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. 441 с.
3. Стишков Ю.К., Чирков В.А. Компьютерное моделирование ЭГД-течений в системе электродов игла-плоскость. *ЖТФ*. 2008, **78**(11), 17–23.
4. Stishkov Yu.K., Chirkov V.A. Features of Electrohydrodynamic Flows in Needle–plane Electrode System. *Proc. 16th ICDL. Poitiers (France)*. 2008. P. 33–35.
5. Стишков Ю.К., Чирков В.А. Формирование электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования. *ЖТФ*. 2012, **82**(1), 3–13.
6. Гросу Ф.П., Болога М.К., Блощицын В.В., Стишков Ю.К., Кожевников И.В. Зарядообразование в жидких диэлектриках под воздействием электростатического поля. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(5), С. 16–38.
7. T. Funakawa, W. Balachandran. New Electron Injection Technique for Generating Electrospray. *Proc. ISEHD. Sarawak (Malaysia)*, 2009.
8. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Стишков Ю.К. Полуавтоматический метод компьютерной обработки поля скоростей ЭГД-течений. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(1), 24–30.
9. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Павлейно М.А., Стишков Ю.К., Чирков В.А. Полуавтоматический метод компьютерной обработки характеристик группового движения объектов и течений различной природы. *Вестник Санкт-Петербургского ун-та*. 2009, **10**(1), 3–13.
10. Stishkov Yu., Chirkov V. Dependence of the Electrohydrodynamic Flows Structure in Very Non-uniform Electric Field on the Charge Formation Mechanism. *Proc. 17th ICDL. Trondheim (Norway)*, 2011.
11. Апфельбаум М.С., Янтовский Е.И. О силе, действующей на игольчатый электрод, и вызываемых ею течениях. *Магнитная гидродинамика*. 1977, 4, 73–80.

Поступила 22.11.11

Summary

The results of experimental investigation of EHD flows arising in a system with a highly non-uniform electric field are presented. A high degree of the electric field distribution non-uniformity is obtained due to using a needle electrode with the 3 μm curvature radius. Stationary and dynamic current-voltage characteristics and the dependence of the EHD flow velocity on voltage is obtained. It is shown that at high velocity of voltage modulation the dynamic current-voltage characteristic have a hysteresis. Investigation of the electron-acceptor admixture influence on the form of current-voltage characteristic and intensity of EHD flows is conducted. A return EHD flow arising after the voltage turning off is recorded. The obtained results are compared with analogous data from literature for the case of a less non-uniform electric field.
