



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
"ОБРАЗОВАНИЕ"



Проект «Инновационная образовательная среда в классическом университете»

Пилотный проект № 22 «Разработка и внедрение
инновационной образовательной программы «Прикладные математика и физика»»

Физический факультет

Научно-образовательный центр «Электрофизика»

С.Б.Афанасьев, И.А.Елагин, Ю.К.Стишков

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Раздел 2. Электрогидродинамические процессы в жидкостях

Учебно-методическое пособие

УДК 536.2, 53.04, 53.05

- Рецензент: д.ф.м.н. проф. Ключарёв А.Н.
- Печатается по решению методической комиссии физического факультета СПбГУ.
- Рекомендовано Ученым советом физического факультета СПбГУ.

С.Б.Афанасьев, И.А.Елагин, Ю.К.Стишков
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.
РАЗДЕЛ 2. Электрогидродинамические процессы в жидкостях – СПб., 2007

Учебно-методическое пособие к курсам специальных дисциплин «Введение в электрофизику», «Физические процессы в жидкостях и газах при воздействии сильных электрических полей». В работе рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся электрофизики жидких диэлектриков. Это вопросы зарядообразования и экспериментального исследования электрогидродинамических течений. В первой части пособия рассматриваются проблемы электрофизики гетерогенных систем. Далее изложены базовые проблемы методов изучения скоростных характеристик электрогидродинамических течений, а также методы цифровой обработки информации, по изучению структуры таких течений. Большое внимание в пособии уделено вопросам анализа экспериментальных результатов, по изучению ЭГД-течений. В пособии широко использованы материалы научно-исследовательских работ и программы студентов и аспирантов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета Санкт-Петербургского Государственного Университета.

Пособие предназначено для студентов 4-6-го курсов и аспирантов направления «Прикладные математика и физика» специализирующихся в области электрофизики.

Оглавление

Оглавление	3
Электрогидродинамические процессы в жидкостях	4
Электрофизика гетерогенных систем	4
Методика исследования электрогидродинамических течений	15
Введение	15
Метод визуализирующих включений	15
Описание экспериментальной установки	17
Методика обработки поля скоростей ЭГД-течений	18
Автоматизация процесса обработки данных по исследованию ЭГД-течений [29,30]	22
О программе EHD-Reader	23
Разделы программы EHD-Reader	24
Главное меню и панель инструментов	24
Информация о кадре	24
Рабочая область	24
Параметры	25
Кадры	25
Управление	25
Открытие файла	25
Обработка траектории	26
Параметры	27
Задание параметров масштабирования вручную	27
Результаты	28
Компоненты скорости	29
Контурные графики	30
Анализ структуры ЭГД-течений в несимметричной системе электродов	36
Результаты обработки	37
Исследование особенностей ЭГД-течений в системе электродов игла-плоскость [14, 35,39]	55
Экспериментальные данные	55
Анализ структуры ЭГД-течений в симметричной системе электродов	60
Анализ скоростных характеристик ЭГД-течений [27,31,33]	66
Встречные и сквозное ЭГД-течения. Особенности ионизационно-рекомбинационного механизма образования ионов [13,22,26]	71
Зависимость кинематических и электрофизических характеристик сквозного ЭГД-течения от величины межэлектродного промежутка	79
Влияние материала электродов на скорость и структуру ЭГД-течений в симметричной системе электродов провод-провод	82
Переходные процессы и ЭГД-течения в переменном электрическом поле [13,23-26]	87
Развитие ЭГД-течений при включении напряжения	87
ЭГД-течения в переменном поле	92
Литература	97

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Раздел 2

Электрогидродинамические процессы в жидкостях

Электрофизика гетерогенных систем

Роль примесей и загрязнений в электроизолирующих жидкостях часто обсуждается в электротехнической литературе в свете существенного понижения пробивного напряжения из-за повышения их удельной электропроводности. Опытным путём установлено, что по мере очистки жидкости определенного молекулярного состава от малого количества примесей путем перегонки, «электроочистки» и т.п. ее удельная электропроводность падает скачкообразно, причем скачки достигают подчас нескольких порядков, а пробивная прочность возрастает. Многие экспериментаторы старались разработать и усовершенствовать способы очистки жидкостей в надежде получить, наконец, «чистую» жидкость и точно измерить ее удельную электропроводность с такой же степенью воспроизводимости, как механическая плотность, молекулярный вес и т.п. Результаты таких усилий оказались противоречивыми, так что определенное экспериментальное значение удельной электропроводности хотя бы для одной из неметаллических жидкостей, включая «чистую» воду, например, вряд ли можно считать достаточно надежным.

Роль примесей, невидимых глазом по причине их малых, например молекулярных, размеров, можно хотя бы отчасти понять, наблюдая поведение более крупных, например коллоидных [1], частиц и даже отдельно видимых макроскопических предметов. Для исследования жидкости, находящейся в электрическом поле, большой интерес представляют многочисленные сорта загрязнений, вещество которых имеет, может быть, и малую абсолютную удельную электропроводность. Однако она должна быть гораздо больше, чем ничтожная электропроводность самой жидкости, например трансформаторного масла.

Визуальными наблюдениями через бинокулярный микроскоп [1,13] можно установить, что лишь самые симметричные видимые частицы твердых примесей, например сферы, взвешенные в изолирующей жидкости, не всегда испытывают действие механических сил в электрическом поле. Некоторые частицы совершают направленное движение от одного электрода к другому. Понятно, что такие движущиеся в поле частицы активно участвуют в переносе зарядов и могут осуществлять значительную долю эффективной проводимости жидкости.

Частица, имеющая правильную форму капли или «груши», движется примерно вдоль силовой линии тупым концом вперед. Частица, искривленная в форме запятой, еще и вращается в сторону своего тупого конца.

В связи с многообразием геометрических тел для систематизации их

рассмотрения целесообразно сосредоточить основное внимание на крайних представителях многообразия форм частиц – на самых симметричных телах – шарах, они обладают совершенной изотропией, и на телах самых длинных – тонких игольчатых стержнях. Промежуточными являются, например, трехосные эллипсоиды. Что касается стержней, то вопрос об ориентации вытянутого сфероида высокой диэлектрической проницаемости вдоль линии напряженности электрического поля весьма подробно изучен в электростатике. Такова же ориентация хорошо проводящего сфероида в слабопроводящей жидкости при протекании постоянного тока.

Один из наглядных примеров поведения твердых шаров в газе в электрическом поле исследован рядом авторов при участии Мяздрикова [3-5]. Исследования проводились в приборе, который представляет собой цилиндрический сосуд из оргстекла диаметром 3–4 см и высотой 1–2 см, дно и крышка его электропроводны и образуют обкладки воздушного конденсатора. В сосуд помещают малый шарик с электропроводящей поверхностью. К обкладкам подводят постепенно повышающееся напряжение. Шарик, первоначально лежавший на дне и заряжавшийся от него электричеством, притягивается в почти однородном электрическом поле к верхней обкладке. При достаточном напряжении сила притяжения усилится настолько, что превзойдет силу тяжести шарика, он подскочит к верхней обкладке, отдаст свой заряд, приобретет противоположный и под совместным действием силы тяжести и электрической силы упадет на дно. После этого цикл повторяется.

Частота таких колебаний шарика зависит от размеров сосуда, массы шарика, приложенного напряжения, упругоэластических свойств дна, крышки и шарика и ряда других параметров. Поддерживая все параметры, кроме одного, одинаковыми, можно связать частоту автоколебаний шарика со значениями этого параметра и проградуировать прибор. После этого его можно использовать как измерительный прибор для этого параметра. Понятно, что частота автоколебаний и переносимый шариком заряд удобно измеряется радиотехническими методами. Для нас здесь особенно важно применение такого прибора для измерения радиоактивной (ионизационной) проводимости воздуха. В этом случае шарик, зарядившийся от дна, на протяжении своего полета вверх частично теряет свой заряд, летит замедленно и обнаруживает более низкую частоту автоколебаний. При достаточно сильной ионизационной проводимости воздуха шарик, хотя и подпрыгивает, зарядившись от дна, но теряет как заряд, так и кинетическую энергию, не долетев до крышки. Тогда сквозные колебания шарика не осуществляются. Опубликованы и другие применения этого прибора, например гранулометрические [4], люминесцентные [5], для испытания материалов и т.п.

Когда же дело идет о шариках, помещенных в электроизолирующие жидкости, те же простые закономерности на опыте не осуществляются. В частности, такие наблюдения опубликованы Фельзенталем и др. [6] с обугленными сахарными шариками диаметром от 1,4 до 4,7 мм, погруженными

во фреон 113 ($\text{CCl}_2\text{F}-\text{CClF}_2$, трихлоро-трифлуорэтан). Оказалось, например, что средняя скорость, пропорциональная частоте сквозных автоколебаний шариков, линейно возрастала с приложенным напряжением вплоть до 5 кВ и была почти независима от диаметра шариков. Пороговое напряжение составляло около 800 В. Шарики вели себя так, как будто они, прикасаясь к обкладкам, не полностью заряжались до соответствующих высоких потенциалов, а только примерно до 16 В. Аналогичные результаты авторы получили с алюминиевыми частицами и с поверхностно проводящими сахарными шариками в минеральном масле вязкостью 70 сСт, а также и в Н-гексане. Однако в этих случаях частицы разных размеров получали у обкладок случайные потенциалы в широком диапазоне числовых значений.

Из сопоставления поведения шариков в газах и в жидкостях видно, что непосредственное использование представлений об электрических явлениях в газовой среде для толкования электрогидродинамических явлений в жидкой среде не оправдывается.

Для экспериментов по наблюдению за движением частиц в электроизолирующих жидкостях в электрическом поле многие исследователи используют следующие сорта таких частиц: а) – чешуйки алюминиевой пудры диаметром от 10 до 50 мкм, которые имеют «рваные» края; б) – приблизительно тетраэдрические кристаллы электрокорунда 391А с размерами от 50 до 400 мкм; в) – шарообразные частицы стиракрила диаметром от 10 до 50 мкм. Все эти частицы по плотности превосходят испытанные жидкости и медленно тонут в них, скапливаясь на дне сосуда. Перед проведением опытов смесь нужно перемешивать. Для наблюдения ЭГД–течений удобно применять и пузырьки воздуха диаметром в сотые доли миллиметра.

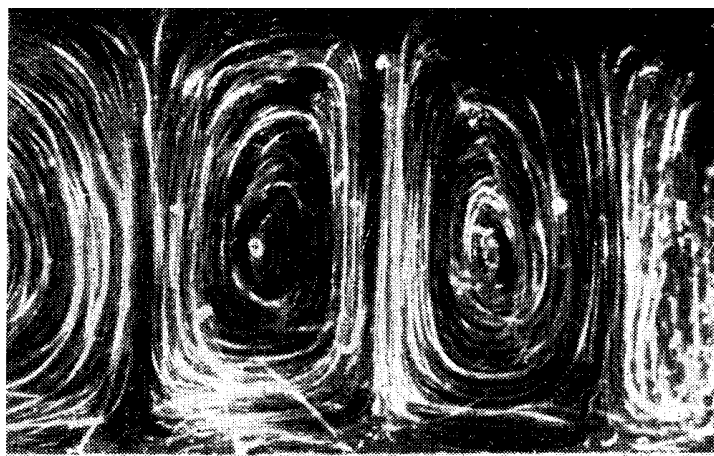


Рисунок 2.1. Пример фотографии ламинарного ячеистого ЭГД–потока между плоскими электродами. Смесь равных объемов касторового масла и пинена; светорассеивающие частицы – алюминиевая пудра; напряженность электрического поля около 15 кВ/см, межэлектродное расстояние 1 см.

В слабопроводящих жидкостях и в полях высоких напряжений

практически не удавалось наблюдать типичных катафоретических движений светорассеивающих частиц, вызванных двойным электрическим слоем. Это движение обычно наблюдается в водных взвешах и эмульсиях, когда одинаковые частицы под действием электрического поля плывут в поле зрения сквозь неподвижную жидкость почти параллельными курсами с одинаковой скоростью, резко меняя направление движения в момент переключения направления тока.

Визуальные наблюдения движения частиц в жидких диэлектриках и кадры, снятые на киноплёнку, выявляют три особенно характерных типа обнаруженного движения частиц.

Во-первых, это движения групп частиц как бы «стадного» характера: облачко дискретных частиц движется, перемещаясь поступательно и одновременно деформируется (в каком-то направлении облачко удлиняется, в другом укорачивается), соблюдая, однако, взаимное расположение частиц почти неизменным. Такие движения групп частиц с большой достоверностью отображают течение жидкости в целом; светорассеивающая частица как бы «вморожена» в гидродинамический поток и описывает линию тока самой жидкости, т.е. траекторию замененной ею гидродинамической частицы. Этот тип движения становится заметным при напряженностях поля примерно 2–5 кВ/см. Светорассеивающие частицы в плоскопараллельной ячейке описывают овальные траектории, отражающие ячейстое электрогидродинамическое движение жидкости, которое напоминает Бинарову гравитационнотермическую конвекцию в плоском слое [7,26]. На рис.2.1 показан пример таких траекторий. По мере повышения напряжения скорость движения растет, однако форма ячеек сохраняется. В случае других электродов, например провод (игла) над плоскостью движение двухячейстое.

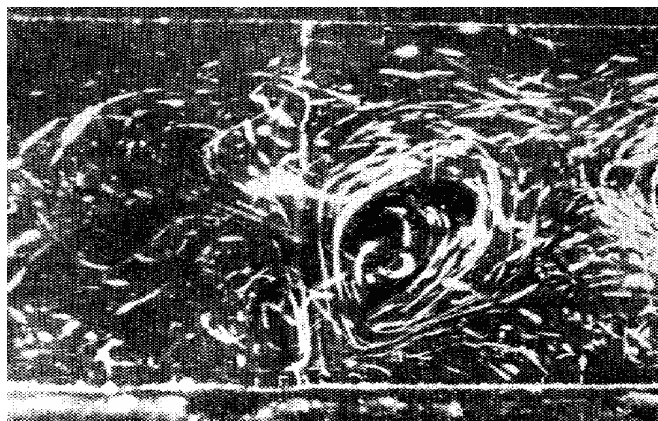


Рисунок 2.2. Фотография нестационарного ячейстого потока в слабовязкой жидкости (петролейный эфир), частицы – алюминиевая пудра, напряженность поля около 3 кВ/см.

Возвышения, острия, заусеницы и волоски на поверхности электродов, а также тяжелые и неподвижные частицы крупных размеров, лежащие на дне

сосуда, особенно остроконечные, уже при невысоких напряжениях вызывают случайные очаги «электрического ветра». Эти источники, иногда малозаметные визуально, порождают случайно размещенные в сосуде тороидальные потоки, легко обнаруживаемые по «стадному» движению светорассеивающих частиц. Часто они маскируют пространственно-периодические ячеистые потоки (рис.2.2).

При напряженностях около 0,5 кВ/см на фоне пока еще неподвижной жидкости начинаются движения второго типа. Это очень быстрые перемещения индивидуальных частиц относительно неподвижной или медленно текущей жидкости, как бы их «выстреливание» от одного электрода к противоположному [7,13,26]. Это движение может носить периодический характер, а может закончиться остановкой частицы в межэлектродном промежутке.

При напряженностях порядка 10 кВ/см такие частицы обычно достигают противоположного электрода, после чего они либо продолжают движение отражаясь от противоэлектрода, либо медленно тонут под действием разности плотностей относительно жидкости в поле земного тяготения – заряда на них не обнаруживается. Некоторые частицы, достигнув верхнего электрода и немного «посидев» на нем неподвижно, внезапно срываются с него и стремительно выстреливают вниз. При меньших напряженностях поля некоторые из таких частиц быстро отлетают от нижнего электрода, постепенно теряют скорость, не долетают до противоположного электрода и, наконец, остановившись, начинают плавно тонуть, не неся па себе заряда. При этом медленном движении они обычно увлекаются «стадным» потоком первого типа. На рис.2.3, а, показан пример такого индивидуального «выстреливания». При достаточно высоких напряженностях поля (10–15 кВ/см) на фотографиях виден как бы дождь мечущихся вверх и вниз выстреливающих частиц на фоне ячеистого «стадного» движения (рис.2.3, б).

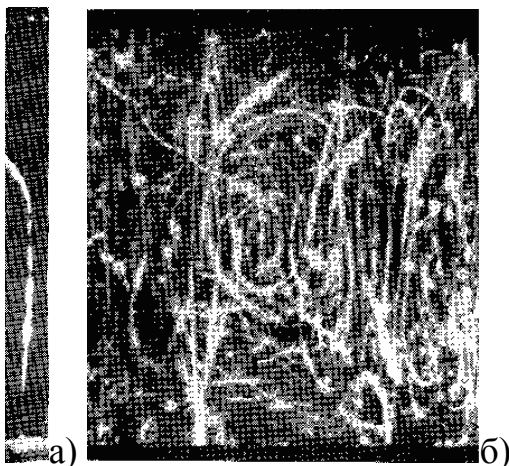


Рисунок 2.3. Фотография (а) «выстреливания» одной частицы алюминиевой пудры в петролейном эфире, 1,5 кВ/с, фотографии (б) мечущихся выстреливающих частиц алюминиевой пудры на фоне ячеистого потока в

вазелиновом масле; 13 кВ/см.

Выстреливающее движение индивидуальных частиц, снятое на киноплёнку, обнаружило, при ее многократном просмотре в виде петлевых замкнутых фрагментов, случайность частиц, приходящих в такое стремительное движение.

При напряженностях выше 2–3 кВ/см можно наблюдать обнаруженный многими исследователями третий тип движения частиц, особенно часто обнаруживается для электрокорунда, когда частицы медленно стягиваются друг к другу по нижнему электроду и плавно выстраиваются в вертикальные цепочки, постепенно растущие к верхнему электроду. Когда цепочка дорастает до верхнего электрода, вдоль цепочки возникает подобие короткого замыкания или пробоя. Цепочка как бы «взрывается» и распадается на несколько обрывков или отдельных кристалликов. В трансформаторном масле возникает пузырек газа, медленно прилипающий к верхнему электроду. После такого взрыва составление, прорастание и разрушение одной или нескольких цепочек возобновляются.

При подаче на электроды высокого напряжения некоторые частицы, неплотно осевшие на нижний электрод вследствие гравитации, постепенно через слой жидкости электризуются «соприкосновением». После приобретения ими зарядов, достаточных для преодоления прилипания, которые могут еще не достичь значения $q = c U$, они отрываются от нижнего электрода под действием кулоновского отталкивания и устремляются к верхнему электроду. На протяжении своего движения частицы медленно теряют свой заряд за счет удельной электропроводности жидкости.

Как уже отмечалось, в жидких диэлектриках при высоких напряжениях появляется неизвестный в других условиях вид электрической проводимости – проводимость, осуществляемая вследствие автоколебательного движения микроскопических тел в межмолекулярном промежутке. Это движение возможно лишь при условии, когда время максвелловской релаксации заряда $\tau = \varepsilon^* \varepsilon_0 / \sigma$ велико по сравнению со временем пролета телом межэлектродного промежутка, поскольку только в этих условиях заряд шарика не успевает растечься в жидкости за время пересечения им межэлектродного промежутка. Именно по этой причине переносная проводимость ощутима лишь в жидкостях с уровнем низковольтной проводимости не выше чем $10^{-9} - 10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$.

Рассмотрим результаты оригинальных экспериментальных и теоретических исследований [8,13,26] переносной проводимости на примере движения одиночного стального шара размерами 0,5–5 мм в жидкостях с различной низковольтной проводимостью: от $10^{-14} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, когда стекание собственного заряда шара в процессе его движения несущественно, до $10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, когда стекание заряда в жидкость приводит к остановке шарика в межэлектродном промежутке.

Исследование направлено на выявление взаимосвязи вольтамперных

характеристик переносной проводимости с особенностями движения частиц в вязкой жидкости.

Закон сохранения импульса при движении заряженного шара в вязкой жидкости имеет вид:

$$F_1 + F_2 \pm F_3 = F_4,$$

где F_1 – сила инерции, F_2 – сила вязкого трения, F_3 – сила тяжести. Наряду с массой шара следует учитывать присоединенную массу жидкости: $m^* = 4\pi r^3 \rho^* / 3$, здесь ρ^* – плотность жидкости. Силы вязкого трения при медленном движении шара ($Re \ll 1$) можно рассчитать по формуле Стокса: $F_2 = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v$; при расчете сил тяжести следует учитывать архимедовы силы: $F_3 = 4\pi r^3 (\rho_T \pm \rho^*) \cdot g / 3$. С учетом сказанного уравнение движения шара записывается как

$$\frac{2}{3} \pi r^3 (2\rho_T + \rho^*) \ddot{v} + 6\pi \mu r v = qE \pm \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_T - \rho^*). \quad (2.1)$$

Разделим все члены на $2\pi r^3 (\rho_T \pm \rho^*) \cdot g / 3$ и обозначим

$$\alpha = g \mu r / [r^3 (\rho_T + 2\rho^*)]; \quad c = \frac{qE \pm 4\pi r^3 (\rho_T - \rho^*) / 3}{2\pi r^3 (\rho_T + 2\rho^*) / 3}. \quad (2.2)$$

С учетом обозначений (2.2) запишем уравнение (2.1) в виде

$$\ddot{v} + \alpha v = c. \quad (2.3)$$

Введем переменную $v^* = v - c/\alpha$ или $dv^*/v^* = -\alpha dt$ и проинтегрируем от v_0 до v :

$$\int_{v_0}^v \frac{dv^*}{v^*} = \ln \frac{v_0^*}{v^*} = -\alpha t, \quad v^* = v_0^* \exp(-\alpha t).$$

Вернемся к исходным переменным, используя промежуточную подстановку:

$$v - \frac{c}{\alpha} = \left(v_0 - \frac{c}{\alpha} \right) \exp(-\alpha t), \quad (2.4)$$

и обозначим $c/\alpha = v_{max}$, $v/v_{max} = 1 - (v_{max} - v_0) \cdot \exp(-\alpha t) / v_{max}$ или в безразмерных переменных:

$$v/v_{\max} = 1 - B \exp(-at), \quad B = (v_{\max} - v_0)/v_{\max} \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) видно, что при $t \rightarrow \infty$ $v = v_{\max}$, т.е. v_{\max} есть скорость, соответствующая выходу шара на стационарный режим. При периодическом движении шара в межэлектродном промежутке v_0 есть скорость отскока шара от поверхности электрода, а $v(T)$ – скорость подлета шара к поверхности противоположного электрода. Если коэффициент отражения электродов одинаков и равен k , то

$$k = v_0 / v(T).$$

Рассмотрим усредненную по межэлектродному промежутку скорость шара:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

$$\bar{v} = \frac{v_{\max}}{T} \int_0^T [1 - B \exp(-at)] dt = v_{\max} \left\{ 1 + \frac{B}{aT} [\exp(-aT) - 1] \right\}$$

Величины v_{\max} и b являются функциями q и U , а $\bar{v} = l_0/T$, поэтому зависимость $\bar{v} = \bar{v}(U)$, носит сложный характер, и, следовательно, построить в явном виде вольтамперную характеристику переносной проводимости не представляется возможным. Рассмотрим два предельных случая: кинетический и диссипативный режимы.

1. Кинетический режим с $aT \ll 1$ ($\dot{v} \gg a v$). Раскладывая выражение (2.5) в ряд по малому параметру и ограничиваясь двумя членами разложения, получаем $v \approx v_0 + (v_{\max} - v_0) \cdot at$,

$$\bar{v} = \left[\frac{qE \pm 4\pi r^3 (\rho_r - \rho^*)/3}{2\pi r^3 (\rho^* + 2\rho_r)/3} \frac{l_0(1+k)}{(1-k)} \right]^{1/2}, \quad (2.6)$$

$$\bar{i} \approx q \bar{v} / l_0. \quad (2.7)$$

В явном виде вольтамперную характеристику можно получить, считая $q = cU$ и $E = U/t_0$. Можно заметить, что зависимость $v = v(U)$ линейна, а зависимость $i = i(U)$ имеет параболический характер.

2. Диссипативный режим с $aT \gg 1$ ($\dot{v} \ll a v$). Из выражения (2.5) следует:

$$\bar{v} \approx v_{\max} = \frac{qE + mg}{6\pi \mu r}, \quad i_k \approx \frac{q \bar{v}}{l_0} = \frac{q(qE + mg)}{6\pi \mu r l_0}. \quad (2.8)$$

Считая $q = c \cdot U$, $E = U/l_0$, получаем зависимость $v(U)$ в параболическом

виде, а зависимость $i = i(U)$ в виде кубической параболы.

Экспериментальные исследования переносной проводимости проводились в ячейке с плоскопараллельными электродами при межэлектродном расстоянии $l_0 = 1,5$ см со стальными шариками диаметром 0,5; 1,25; 2,0 мм. Эксперименты проводились в изооктане ($\tau = 10$ с, $\mu = 6,4 \cdot 10^{-3}$ Ст), в вазелиновом ($\tau = 50$ с, $\mu = 1,5$ Ст) и касторовом ($\tau = 0,05$ с) маслах. Среды и шарики были подобраны так образом, чтобы для первых двух жидкостей реализовался режим $T \ll \tau$, причем в изооктане был создан кинетический режим движения с $\alpha T \sim 0,01 \div 0,1 \ll 1$, а в вазелиновом масле – диссипативный режим движения с $\alpha T \approx 10 \div 500 \gg 1$. В касторовом масле был реализован режим с $T > \tau$.

На рис.2.4, г, представлена типичная фотография движения шарика в изооктане и показаны распределения скорости движения шарика по межэлектродному промежутку в изооктане (а), вазелиновом (б) и касторовом (в) маслах при $U = 15$ кВ. По характеру кривых можно судить о режиме движения. Действительно, линейный характер распределения скорости (рис.2.4, а) свидетельствует о кинетическом режиме движения шара в изооктане при условии сохранения заряда, так как соблюдается условие $\alpha T \ll 1$, $T \ll \tau$. В вазелиновом масле на участке длиной $0,2 l_0$ шар выходит на диссипативный режим движения при сохранении заряда $\alpha T \gg 1$, $T \ll \tau$ (рис.2.4, б). В касторовом масле при $\alpha T \gg 1$, $T \sim \tau$ наблюдается третий режим движения, характеризуются интенсивным стеканием заряда шара в процессе его движения (рис.2.4, в), что и обуславливает ниспадающий характер кривой с последующей остановкой шара внутри межэлектродного промежутка.

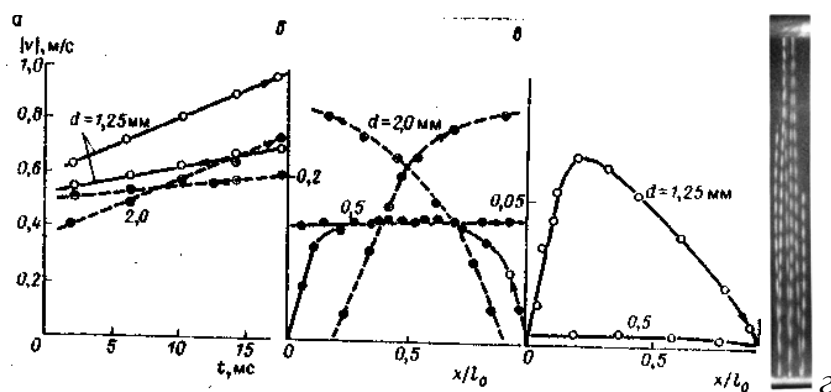


Рисунок 2.4. Типичная фотография движения шарика в изооктане (г) и распределения скорости движения шарика по межэлектродному промежутку в изооктане (а), вазелиновом (б) и касторовом (в) маслах при $U = 15$ кВ

На рис.2.5 представлены зависимости средней за период скорости движения шара от напряжения (а) и вольтамперные характеристики переносной проводимости (б). Движение шара в жидкостях с проводимостью $10^{-14} (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ полностью определяет возникающий ток, причем вклад тока собственной проводимости не превышает 5÷10 %. Это видно по скачку значений тока в момент начала движения. При подлете шара к электроду до

момента касания между ними проскакивает искра, вызывающая импульс тока. Осциллограмма процесса показала (рис.2.5, б), что на фоне медленно меняющейся составляющей переносного тока наблюдаются кратковременные ($t_n \ll T$) импульсы, соответствующие моментам соприкосновения шара с электродами. Вклад импульсной составляющей в средний за период ток не выше 1 %.

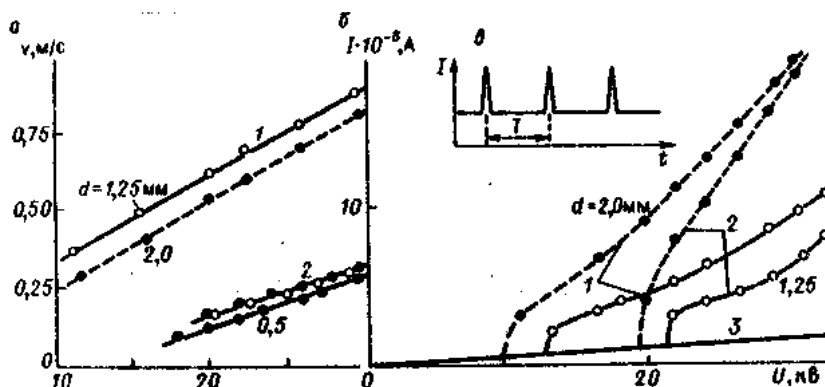


Рисунок 2.5. Зависимости средней за период скорости движения шара от напряжения (а) и вольтамперные характеристики переносной проводимости (б).

Скорость движения шара в изооктане (1, рис.2.5, а) практически линейна, что согласуется с формулой (2.6) и соответствует кинетическому режиму движения. В вазелиновом масле (2) зависимость $v(U)$ также линейна, но шарик диаметром 1,2 мм проявляет тенденцию к нелинейному движению. Начало движения шарика, которое определяется неравенством $qE \geq mg$, в относительно «проводящем» касторовом масле практически не влияет на величину тока, но приводит к резкому его возрастанию в 10 и более раз в жидкостях с проводимостью менее 10^{-14} (Ом·см)⁻¹.

Вольтамперные характеристики переносной проводимости имеют, как видим, нелинейный характер (рис.2.5, рис.2.б). Вопреки ожиданиям изменение режима движения шара от кинетического до диссипативного не приводит к изменению режима токопрохождения, как это следует из формул (2.7) и (2.8). В изооктане движение начинается при более низких напряжениях, чем в вазелиновом масле, хотя значения тока в изооктане значительно выше.

На рис.2.6, а, представлена зависимость величины заряда, переносимого шаром, от напряжения, вычисленная с учетом вольтамперных характеристик по формуле $q = i_k \cdot l_0 / v$. Как видим, она имеет линейный характер, все кривые лежат несколько ниже прямой $q = c \cdot U$, рассчитанной для одиночного шара радиусом 1 мм исходя из собственной ёмкости шара. Реальная «ёмкость» шара (рис.2.6) изменяется при переходе от изооктана к вазелиновому маслу.

Как показали расчеты, отсутствие ожидаемой взаимосвязи между изменением режима движения шара и характером зависимостей $v(U)$ и $i(U)$ связано с необходимостью учета в уравнении движения шара, наряду с силой

Стокса, также и силы гидравлического сопротивления: $F = \pi r^2 c_p v^2 / 2$, которая в проведенных экспериментах вносила весьма ощутимый вклад.

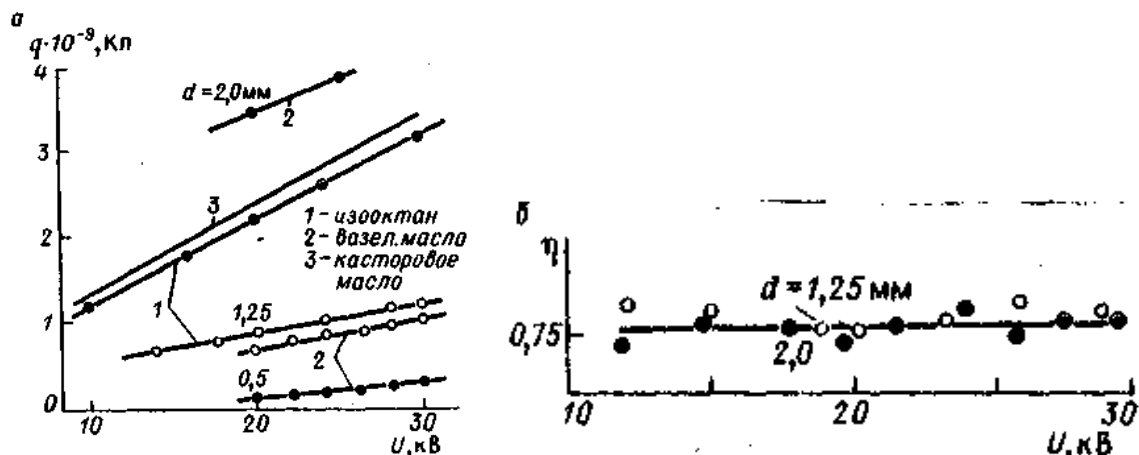


Рисунок 2.6. Зависимость величины заряда, переносимого шаром, от напряжения, вычисленная с учетом вольтамперных характеристик по формуле $q = i_k \cdot l_0 / v$.

Работа, производимая полем для перемещения шара в межэлектродном промежутке ($A = q \cdot U$), идет на приращение кинетической энергии $\Delta W = m \cdot [v^2(r) - v_0^2(0)] / 2$. Учитывая, что $v(r) = k(v(0))$, получаем для коэффициента преобразования

$$\eta = \frac{\Delta W}{A} = \frac{2m(k-1)\bar{v}^3}{\epsilon_0(k+1)iU}$$

На рис.2.6, б, показана зависимость этого коэффициента от напряжения для стальных шариков диаметром 1, 1,5 и 2,0 мм и, соответственно, массой $6,4 \cdot 10^{-5}$ г и $2,5 \cdot 10^{-4}$ г, коэффициент определялся по распределениям скорости. Видно, что η практически не зависит от напряжения и близко к 0,8, причем возрастает с уменьшением размеров шара. Диссипация электрической энергии за счет вязкого трения не превышает 20 %.

Таким образом, на основе экспериментов и расчетов можно сделать вывод, что движение твердого проводящего тела в диэлектрической жидкости при $\tau \gg T$ протекает с весьма высоким коэффициентом преобразования. Оно реализует механизм возникновения переносной проводимости, определяемый набором механических характеристик макрообъектов, переносящих заряд: их формой, размерами, массой, а также вязкостью жидкости. В жидкостях с повышенной проводимостью ($T \sim \tau$) характер движения макрочастиц изменяется в результате стекания заряда в жидкость.

Методика исследования электрогидродинамических течений

Введение

Электрогидродинамические течения диэлектрических жидкостей [1,2,13,26] (далее ЭГД–течения) привлекают внимание, прежде всего тем, что представляют собой способ прямого преобразования энергии постоянного электрического тока в энергию поступательного движения жидкости. Основанные на таком способе ЭГД–преобразователи достаточно просты и компактны. В их конструкции отсутствуют твердые движущиеся и трущиеся элементы. Благодаря этому они обладают почти неограниченным сроком эксплуатации и практически бесшумны. Таким образом, они являются довольно перспективными устройствами, особенно в условиях невесомости. В последнее время были разработаны системы теплообеспечения космических объектов на основе ЭГД–устройств. Электрогидродинамические преобразователи нашли применение в криогенной технике. Весьма перспективно использование ЭГД–устройств для точного дозирования жидкостей, а также мелкодисперсного распыления в различных двигательных установках на жидком топливе. Однако, расчет и конструирование ЭГД–преобразователей невозможны без ясного представления о природе ЭГД–течений. ЭГД–течения существуют в ограниченном диапазоне напряжений [2]. Снизу он ограничен пороговым напряжением, сверху – напряжением, приводящим к пробою жидкости. При напряжении, близком к пороговому, ЭГД–течение не охватывает всего межэлектродного промежутка, а локализовано у активного электрода. Такое течение называется неразвитым. Течение, размеры области локализации которого равны межэлектродному промежутку, называется развитым.

Метод визуализирующих включений

При изучении ЭГД–эффектов, таких как ЭГД–течения, исследователи часто сталкиваются с проблемой визуализации этих эффектов. Это непростая задача, так как ЭГД–течения не видны невооруженным глазом и очень чувствительны к загрязнениям. Существует несколько методов визуализации ЭГД–течений. Один из наиболее часто используемых – это метод визуализирующих включений. Он заключается в том, что в жидкость вводятся специальные видимые «метки», например, твердые частицы или пузырьки воздуха. Эти «метки» двигаются вместе с жидкостью, и по их движению можно судить о характере течения, его скорости, распределении движущих сил в области локализации течения. Этот метод сталкивается с рядом трудностей. ЭГД–течения существуют в условиях высоких электрических полей, напряженностью порядка десятков киловольт на сантиметр, и электрические характеристики материала, из которого сделана метка, имеют большое

значение. Если электрическая проводимость метки выше проводимости исследуемой жидкости, то под действием электрического поля метка приобретет электрический заряд, отличный от заряда окружающей жидкости, и ее скорость будет отличаться от скорости течения жидкости. Различие диэлектрических характеристик взвешенных частиц и окружающей жидкости приводит к тому, что в сильно неоднородном поле частицы также будут двигаться относительно жидкости. На движение взвешенных частиц могут оказывать влияние и другие эффекты и явления, связанные с различными диэлектрическими свойствами частиц и окружающей их жидкости. Все это существенно затрудняет наблюдение ЭГД–течений. Один из способов устранения побочных эффектов состоит в рациональном выборе диэлектрических свойств жидкости и взвешенных частиц как можно более близкими друг к другу. Однако это неизбежно приведет к снижению их отражающей способности, которая, в свою очередь, пропорциональна относительному показателю преломления. Если частицы обладают одинаковыми с жидкостью диэлектрическими свойствами, то они будут оптически неотличимы от жидкости.

В некоторых работах предложен метод визуализации ЭГД–течений, подобный методу визуализирующих включений. Он заключается в том, что в исследуемой жидкости растворяется жидкое диэлектрическое флюоресцирующее вещество, в малых количествах. Авторы утверждают, что добавление этого вещества практически не изменяет электрических свойств жидкости, диэлектрическая проницаемость остается постоянной, а электрическая проводимость исходной жидкости увеличивается не существенно. С помощью такого жидкого самосветящегося диэлектрика можно наблюдать линии тока электрогидродинамического течения жидкости. Основным недостатком этого способа заключается в том, что с течением времени флюоресцирующий растворитель вследствие перемещения и диффузии равномерно заполняет весь объем исследуемой жидкости, т.е. первоначально четкие линии тока «расползаются». Следовательно, его можно использовать лишь ограниченное время. Вторым недостатком является то, что с помощью этого метода невозможно измерить распределение скорости ЭГД–течения.

В настоящее время метод визуализирующих включений является наиболее распространенным методом исследования ЭГД–течений. С помощью этого метода регистрируется общая картина течения, а при использовании импульсной подсветки можно изучать поле скоростей. На сегодняшний день значительный прогресс в области вычислительной техники позволяет получить существенно больше информации о кинематической структуре ЭГД–течений, чем это было возможно ранее. В лаборатории электрогидродинамики жидкости НИИ Радиофизики СПбГУ в течение ряда лет для визуализации и исследования поля скоростей ЭГД–течений применяются мелкие газовые пузырьки. Пузырьки не заряжаются от электродов, даже в сильно неоднородных электрических полях, например, образованных в системе электродов

игла–плоскость, а следовательно, не испытывают действия кулоновской силы. Действие диэлектрофоретической силы проявляется лишь в сильно неоднородных электрических полях и в реальных условиях ощущается весьма слабо. Основной причиной движения пузырьков является ЭГД–течение, что позволяет их использовать для точного измерения скорости течения.

Как уже отмечалось, для визуализации ЭГД–течений в слабо проводящей жидкости могут быть использованы метки, отличающиеся по своим оптическим свойствам от свойств среды и, по возможности, пассивно движущиеся с жидкостью. Введение меток не должно существенно изменять электрофизических свойств среды: размеры меток должны быть достаточно малыми, чтобы, с одной стороны, по возможности, не исказить кинематику исследуемого потока и не проскальзывать относительно жидкости под действием электрических и гравитационных сил, а с другой стороны, оставлять достаточно контрастный след на фотоматериале; плотность метки должна мало отличаться от плотности жидкости; границы метки не должны изменяться под влиянием электрического и гравитационного полей. Эти требования существенно сужают круг веществ, которые могут быть использованы в качестве меток. Исследование поведения газовых пузырьков показало, что относительная погрешность в измерении скорости ЭГД–течения, обусловленная индивидуальным движением пузырьков, как правило, не превышает 5÷10 %. Этот эффект связан с наличием приэлектродных слоев повышенной напряженности, исключающих возможность прямого контакта с поверхностью электрода при условии введения пузырька воздуха в объем жидкости. Кроме того, если газовые пузырьки вводить в жидкость при помощи капилляров из изолирующего материала, то можно:

1. калибровать метки по размерам;
2. реализовать необходимую дозировку меток;
3. вносить минимум загрязнений в жидкость;
4. облегчать ввод и вывод меток из области наблюдения.

Равномерное заполнение исследуемой области течения можно осуществить путем перемещения капилляра поперек потока жидкости.

Таким образом, пузырьки воздуха являются наиболее подходящим для визуализации ЭГД-течений инструментом.

Описание экспериментальной установки

Блок-схема установки для измерения скоростей ЭГД–течения представлена на рис.2.7. Экспериментальная установка состоит из следующих каналов и блоков:

1. Блок подсветки. Он включает в себя источник подсветки – сверхяркий светодиод марки Luxeon, источник визуальной синхронизации – светодиод и оптическую щель с цилиндрической линзой, через которую производится подсветка выделенной области экспериментальной кюветы. Длительность и

период следования импульсов подсветки задаются генератором импульсов. На источник визуальной синхронизации подается сигнал синхроимпульса с модулирующего генератора сигналов специальной формы.

2. Электрическая часть. Она включает в себя высоковольтный источник питания, созданный на основе умножителя напряжения и генератора. Он предназначен для создания высокого напряжения между электродами.
3. Блок видеоканала. Он предназначен для наблюдения на экране монитора и регистрации в компьютере ЭГД-течений. ЭГД-течения воспроизводятся на экране контрольного монитора и при необходимости регистрируются и записываются в компьютер при помощи видеокамеры и карты видеозахвата.

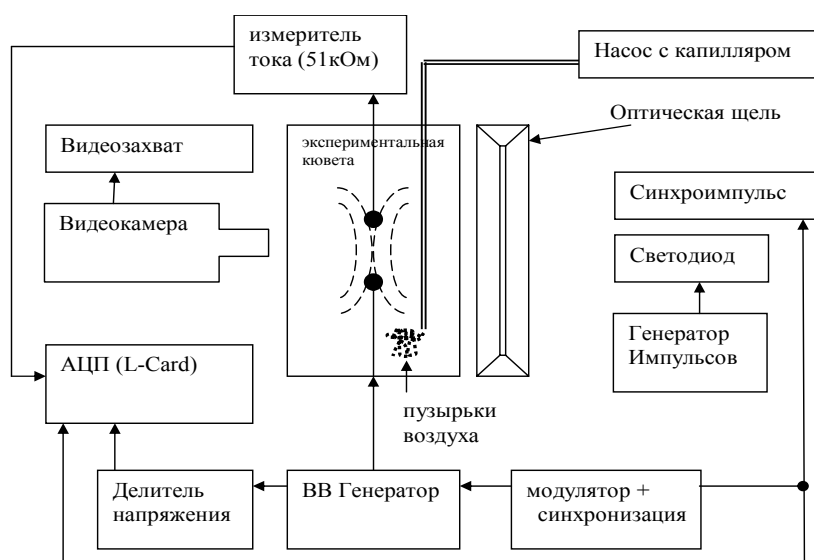


Рисунок 2.7. Блок-схема экспериментальной установки.

4. Пневматический канал. Он предназначен для введения в жидкость пузырьков воздуха достаточно малого размера при помощи специального капилляра.
5. Экспериментальная кювета. Она представляет собой прямоугольный сосуд из плексигласа, в который наливается исследуемая жидкость. В кювету помещается система электродов (два параллельных провода или провод над плоскостью). Нижний электрод при помощи специального разъема подсоединяется к высоковольтному источнику. Верхний электрод соединяется с землей. Расстояние между электродами можно легко изменять при помощи специального устройства.

Методика обработки поля скоростей ЭГД-течений

Как уже говорилось выше, при проведении экспериментов производится видеозапись ЭГД-течения или производится фотографирование. На рис.2.8 представлена типичная фотография ЭГД-течения [13], полученная методом визуализирующих включений, в качестве которых использованы мелкие

газовые пузырьки. Фотографии и видеокадры ЭГД–течений получены при импульсной подсветке в отраженном свете на черном фоне.

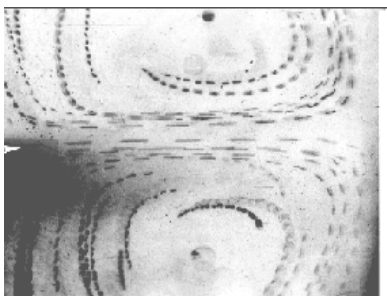


Рисунок 2.8. Фотография ЭГД–течения.

Эксперименты проводились в трансформаторном масле с примесью бутанола, величина низковольтной проводимости 10^{-12} См/м, напряжение на электродах 10^4 В, межэлектродное расстояние 1 см. В качестве электродов использована система лезвие – плоскость, видимая на фотографии: лезвие слева, плоскость справа в виде жирной вертикальной полосы. ЭГД–течение в подобной системе направлено от лезвия к плоскости и носит двумерный «плоский» характер. Импульсы подсветки имели форму меандра, длительность светового импульса T равна длительности промежутка между импульсами. Время фотографирования соответствует $20 \cdot T$. Пунктирные траектории на фотографии соответствуют линиям тока жидкости в различных областях поля скоростей ЭГД–течения. Фотографии ЭГД-течений обработаны при помощи специального пакета программ, позволяющих с высокой точностью восстанавливать векторные поля скоростей ЭГД–течений, проводить тестовую оценку достоверности полученной гидродинамической картины, строить поверхностные графики распределения скорости, карты линий уровня скорости, векторные поля скорости ЭГД–течений.

Обработка включает в себя несколько этапов. На первом этапе фотография сканируется и сохраняется. Далее фотографии преобразуются до вида, необходимого для нормальной работы программ, осуществляющих математическую обработку. Эти преобразования проводятся с помощью программы *Adobe Photoshop*, позволяющей работать с отдельными слоями. Сначала на исходный кадр, развернутый в формате *.psd*, накладывается прозрачный слой для копирования на него одной из линий тока, изображенных на фотографии. Для повышения точности обработки при максимально возможном 16-кратном увеличении вдоль обрабатываемой линии тока инструментом контуры точно проводится плавная линия. После этого вдоль выделенной линии тока черными точками отмечаются начала и концы штрихов. Затем определяется Y -координата центральной линии течения и координаты точек течения, где скорость равна нулю (центры завихрений). После этого выделенный слой фотографии сохраняется в файле с именем №.ВМР, где № – порядковый номер траектории. В отдельный файл записываются данные о

точках с нулевой скоростью и линии нулевой скорости, соответствующие поверхности электродов.

Введите следующие данные и выполните файл:

имя диска и директории, где расположены исходные BMP-файлы DiskInput = "d:\", DirectoryInput = "_MyMcad\451" ,

имя диска и директории, куда будут записываться данные DiskOutput = "d:\", DirectoryOutput = "_Work_Mcad\Output" ,

цвет разделительной точки Color = 76 ,

номер строки центральной линии CenterLine = 175 ,

номер траектории NumberStream = 1 .



Рисунок 2.9. Вид управляющего листа программы *_main1.mcd*.

Дальнейшая обработка фотографии производится в пакете *MathCad*. Управление осуществляется из управляющего файла *main1.mcd*. На рис.2.9. представлен вид управляющего листа программы. Задав параметры, определяющие путь к исходным *BMP*-файлам и путь к директории с выходными данными, следует выбрать номер обрабатываемой траектории *Number Stream* и приступить к ее обработке нажатием кнопки «*Обработка траектории*». При этом проводятся следующие действия. Считываются данные из файла *NumberStream.bmp*, сканируется полученная матрица, определяются координаты точек, соответствующие промаркированным концам треков, и восстанавливается обрабатываемая линия тока (рис.2.10). Вычисляются значения компонент скоростей V_x , V_y путем определения x -й и y -й компонент расстояния между соседними точками вдоль линии тока и деления этого расстояния на длительность подсветки.

В связи с тем, что в декартовой системе координат некоторые траектории не являются однозначными функциями координат и не допускают аппроксимации единой функцией, осуществляется переход в полярную систему координат, связанную с центрами. В зависимости от места расположения траектории производится аппроксимация полученных данных отрезками парабол методом наименьших квадратов, величина отрезков выбирается пользователем путем выбора параметров *SpanX* и *SpanY*.

При достижении требуемого качества аппроксимации производится переход в новую систему координат, связанную с расстоянием вдоль линии тока (рис.2.10). Напомним, что в гидродинамике метод описания движения жидкости в системе координат, связанной с движущейся частицей жидкости, называется методом Лагранжа, а в неподвижной системе координат – методом

Эйлера. Поскольку метод визуализации основан на наблюдении за отдельными движущимися частицами жидкости, переход в Лагранжеву систему координат позволяет проводить обработку отдельных линий тока более точно, например, вычислять поле ускорений, проводить сопоставление геометрических и скоростных характеристик линий тока. На рис.2.10 представлены распределение исходной x -компоненты скорости и результаты обработки исходных экспериментальных данных методом наименьших квадратов – сплошная кривая. Путем подбора параметра аппроксимации достигается наилучшее соответствие аппроксимирующей зависимости с исходными данными, затем обрабатываемая линия тока разбивается на отрезки равной длины, длина отрезков задается переменной $LENGTH$ в файле $main1.mcd$ и в полученных таким образом точках определяются значения скорости V_x и V_y , отмеченные на рис.2.10, б, смещёнными точками.

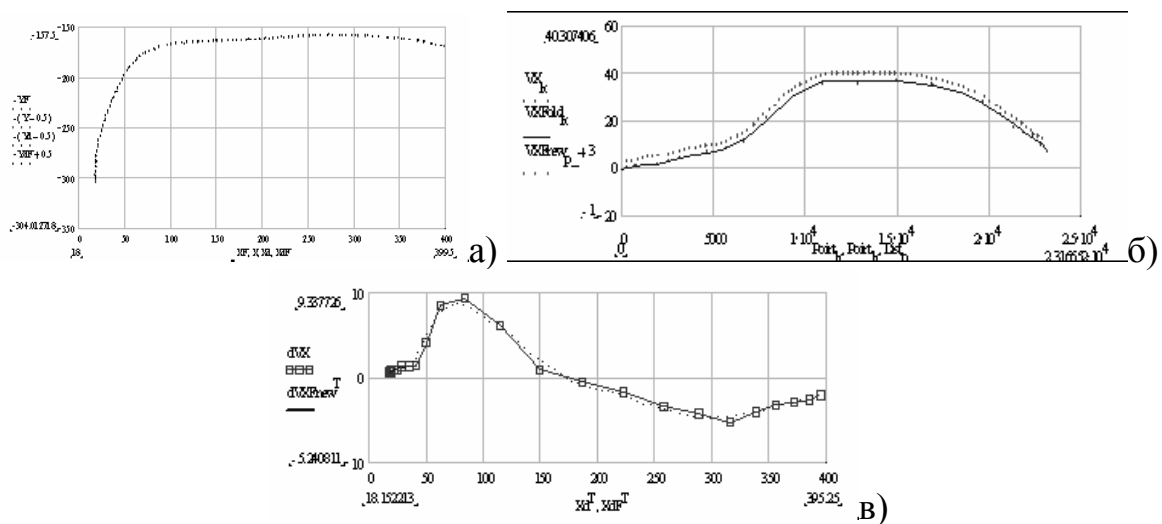


Рисунок 2.10. Линия тока (а), распределение скорости (б) и ускорения (в) вдоль линии тока.

На следующем этапе восстанавливается распределение ускорений вдоль линии тока путем вычисления приращений скорости на эквидистантных по времени отрезках, которыми являются исходные экспериментальные точки. Исходное распределение ускорений вдоль линии тока также аппроксимируется методом наименьших квадратов (рис.2.10, в), и достигается наилучшее соответствие экспериментальным данным путем подбора параметра аппроксимации. Затем обрабатываемая линия тока вновь разбивается на отрезки равной длины, и в полученных таким образом новых точках определяются значения приращений скорости dV_x и dV_y , значения которых делятся на соответствующие отрезки времени и приравниваются значениям ускорений в новых срединных точках. В конце программы производится пересчет всех данных в исходную систему координат, связанную с неподвижными электродами. Для оценки погрешности обработки в конце программы приводятся следующие графики и рисунки:

- исходная и восстановленная траектории, т.е. зависимость Y от X , зависимость X и Y от пройденного пути вдоль траектории,
- зависимость компонент скорости (V_x , V_y) и модуля скорости, а также их восстановленных значений от пройденного пути вдоль траектории,
- распределения компонент скорости и ускорения в неподвижной системе координат.

Эти данные записываются на диск командой «*Запись траектории*». Аналогично обрабатываются все остальные линии тока, зарегистрированные на фотографии.

Полученные данные объединяются одной из команд «*Объединение всех траекторий*» или «*Объединение выбранных траекторий*». Данные об отдельных траекториях могут быть удалены командой «*Delete choosed streams*». Предварительный просмотр поверхности скорости и силы осуществляется командой «*View*» (рис.2.9).

Окончательная обработка поля скоростей ЭГД–течения производится при помощи специальной программы, написанной на языке программы *MathLab*. Получившееся векторное поле называется исходным. Оно содержит множество областей, где нет информации о распределении скорости течения. Для заполнения пустых областей программа использует функцию *Griddata*, позволяющую проводить двумерную интерполяцию на неравномерной сетке различными методами. Полученные результаты охватывают всю область, учитывая точки, где скорость течения равна нулю, т.е. у электродов и в центрах завихрений. Кроме того, полученное после интерполяции векторное поле строится на равномерной, более мелкой сетке, чем исходное. Программа позволяет задавать шаг сетки в зависимости от нужд потребителя, для задания шага предусмотрено специальное окно. Специальное окно предусмотрено также для задания метода аппроксимации: линейного, отрезками кубических парабол или ступенчатого.

Автоматизация процесса обработки данных по исследованию ЭГД-течений [29,30]

Рассмотрим несколько иной подход к обработке экспериментальных данных. Его отличие состоит в отказе от предварительной подготовки изображения в графическом редакторе, а так же в частичной автоматизации процесса обработки данных. Предлагаемый метод универсален, пригоден для обработки данных, как фото, так и видеосъемки. Разработанная программа полностью реализована в системе *Matlab* с широким использованием стандартных процедур и функций, а также библиотеки *Image Processing Toolbox*.

К настоящему времени имеется ряд оригинальных программ, которые позволяют с достаточно высокой степенью точности производить компьютерную обработку фотографий ЭГД–течений. Обработка сводится к

следующему: выбирается отдельная линия тока, представленная на фотографии набором штрихов. Для нее с помощью кривых Безье проводится аппроксимирующая кривая. В местах пересечения этой кривой со штрихами ставятся маркирующие точки, которые несут в себе информацию о кинематических параметрах течения. Зная координаты маркирующих точек, можно определить компоненты скорости течения в местах расположения штрихов. Далее осуществляется аппроксимация зависимости компонент скорости от расстояния вдоль траектории, и их значения уточняются. Аналогичные действия выполняются для всех траекторий, имеющих на фотографии. После этого информация суммируется, производится аппроксимация данных о распределении скорости на всю область течения.

Этот же метод позволяет обрабатывать видеозаписи ЭГД-течений. Для этого видеоряд раскладывается на отдельные кадры. В графическом редакторе производится наложение выбранных кадров друг на друга, в результате всё сводится к описанному выше случаю. При этом достигается максимально возможная точность, но требуются значительные временные затраты. Предлагаемый метод универсален, пригоден для обработки данных, как фото, так и видеосъемки.

Представленная в рамках решения поставленной задачи система включает в себя два модуля, один из которых обеспечивает загрузку и преобразование графических файлов, ввод координат с элементами прогнозирования и автоматического поиска, а также удаление неверно введенных точек (искаженных траекторий), а второй – аппроксимацию введенных данных, построение полей по отдельным точкам, графическое представление информации на экране. Используются также средства стандартных библиотек системы *Matlab: Image Processing Toolbox, Spline Toolbox*.

О программе EHD-Reader

Программа *EHD Reader* предназначена для обработки видеок кадров и фотографий ЭГД-течений, написана в среде *Matlab* и оптимизирована под версии 7.x. Программа состоит из нескольких разделов (рис.2.11):

Также программа имеет собственное главное меню и панель управления. Подробнее о каждом из разделов программы можно посмотреть в соответствующем разделе справки.

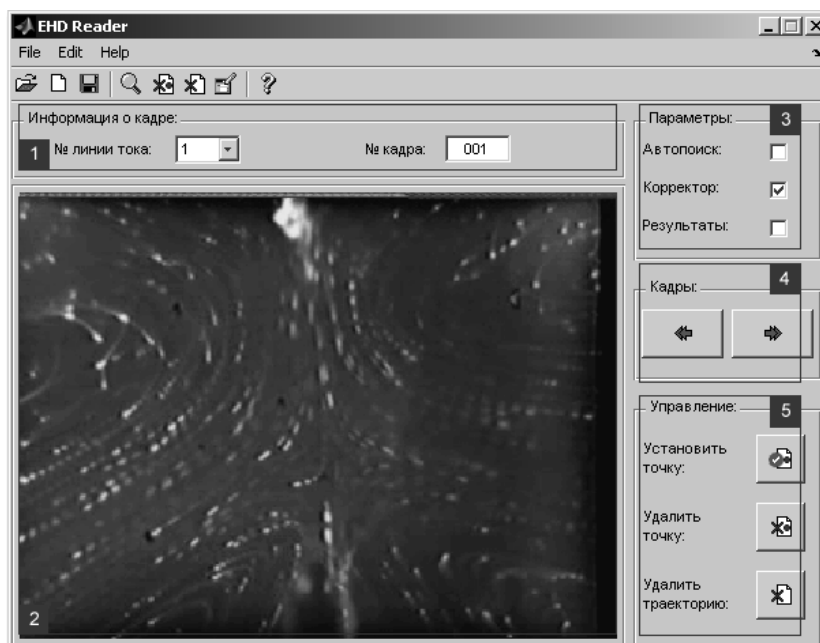


Рисунок 2.11. Окно программы EHD Reader для обработки ЭГД-течений: 1 – Информация о кадре, 2 – Рабочая область, 3 – Параметры, 4 – Управление кадрами, 5 – Управление траекториями и "метками".

Разделы программы EHD-Reader

Главное меню и панель инструментов

В программе *EHD Reader* было создано альтернативное главное меню и панель инструментов (рис.2.12). Главное меню состоит из трёх пунктов: *File*, *Edit*, *Help*, позволяющих загружать необработанные изображения или данные, затем их обрабатывать. Из меню *Help* можно вызвать справочную систему программы.

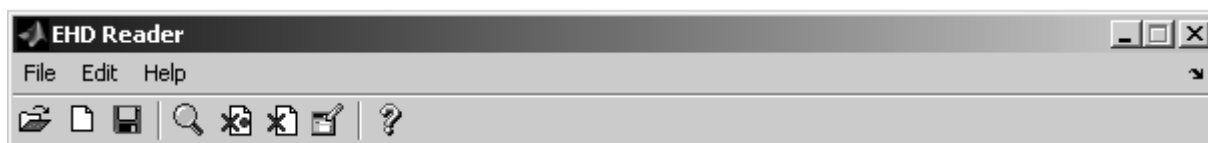


Рисунок 2.12. Главное меню программы EHD Reader.

Все те же действия можно выполнить, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов, созданную для удобства пользователя (рис.2.12).

Информация о кадре

Данный раздел состоит из двух пунктов: "*№ линии тока*" и "*№ кадра*", первый позволяет переходить от одной траектории к другой, второй – отображает порядковый номер активного файла из рабочей директории.

Рабочая область

Рабочая область представляет собой окно, в котором выводится текущий кадр. Нажатие левой кнопки мыши в этом окне приводит к появлению "меток",

соответствующих визуализирующим частицам в жидкости.

Параметры

Раздел состоит из трех пунктов: "Автопоиск", "Корректор", "Результаты". Включение опции "Автопоиск" позволяет автоматически находить новые точки, принадлежащие текущей линии тока. Однако эту опцию стоит отключить, в случае отсутствия в кадре активного "пузырька", и воспользоваться ручным вводом "метки".

Кадры

Кнопки "Предыдущий кадр" и "Следующий кадр" из этого меню позволяют переходить от кадра к кадру, поочередно обрабатывая их.

Управление

В этом меню содержатся кнопки, позволяющие установить "метку" – "Установить точку", удалить поставленную последней "метку" – "Удалить точку" и удалить текущую траекторию – "Удалить траекторию".

Открытие файла

После загрузки программы следует указать путь к директории (рис.2.13), содержащей графические файлы (*File\Загрузить изображение*), при этом в окне отобразится первый кадр. Интерфейс программы позволяет переходить от кадра к кадру, используя кнопки "Следующий кадр" и "Предыдущий кадр", либо клавиши управления курсором на клавиатуре. Траектории обрабатываются последовательно, по одной.

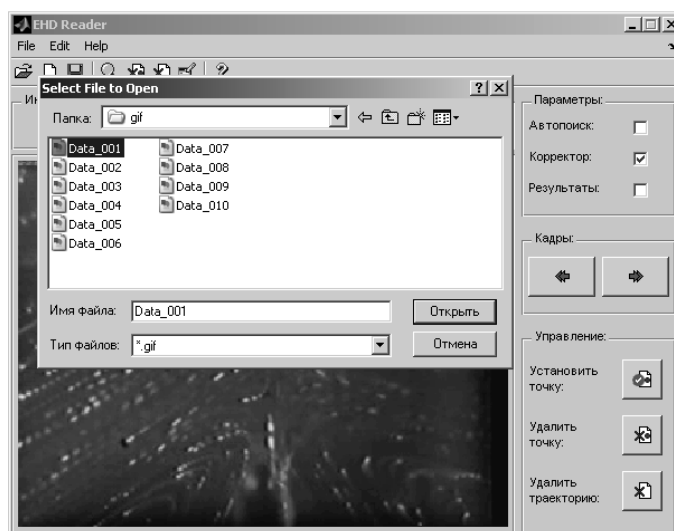


Рисунок 2.13. Загрузка изображения ЭГД–течения для последующей обработки.

При обработке видеofilма выполняются следующие действия: выбранный фрагмент фильма раскладывается в последовательность кадров, которые сохраняются как отдельные пронумерованные графические файлы. Особое внимание следует уделять тому, что одинаковые кадры не должны повторяться под разными именами.

Обработка траектории

Опишем процесс обработки одной траектории более подробно. Положение штриха выбранной траектории в текущем кадре указываются с помощью «мыши» и фиксируется нажатием кнопки "Установить точку". Координаты курсора в момент нажатия на клавишу считываются и передаются в функцию, которая определяет самый яркий пиксел вблизи указанной точки, производит бинаризацию по заданному уровню, выделяет объект, содержащий этот пиксел, и возвращает координаты центра этого объекта. Работа с графическими объектами ведётся с использованием средств библиотеки Image Processing Toolbox. Функция увеличения (Edit\Zoom) также позволяет повысить точность ввода.

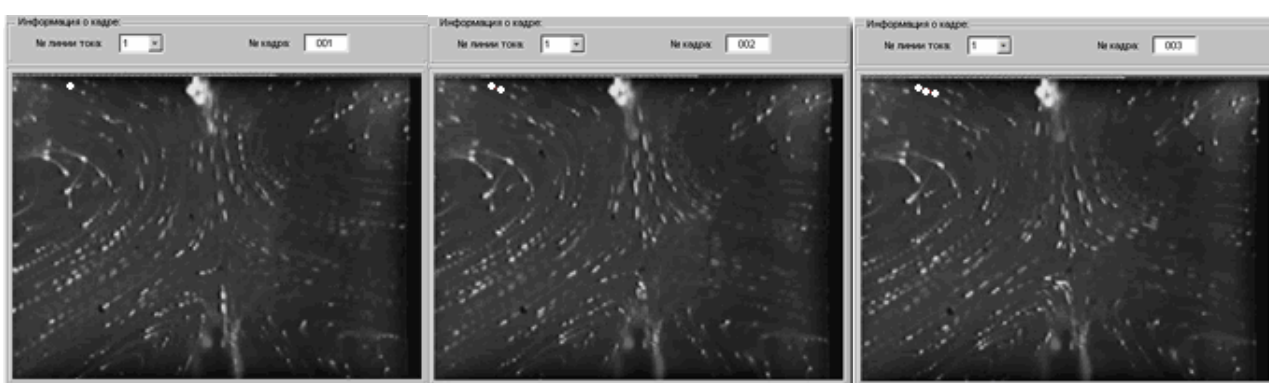


Рисунок 2.14. Последовательность кадров при ручном вводе координат точек траектории.

После ручного ввода координат трёх объектов (рис.2.14), координаты последующих могут быть найдены автоматически, для этого необходимо установить флажок *Параметры\Автопоиск*. По трём последним точкам траектории строится аппроксимационная парабола, и вблизи неё ищется новый объект.



Рисунок 2.15. Траектория ЭГД-течения.

В случае неудовлетворительной работы автоматического поиска, имеется возможность удалить введенную ранее точку или целую траекторию (кнопки "Удалить точку" и "Удалить траекторию"), а также ввести координаты вручную, описанным выше способом. В результате получаем обработанную траекторию (рис.2.15):

Параметры

В программе размеры изображения представлены в пикселях, что делает обработанные данные мало информативными. Для того чтобы перейти в процессе обработки к реальным размерам, предусмотрено диалоговое окно «Параметры» (рис.2.16), вызываемое либо соответствующей кнопкой из панели инструментов либо из вкладки *Edit* главного меню.



Рисунок 2.16. Окно «Параметры» программы EHD Reader

Рорир меню предлагает три варианта задачи параметров:

- 1) *Значения по умолчанию*: Данные масштабы заданы в программе EHD Reader и являются наиболее употребляемыми.
- 2) *Предыдущая сессия*: Устанавливаются значения параметров, использовавшихся последним пользователем во время сеанса работы с программой.
- 3) *Новые значения*: Параметры, задаваемые вручную. Остановимся на этом пункте более подробно.

Задание параметров масштабирования вручную

Основная задача, которая ставится перед пользователем – указать программе разрешение, т.е. величину, измеряемую в [см/px] и определяющую количество сантиметров, приходящихся на один пиксель изображения. Выполняется это следующим образом: включаем флажок *Установить\Применить* (рис.2.17), после чего курсор приобретает форму

креста, и указываем на изображении местоположение реперных точек, ими может быть любая пара объектов, например, изображение линейки.



Рисунок 2.17. Окно программы EHD Reader для выбора параметров масштабирования вручную.

После того, как координаты реперных точек определены, в строке *Истинный размер* задается значение реального расстояния между этими точками, измеренное в сантиметрах.

Еще одним необходимым параметром является *Частота подсветки* – это время между двумя соседними кадрами. Эта величина задается в секундах.

После того, как параметры будут определены следует снять «флажок» *Установить\Применить*, иначе изменения не вступят в силу. Сохранение параметров произойдет после закрытия окна, после чего они будут доступны в пункте *Предыдущая сессия*.

Результаты

После того, как интересующие линии тока обработаны, в окне *Результаты* можно проанализировать полученные данные. Окно состоит из двух частей, на которых, соответственно, изображены (рис.2.18):

- 1) Графики скоростей – X-ой и Y-ой компоненты скорости
- 2) Контурные графики скоростей для обработанных линий тока

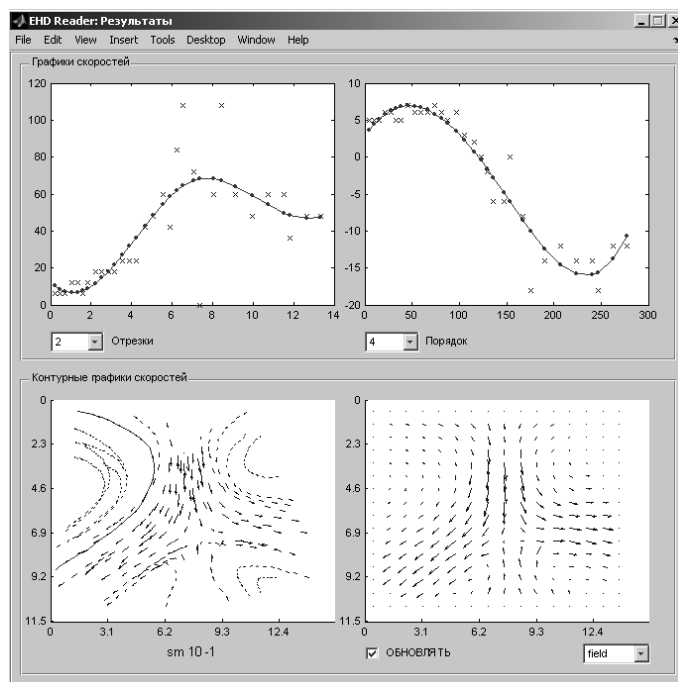


Рисунок 2.18. Окно Результаты программы EHD Reader.

Более подробную информацию о выводимых графиках можно посмотреть в соответствующих разделах справки.

Компоненты скорости

В результате обработки фотографий, значения компонент скорости "меток" становятся известными. Правда, эти значения определены лишь в дискретные моменты времени. Для того чтобы построить зависимость скорости частицы от ее положения в межэлектродном промежутке, осуществляется аппроксимация полученных данных сплайнами по методу наименьших квадратов. При этом параметр: «Отрезки», отвечает за количество отрезков аппроксимирующего сплайна, а значение параметра: «Порядок», за порядок аппроксимирующего сплайна (рис.2.19).

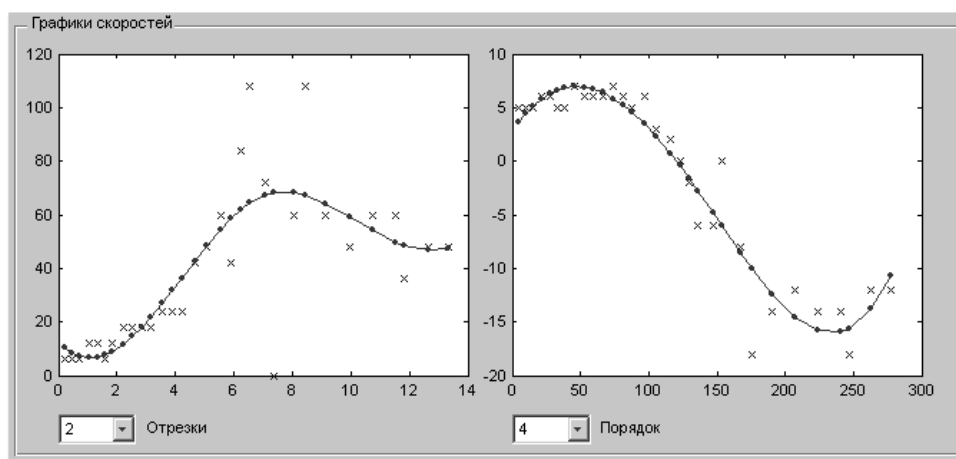


Рисунок 2.19. Аппроксимация экспериментальных данных отрезками сплайнов.

Контурные графики

После того, как каждая из интересующих линий тока обработана в отдельности, можно построить общую картину поведения жидкости. В разделе «Контурные графики» предлагается построить такую картину в одном из трёх представлений:

- 1) *Поле скоростей* – векторное представление (рис.2.20),
- 2) *3D сетка* – представление в виде цветовой гаммы,
- 3) *Контурный график* – представление в виде уровней.

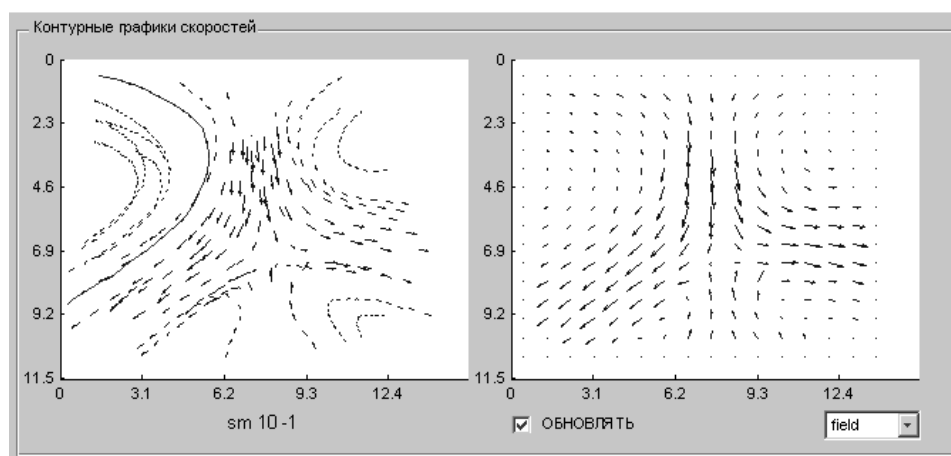


Рисунок 2.20. Векторное построение поля скоростей.

Изображение считывается из каждого файла функцией *Imread*. Поскольку производится обработка отрывка видеоплёнки, представляющего собой последовательность изображений, предусмотрена возможность последовательного перехода от кадра к кадру. Все кадры должны именоваться специальным образом, а именно иметь в конце названия трёхзначный порядковый номер. С помощью мыши помечается какой-либо элемент траектории, на кадре это точка или штрих. Координаты курсора мыши в момент нажатия на кнопку считываются и передаются в рекуррентную функцию *corrector*, которая определяет самый яркий пиксель вблизи исходной точки, производит бинаризацию по заданному уровню, выделяет объект, содержащий пиксель максимальной яркости функциями *bwselect* и *bwlabel* и возвращает координаты центра этого объекта.

Одной из «изюминок» программы является возможность фиксировать в одном кадре несколько положений одной метки (пузырька), что особенно важно при большой скорости течения и малой частоте кадров видеозаписи. Однако здесь нужно быть особенно внимательным, чтобы не зафиксировать одни и те же координаты световых пятен на разных кадрах, это приводит к грубым ошибкам в вычислениях. Такой нюанс был замечен при пробной работе с программой после добавления в неё функции вычисления ускорений, при

таких расчетах вклад разности каждой пары координат, а соответственно и ошибки в их определении, значительно возрастает. То, о чём сейчас идёт речь, проще всего пояснить по иллюстрации (рис.2.21).

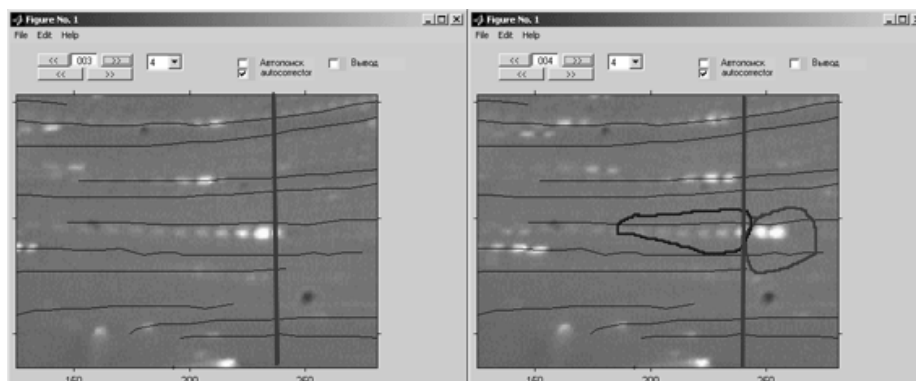


Рисунок 2.21. Реальное местоположение метки (обведено красным) и точки послесвечения.

На представленной видеопоследовательности (рис.2.21) отлично видно, что лишь две точки в новом кадре являются оригинальными, длинный «хвост» позади следует из предыдущих кадров и может быть объяснён «памятью» камеры, длительным периодом релаксации её активного элемента. При обработке больших объёмов видеоматериалов важно помнить об этих деталях и не допускать ошибок.

Продолжим обзор программы. Для удобства работы предусмотрена возможность использования функции увеличения. Процедура ручного указания объекта повторяется еще два раза для последовательных кадров, после чего введенные координаты аппроксимируются функцией *Polyfit*, и следующий объект ищется на аппроксимирующей кривой – ищется ближайшая точка максимальной яркости и для нее вызывается «*corrector*», освобождая пользователя от необходимости вводить следующие объекты данной траектории. Достаточно просто перелистывать кадры и, наблюдать за положением объекта, вычисленным программой. На случай неудовлетворительного определения, здесь также сохраняется возможность ручного ввода, с автоматической коррекцией или без неё, что необходимо при обработке особенно размытых штрихов.

При вводе каждой траектории, производится аппроксимация данных. Она необходима для минимизации неизбежной погрешности. В отдельном окне отображается зависимость x -ой и y -ой компонент скорости от пути, пройденного по траектории, а также результат аппроксимации этой зависимости. Программа позволяет гибко менять параметры, число и порядок, аппроксимирующих сплайнов. Во всех последующих расчетах используются уже новые, уточнённые величины компонент скоростей. После обработки отдельных линий тока полученная информация объединяется, строится равномерная сетка с заданными параметрами, и на ней выводится общая

картина распределения скоростей (в виде векторного поля, линий уровня, либо трёхмерной поверхности), что является завершением процесса обработки видеофрагмента.

После ввода некоторого количества траекторий, производится перегруппировка, интерполяция на равномерной сетке *meshgrid* и вывод результатов в виде графиков: скоростей вдоль введенных линий тока и векторного поля скоростей.

Вычисляется также поле модуля скорости, для использования другими программами. Результаты сохраняются на диск компьютера в виде «.mat»-файла. Имеется возможность, непосредственно после запуска программы, загрузить сохраненные ранее данные и, не повторяя ввод траекторий, посмотреть результаты.

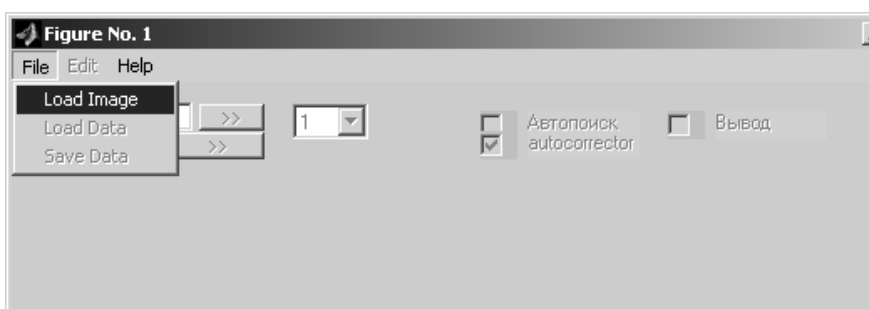


Рисунок 2.22. Функция загрузки файлов с графическими данными.

Опишем более детально имеющиеся функции программного обеспечения с позиции пользователя. Программа имеет обычный для современных *windows*-приложений графический интерфейс пользователя с системой меню и экранных кнопок. Сразу после запуска, имеется доступ только к меню *File*, позволяющему выбрать последовательность кадров видеофильма или файл фотографии для обработки (рис.2.22).

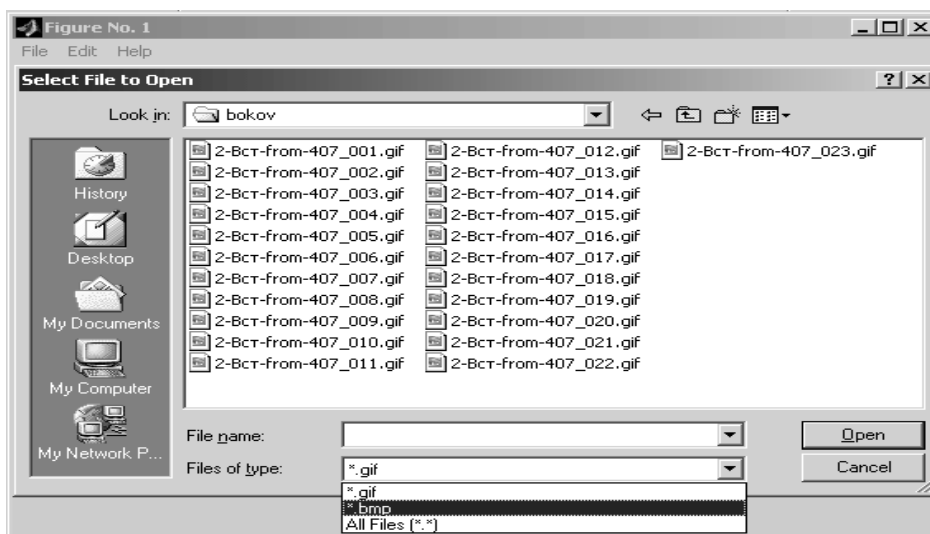


Рисунок 2.23. Выбор формата графических файлов.

В последней версии добавлена возможность загрузки как индексных графических файлов формата *gif*, так и стандартных для *windows*-платформы растровых *RGB*-файлов с расширением *.bmp* (рис.2.23).

Использование файлов с расширением *.bmp* позволяет при предварительной подготовке обходиться без сложных и, вообще говоря, не бесплатных пакетов от *Adobe*, используя свободно распространяемую программу *VirtualDub*, которая позволяет открывать, просматривать видеофайл и сохранять его в виде последовательности кадров в *bmp*-формате. В процессе обработки используется индексированное изображение, приведённое к 256 градациям серого, однако все преобразования формата производятся автоматически, незаметно для пользователя.

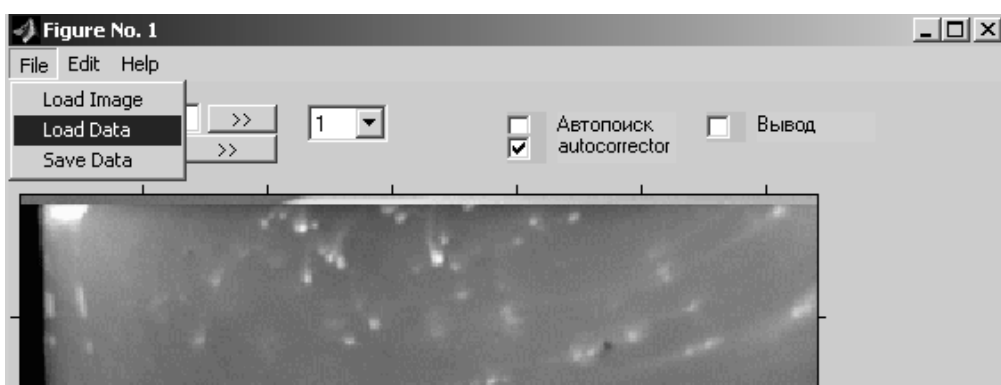


Рисунок 2.24. Загрузка из файла ранее полученных данных.

После выбора источника графических данных, появляется возможность подгрузить файл с ранее обработанными траекториями (рис.2.24).

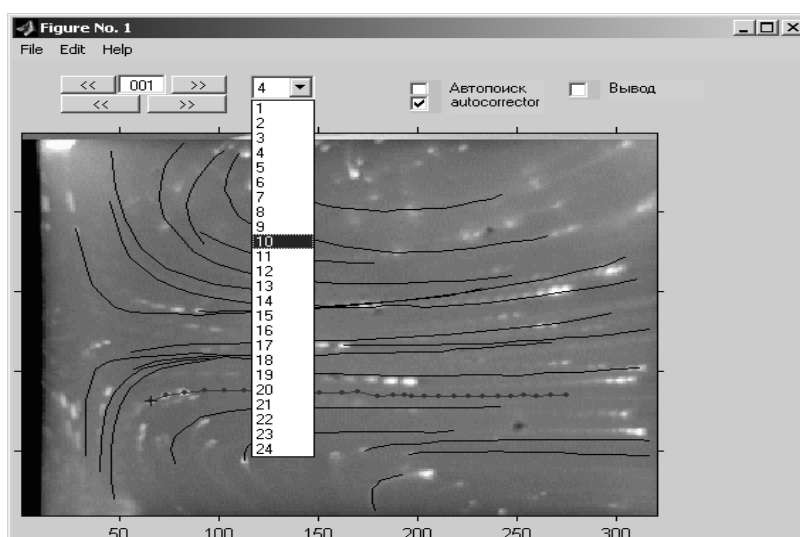


Рисунок 2.25. Выбор активной траектории.

Выбор траектории для работы производится с помощью выпадающего меню (рис.2.25). Назначение других элементов управления таково (рис.2.26): кнопки «1», продублированные клавишами ← и → клавиатуры – перемещение на один

кадр назад/вперёд; кнопки «2», клавиши ↓ и ↑ – переход к вводу следующей координаты объекта в рамках одного кадра; «3» – выбор активной траектории; «4» – в случае, если «галочка» установлена, программа будет пытаться автоматически находить координату очередной точки траектории (работает, если на данной траектории уже определено хотя бы три точки); «4» – в ручном режиме выбора координаты выбранной точки корректируются программой; «5» – установка «галочки» вызывает окно вывода результатов аппроксимации для активной траектории, в том же окне можно наблюдать общее поле скоростей, а также результаты дополнительной интерполяции на равномерной мелкой сетке.

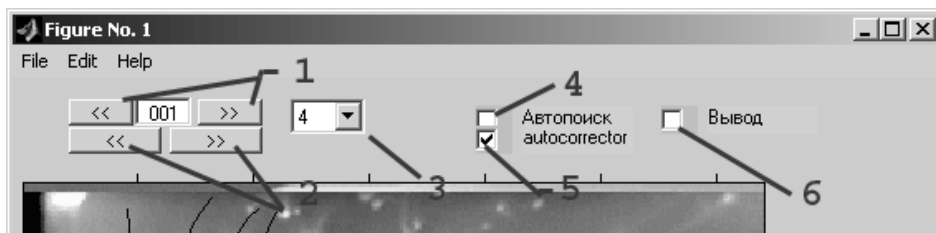


Рисунок 2.26. Основные элементы графического интерфейса пользователя.

Дополнительные функции программы доступны через меню редактирования (*Edit*) (рис.2.27).

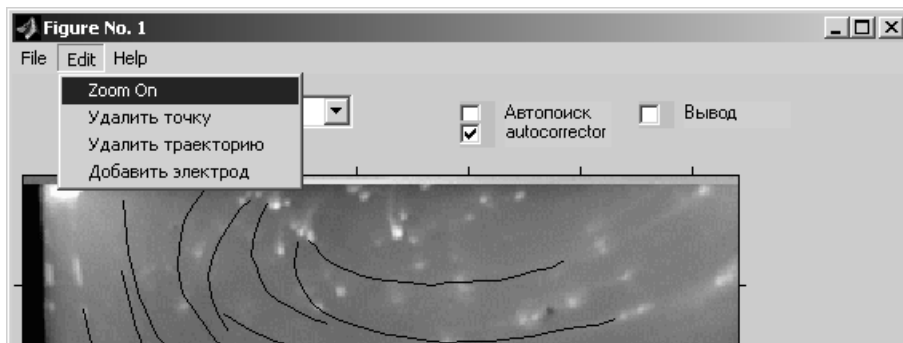


Рисунок 2.27. Функции меню редактирования.

Zoom On/Off – включить/выключить режим увеличения, данная функция вызывается также нажатием клавиши «Z» на клавиатуре. В режиме увеличения можно с лёгкостью прослеживать траектории даже на малоcontrastных кадрах. Меню «*Edit*» позволяет также оперативно и аккуратно удалить ошибочно поставленную точку, либо не понравившуюся, например, из-за какой-либо грубой погрешности, траекторию целиком. Пункт «*Добавить электрод*» переводит программу в режим ввода поверхностей нулевой скорости – электроды и центры завихрений струй (рис.2.28).

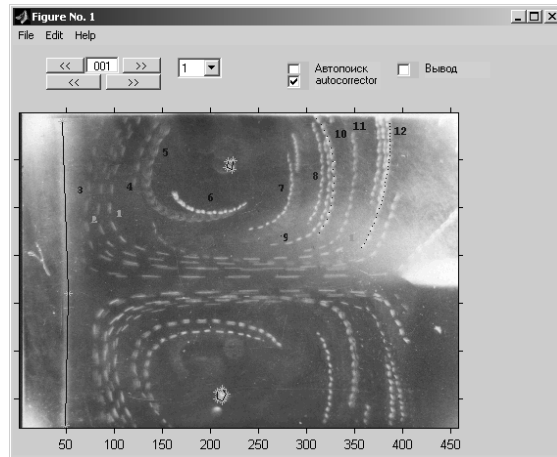


Рисунок 2.28. Задание поверхностей нулевой скорости.

Установив, галочку «Вывод», можно наблюдать за аппроксимацией данных для активной траектории (рис.2.29). Начальная аппроксимация производится на основании зависимости X - и Y -координат от пути, пройденного точкой вдоль траектории. Аппроксимация использует сплайны, причём, пользователь может самостоятельно выбирать параметры – порядок полиномов сплайна и число отрезков полиномов, описывающих всю траекторию, изменяя значения «*order*» и «*pieces*» соответственно. Если подставить в качестве «*pieces*» число, большее либо равное количеству предопределённых точек траектории, аппроксимация превратится в интерполяцию: график полученной гладкой функции будет проходить через все точки.

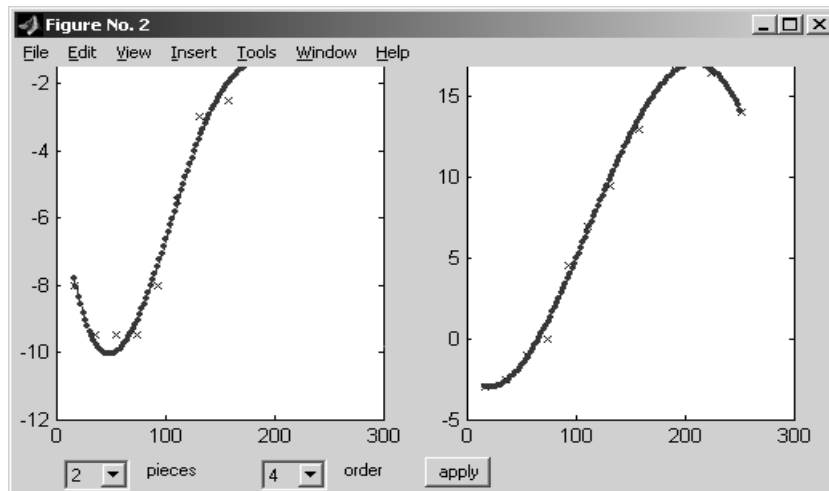


Рисунок 2.29. Аппроксимация зависимости $x(S)$ и $y(S)$.

Полученные в результате предварительной обработки траектории объединяются, и, с помощью функции *Griddata*, строится общее поле ЭГД-течений на мелкой равномерной сетке.

Анализ структуры ЭГД–течений в несимметричной системе электродов

Этот раздел посвящен анализу экспериментального материала по исследованию ЭГД–течений в так называемых несимметричных системах электродов, к которым относят системы типа игла–плоскость, провод–плоскость и другие, в которых один из электродов по геометрическим причинам имеет в своей окрестности повышенную напряженность электрического поля, а значит и облегченные условия поверхностного зарядообразования.

Большинство экспериментов проведено в системе электродов провод над плоскостью, т.к. в этой системе течения близки к двумерным, что облегчает анализ их структуры.

Ниже приводится анализ структурных особенностей электрогидродинамических течений в несимметричной системе электродов типа провод (лезвие) над плоскостью. Анализируемые ЭГД–течения различаются геометрическими параметрами электродов, величиной прикладываемого напряжения и низковольтной проводимостью жидкости, материалом электродов.

Для исследования поля скоростей в гидродинамике часто используют различные методы визуализации течений. Фотографии и видеокadres анализируемых ЭГД–течений обычно регистрируются при импульсной подсветке в отраженном свете на черном фоне.

Эксперименты проводились в трансформаторном масле с примесью йода и бутанола – примеси с повышенными электронно-акцепторными свойствами. В качестве электродов использована система «провод (лезвие) – плоскость». На рисунках в данной главе: провод расположен слева, плоскость – справа. ЭГД–течение в подобной системе направлено от цилиндра к плоскости и носит двумерный “плоский” характер. Обработка проводилась путем выделения отдельных линий тока течения с последующим восстановлением компонент векторов скорости и ускорения.

В НОЦ «Электрофизика» имеется банк данных, содержащий фотографии ЭГД–течений, видофильмы ЭГД–течений, общим объемом более 10000 кадров, снятых в различных условиях. Этот банк является приложением к данному пособию.

Как уже отмечалось ранее кинематика и динамика ЭГД–течений в слабопроводящих жидкостях определяется типом электрохимических реакций в окрестности электродов, особенностями структуры жидкости в присутствии объемного заряда, конфигурацией как внешнего электрического поля, так, в большей степени, конфигурацией внутреннего электрического поля наведенного объемным зарядом. Таким образом, внимательно исследуя кинематическую и динамическую структуры ЭГД–течений можно сделать существенные выводы о процессах происходящих в жидкости: её объемном

заряде и распределении электрического поля. Наиболее полные и целенаправленные исследования кинематической и динамической структур ЭГД–течений были представлены в работе [26]. В этой работе были впервые описаны основные свойства ЭГД–течений.

Результаты обработки

Долгое время проблематичным остается вопрос о существовании порога ЭГД–течений. Это связано с тем, что при исследованиях методом визуализирующих включений невозможно совершенно избавиться от их самодвижения в гравитационном поле. Когда речь идет об изучении очень малых скоростей, ЭГД–эффекты становятся неразличимы на фоне термогравитационных. Тем более нарушение гидростатического равновесия обнаруживается лишь в пределах приэлектродных зон. Поэтому некоторые авторы говорят лишь о заметных ЭГД–течениях. Но проблема существования порога ЭГД–течений принципиальна. В наших опытах для ее исследования были использованы одновременно несколько различных методов.

Впервые существование порога было замечено при изучении интенсификации теплообмена в электрическом поле. Эффект обнаруживается следующим образом: если в качестве одного из электродов выбрать провод, нагреваемый протекающим через него током, а в качестве второго – пластину и подавать на электроды напряжение, то при повышении напряжения коэффициент теплоотдачи сначала уменьшается, а затем, с некоторого порогового значения, начинает возрастать. Послекритический участок спада температуры электрода связан с ростом коэффициента теплоотдачи и обусловлен возникновением в жидкости ЭГД–эффектов. Существование докритического участка уменьшения коэффициента теплообмена позволяет уверенно фиксировать порог возникновения течений.

Что касается наблюдений кинематических течений методом визуализирующих частиц, то на существование порога указывает очень быстрый рост скорости течений в послепороговой области напряжений. При наблюдениях с метками в виде пузырьков замечен следующий интересный результат: в жидкости в отсутствие поля всегда имеются слабые течения, вызванные, по-видимому, термогравитационными причинами, при подаче на электроды напряжения ниже некоторой критической величины, их интенсивность у электродов вначале падает, жидкость как бы «замораживается», а при подаче напряжения выше критического значения возникают ЭГД–течения от электрода. Эффект «замораживания» облегчает обнаружение порога возникновения течений.

Наиболее убедительные результаты, свидетельствующие о наличии порогового напряжения, были получены капельным методом при изучении объёмного заряда у поверхности электродов. При напряжениях ниже

критического значения в жидкости в приэлектродных областях регистрируется гетерозаряд, сначала возрастающий, а затем, с ростом напряжения, уменьшающийся до нуля. При дальнейшем повышении напряжения выше критического, в приэлектродной зоне возникает гомозаряд, увеличивающийся с ростом напряжения. Как известно, наличие гетерозаряда в приэлектродной области не может вызвать ЭГД–течений, оно только повышает давление в приэлектродных областях. Это, по-видимому, и приводит к замедлению термогравитационных течений и регистрируется как "замораживание" приэлектродной зоны. Коэффициент теплоотдачи при этом падает по вполне понятным причинам. Гомозаряд, возникающий при сверхкритических напряжениях, приводит к ЭГД–неустойчивости и приводит к возникновению ЭГД–течений. Следствием этого является возникающее увеличение коэффициента теплоотдачи.

Далее представлены результаты компьютерного анализа имеющихся в базе данных фотографий и видеозаписей ЭГД–течений. Обработанные материалы можно представить в виде векторных полей скоростей и ускорений, карт линий уровня или поверхностных графиков скоростей и ускорений, а также можно восстановить линии тока ЭГД–течения, а также привести распределения ускорений вдоль любой выбранной линии тока и вычислить некоторые интегральные характеристики, например, расход жидкости вдоль произвольно выбранных линий тока жидкости. Эти графики представляют собой распределения характеристик ЭГД–течений в центральной плоскости сечения кюветы, нормальной к плоскому электроду. За единицу длины в безразмерном представлении выбирается межэлектродное расстояние. Начало координат обычно соответствует вершине электрода меньшего размера, плоский электрод находится на уровне $x = 1$.

Диапазон существования ЭГД–течений ограничен сверху напряжением, приводящим к пробою жидкости. Для исследований ЭГД–течений в области предпробойных напряжений в схему питания введено защитное сопротивление $R = 300 \text{ МОм}$, которое для предотвращения выхода из строя измерительной аппаратуры ограничивает величину разрядного тока и энергию разряда. Так, например, при напряжении 60 кВ ток разряда не превышает 10^{-4} А , а энергия разряда достигает $\sim 10^{-5} \text{ Вт/с}$. Столь маломощный разряд, кроме того, не может вызвать существенных изменений химического состава жидкости, а поэтому можно наблюдать ЭГД–течение на фоне многократных разрядов.

Наблюдения предпробойной стадии ЭГД–течений проводились в системе провод–плоскость, шар–плоскость и острие–плоскость. При повышении напряжения увеличивалась скорость ЭГД–течений, а при некотором напряжении у поверхности острейкового электрода возникали светящиеся области, напоминающие корону в газе, хорошо заметные в полярных жидкостях, например в дихлорэтаноле. Место первоначального возникновения светящейся точки случайно, с течением времени светящаяся область

хаотически перемещается вдоль поверхности электрода. При наблюдении ЭГД–течений в системе острие–плоскость светящаяся область обычно перемещается по всей поверхности электрода, а не локализована у кромки острия. Порою светящиеся области сносятся течением с поверхности электрода в жидкость. Дальнейшее повышение напряжения обычно приводит к пробоем межэлектродного промежутка. Непосредственно перед пробоем скорость течения несколько затухает, затем образуется плазменный канал, по которому разряжается выходной конденсатор выпрямителя. После пробоя в жидкости, в месте прохождения плазменного канала, появляется группа газовых пузырьков. Течение на некоторое время, необходимое для зарядки конденсатора высоковольтного источника затухает, но со временем оно вновь восстанавливается до прежней интенсивности. С ростом напряжения средняя частота пробоев может возрасти от 10^{-4} Гц до 1 Гц и более. При этом общая картина течения сохраняется.

На рис.2.30 представлены фотографии ЭГД–течений при разных напряжениях на электродах. Фотографии серии (А) были получены для системы электродов шар – плоская пластина (диаметр шара 3,0 мм) в касторовом масле в диапазоне напряжений 2÷25 кВ. Порог возникновения течений в этой жидкости составляет 1 кВ. Видно, что при сравнительно низких напряжениях течение реализуется в виде двух замкнутых ячеек, локализованных у поверхности шарового электрода, и не охватывает периферийных слоев жидкости. С ростом напряжения область локализации течения расширяется в глубину межэлектродного промежутка до тех пор, пока течение не охватит всего промежутка. По фотографиям ЭГД–течений в касторовом масле можно предположить, что во всем исследованном диапазоне развитое течение носит параллельно–струйный ламинарный характер. Линии тока жидкости взаимопаралельны и не имеют мелкомасштабных завихрений. Вид ЭГД–ячеек и их характерные размеры сравнительно мало изменяются во всем исследованном диапазоне напряжений.

Серия фотографий (Б) (рис.2.30) была получена в 10 %-ном растворе бутилового спирта в трансформаторном масле для расширенного диапазона напряжений 1÷60 кВ при межэлектродном расстоянии 1 см. Пробивной участок в этой жидкости лежит в диапазон 60÷65 кВ, а пороговое напряжение равно 300 В. Течение также в целом сохраняет параллельно–струйный характер, хотя на общем упорядоченном фоне имеют место отдельные нарушения, увеличивающиеся с ростом напряжения на электродах, например, пересечение траекторий визуализирующих частиц или крутой излом. Эти отклонения, по-видимому, следует связать с временной нестабильностью генерации заряда в среде и, следовательно, с нестабильностью действующих кулоновских сил, а не с турбулизацией самого течения в классическом понимании.

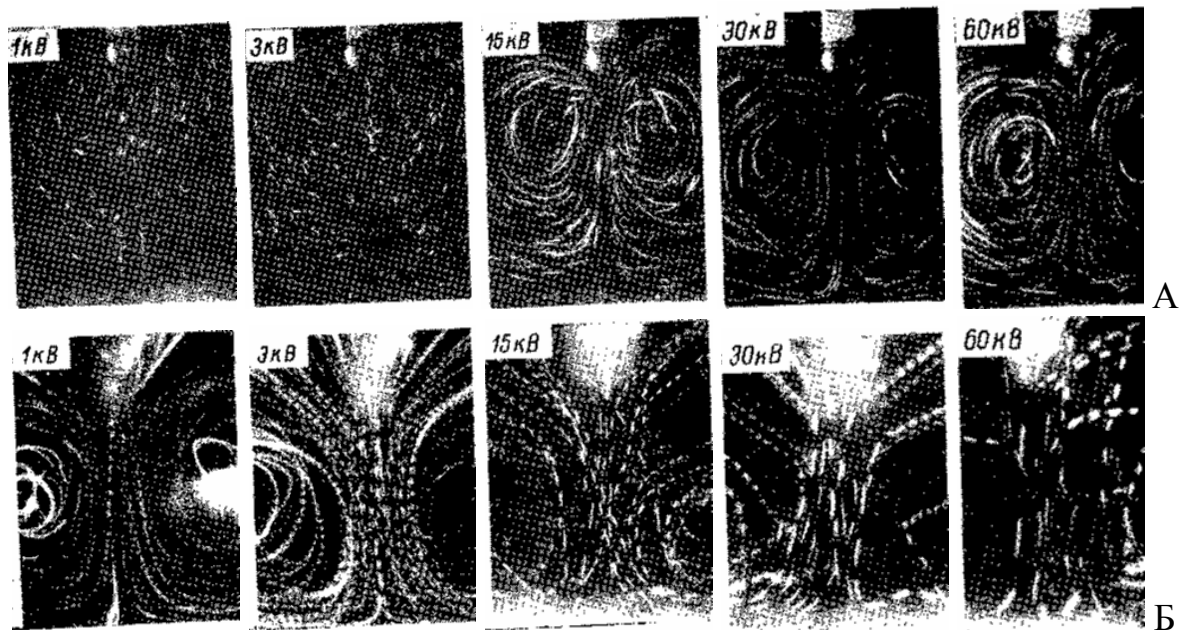


Рисунок 2.30. ЭГД-течений при разных напряжениях на электродах, электроды шар-плоскость, А – касторовое масло, Б – 10 %-ый раствор бутанола в трансформаторном масле.

Оценим гидродинамическое число Рейнольдса для центральной струи ЭГД-течения $Re = v \cdot l_0 / \nu$. В условиях эксперимента при $U = 60$ кВ, скорость $v = 1,3$ м/с. В качестве линейного размера выберем расстояние между центрами завихрений $L = 1$ см, вязкость $\nu = 20$ см²/с, $Re = 7$. Это значительно меньше критического значения, соответствующего началу турбулизации, которое, например, для жидкости в цилиндрической трубе равно $Re_t = 2500$.

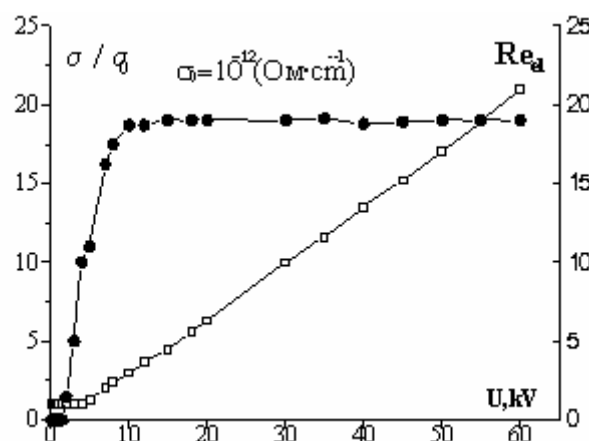


Рисунок 2.31. Зависимость электрического Рейнольдса (Re_e) от напряжения на электродах и вольтамперная характеристика.

В некотором диапазоне напряжений, лежащем непосредственно за порогом возникновения, течения носят неразвитый характер, далее следует режим развитого ЭГД-течения. Классификация ЭГД-течений в области

«низких» и «высоких» напряжений дана в [26]. Течения при низких напряжениях, локализованные в окрестности активного электрода, названы неразвитыми, а течения, занимающие весь межэлектродный промежуток – развитыми.

Сравнительный анализ развитых ЭГД–течений при различных напряжениях, не выявил существенных структурных различий. Зависимости средней скорости в центральной струе от напряжения на электродах в режиме неразвитого течения носят степенной характер $v \sim U^k$ ($k > 2$), в режиме развитого течения обычно $k = 1$. В [26] предложена удобная безразмерная форма представления и анализа зависимостей $v = v(U)$, в качестве единицы измерения скорости приведена средняя скорость дрейфа ионов $v_0 = bU/l_0$, здесь b – подвижность ионов. В безразмерном виде зависимости средней скорости от напряжения выглядят как $Re_{el} = v/v_0 = f(U)$, величину Re_{el} обычно называют электрическим числом Рейнольдса. На рис.2.31 представлены эти зависимости для течения в системе лезвие–плоскость, там же в безразмерной форме представлены соответствующие вольтамперные характеристики. Видно, что зависимость $Re_{el} = f(U)$ имеет пороговый характер. Порог возникновения течений U_0 не совпадает с напряжением перехода к сверхомическому участку вольтамперной характеристики U_1 . Обычно $U_1 > U_0$. В режиме неразвитого течения наблюдается очень быстрый рост электрического числа Рейнольдса, в режиме развитого течения электрическое число Рейнольдса постоянно $Re_{el} = const$. Назовем это значение предельным Re_{ec} .

Наиболее ярко эти особенности ЭГД–течений различимы на картах линий уровня скорости, представленных на рис.2.32 для развитого и неразвитого ЭГД–течений в системе электродов лезвие–плоскость в жидкости с уровнем низковольтной проводимости в 10^{-9} Сим/м. ЭГД–течение, как в развитом, так и в неразвитом случае носит ламинарный, параллельно-струйный характер, течение направлено от лезвиеобразного (активного) электрода к плоскому (пассивному).

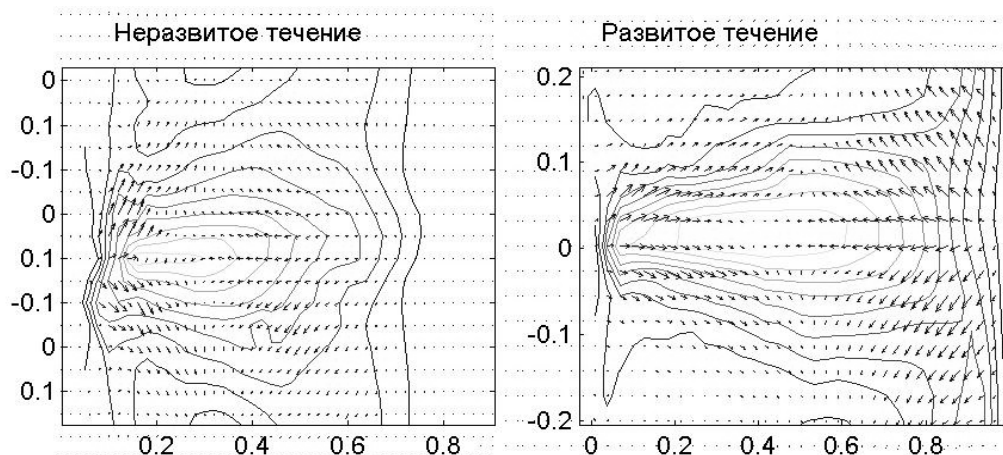


Рисунок 2.32. Карты линий уровня скорости неразвитого и развитого ЭГД-течений. Стрелками показано векторное поле сил

Область, занятую ЭГД–течением, можно условно разделить на несколько зон. В непосредственной близости к электроду имеется тонкий прилипший слой относительно неподвижной жидкости. Он имеет характерную толщину в десятые доли миллиметра и виден в некоторых экспериментах. Этот слой, как правило, свободен от взвешенных в жидкости мелких частичек. В пределах этого слоя происходит проникновение, «инжекция», электрического заряда с поверхности электрода в жидкость.

Далее следует короткая зона интенсивного ускорения жидкости электрическим полем, расположенная у поверхности активного электрода. Эта зона лежит на уровне $0 \div 0,1$ и соответствует области концентрации линий уровня скорости (рис.2.32). В этой зоне векторы сил направлены по течению, либо под острым углом к нему. В пределах этой зоны электрическая энергия преобразуется в кинетическую. Далее следует зона плавно изменяющегося течения. Она, названа центральной струей ЭГД–течения и соответствует параллельно-струйной его части. В пределах центральной струи линии тока течения близки к отрезкам параллельных прямых. Как видно из анализа векторных полей сил (рис.2.32) в этой области течения происходит изменение направления действующих сил. Далее следует зона торможения центральной струи ЭГД–течения. Непосредственно к поверхности противоэлектрода примыкает неподвижный приэлектродный слой жидкости. В пределах зоны торможения происходит резкое уменьшение модуля скорости, а, следовательно, кинетической энергии течения, а также изменение направления течения и раздвоение центральной струи.

Сопоставление распределений скорости $v(x)$ развитого ЭГД–течения с аналогичными распределениями для движения заряженных шариков в трансформаторном и касторовом маслах выявляет некоторые аналогии: во-первых, в обоих случаях имеет место весьма короткий участок разгона, переходящий в участок движения с постоянной скоростью, во-вторых, при малых скоростях движения устанавливается режим неразвитого течения: $(l_0/v < \tau)$. В обоих случаях наблюдается участок торможения, заканчивающийся остановкой тела внутри межэлектродного промежутка. Эти аналогии являются следствием единой физической природы обоих процессов: ЭГД–течения и движения твердых частиц в диэлектрической жидкости. Так, например, остановка шара внутри промежутка связана с тем, что в процессе движения заряд шара стекает в окружающую среду. Аналогичный эффект имеет место в режиме неразвитого ЭГД–течения: заряд центральной струи за время движения мигрирует и диффундирует в окружающую жидкость, что приводит к остановке струйки заряженной жидкости в середине межэлектродного промежутка. По мере повышения напряжения скорость движения заряженной струйки возрастает, и время пересечения жидкостью межэлектродного промежутка становится меньше времени релаксации заряда: $\tau = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma$. Это

соответствует переходу в режим развитого ЭГД–течения. В качестве безразмерного критерия этого процесса можно предложить число $\Gamma = l_0 \cdot \sigma / (v \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0)$, равное отношению времени пересечения жидкостью промежутка к времени релаксации τ . Переход в режим развитого течения соответствует $\Gamma = 90$.

Выявленные различия ЭГД–течений в разных условиях касаются в основном размеров и характера описанных зон.

Как видно (рис.2.32), в зоне ускорения неразвитого ЭГД–течения вектора ускорений веерообразно расходятся от лезвия, причем максимумы ускорений лежат на уровне 0,05 и симметрично смещены в обе стороны относительно оси симметрии течения. Это хорошо видно на рис.2.33, где представлены карты линий уровня сил, более светлые области соответствуют большим уровням силы. Видно, что в неразвитом течении области наибольшего уровня ускорений у активного электрода сосредоточены в пределах узкой приэлектродной зоны $0 \div 0,1$ (кромка лезвия лежит на уровне 0,0). Это происходит в результате миграции объемного заряда в поле электрода, так как скорость ЭГД–течения мала и время максвелловской релаксации жидкости также мало и составляет примерно 0,01 с.

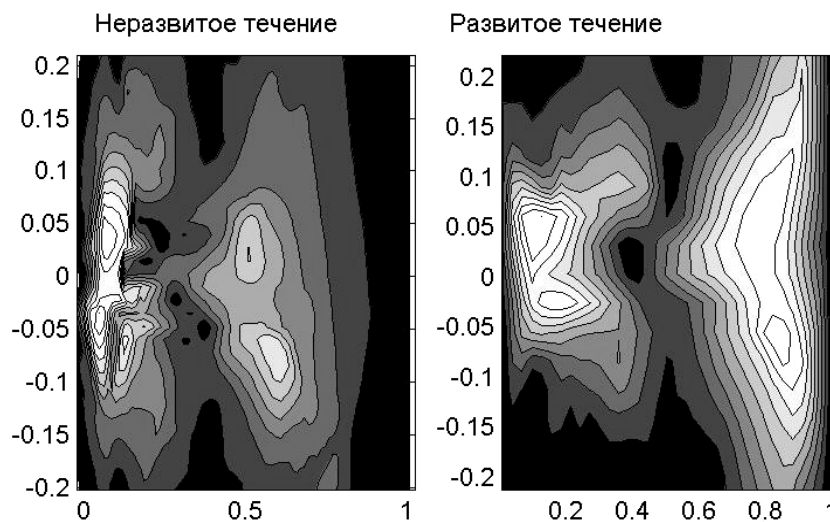


Рисунок 2.33. Карты линий уровня сил неразвитого и развитого ЭГД–течений в системе лезвие–плоскость.

Как показано ранее, переход в режим развитого ЭГД–течения осуществляется путем резкого возрастания относительной скорости ЭГД–течения и электрического числа Рейнольдса. В режиме развитого течения, как правило, выполняется условие $Re_{эл} > 10$. Поэтому влияние миграционной составляющей ослабевает и структура зоны ускорения несколько иная. Видно (рис.2.31, рис.2.32), что зона ускорения развитого течения более протяженная, ускорения вдоль оси симметрии течения коллинеарны линиям тока, незначительная расходимость появляется дальше по ходу течения на уровне

0,1÷0,2, составляющая ускорений в направлении течения существенно выше, чем в режиме неразвитого течения. При переходе к жидкостям с малым уровнем низковольтной проводимости, раздвоение максимума ускорений вообще исчезает, в зоне ускорения наблюдается один выраженный максимум, лежащий на уровне 0,05÷0,1.

Характерной особенностью линий равного уровня скорости ЭГД–течений является их овальная форма близкая к эллипсоидальной, причем главная ось эллипсов равного уровня совпадает с осью симметрии течения, а эксцентриситет, как правило, лежит на уровне центров завихрений. Следует заметить, что в области эксцентриситета происходит изменение направления действующих сил на противоположное направлению течения, и начинается зона торможения. Зона торможения неразвитого ЭГД–течения лежит внутри межэлектродного промежутка и не примыкает к поверхности плоского электрода. Уровень тормозящих сил значительно ниже уровня ускоряющих.

При переходе к режиму развитого течения картина изменяется. Линии равного уровня сил в зоне торможения приобретает правильную форму, напоминающую равнобедренные треугольники, с основанием параллельным поверхности плоского электрода и примыкающим к нему, и вершинами, лежащими на оси симметрии течения. Максимальный уровень тормозящих сил примерно соответствует уровню ускоряющих. Это хорошо видно из распределений скорости (рис.2.32) и сил (рис.3.33).

Рассмотрим механизм трансформации энергии в развитом ЭГД–течении. Понятно, что в зоне ускорения наблюдается преобразование электрической энергии в кинетическую энергию жидкости. Как видно, в достаточно короткой зоне ускорения, лежащей непосредственно за приэлектродным слоем, электрическая энергия интенсивно переходит в кинетическую. В центральной части межэлектродного промежутка профиль плотности кинетической энергии меняется не очень существенно, а в зоне торможения, занимающей половину межэлектродного промежутка и примыкающей к поверхности противоиэлектрода, идет интенсивный и очень существенный спад плотности кинетической энергии. Поскольку движущими силами ЭГД–течения являются кулоновские силы $f = \rho E$, а направление электрического поля в пределах центральной струи не может измениться на обратное, то торможение жидкости может происходить в результате действия, например, вязких сил. Однако возможен и еще один механизм трансформации энергии. Если учесть инъекцию заряда от плоского электрода, попадающего в боковые струи течения, как это показано на рис.2.34.

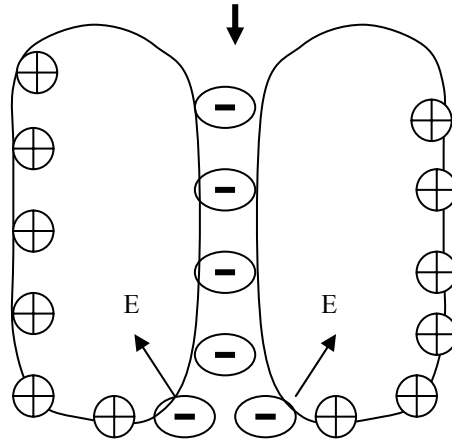


Рисунок 2.34. Зарядовая структура ЭГД-течения.

Здесь для определенности активный электрод отрицателен, плоский положителен. В режиме установившегося течения появится зона отрицательного заряда у поверхности плоского электрода и зона положительного заряда в возвратных частях ЭГД-течения. В подобной зарядовой структуре локальное электрическое поле в нижней части может иметь компоненту, противоположную направлению течения, как это показано стрелками на рис.2.34. Эта составляющая является следствием перезарядки жидкости у поверхности плоского электрода, и приводит к ускорению жидкости в боковых струях.

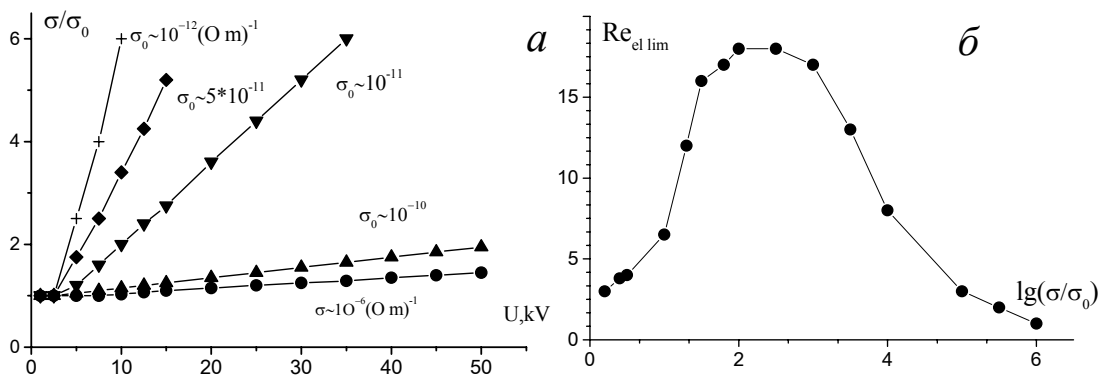


Рисунок 2.35. Вольтамперные характеристики жидкостей различной проводимости в приведенном виде (а), $\sigma_0 = 10^{-12}$ Сим/м, зависимость $Re_{el\ lim}$ от проводимости жидкости (б) в трансформаторном масле с бутанолом.

На рис.2.35 представлены обобщенные данные по группе исследований влияния низковольтной проводимости жидкости на свойства ЭГД-течений. Исследования проводились в растворах бутанола в трансформаторном масле. На рис.2.35, а, представлены вольтамперные характеристики в приведенном виде, на рис.2.36, б – зависимости предельного электрического числа Рейнольдса от низковольтной проводимости жидкости. Видно, что последняя зависимость имеет экстремальный характер, максимум соответствует

низковольтной проводимости 10^{-10} Сим/м. В зависимостях проводимости от напряжения тенденция иная – отклонения от закона Ома тем больше, чем меньше низковольтная проводимость среды.

На рис.2.36 представлены карты линий скорости (вверху) и сил (внизу) в жидкостях с разным уровнем низковольтной проводимости: «высоким» – 10^{-9} Сим/см и «низким» – 10^{-13} Сим/см, система электродов «лезвие–плоскость», напряжение 10 кВ, оба течения носят развитый характер. На картах линий уровня скорости стрелками показано векторное поле сил.

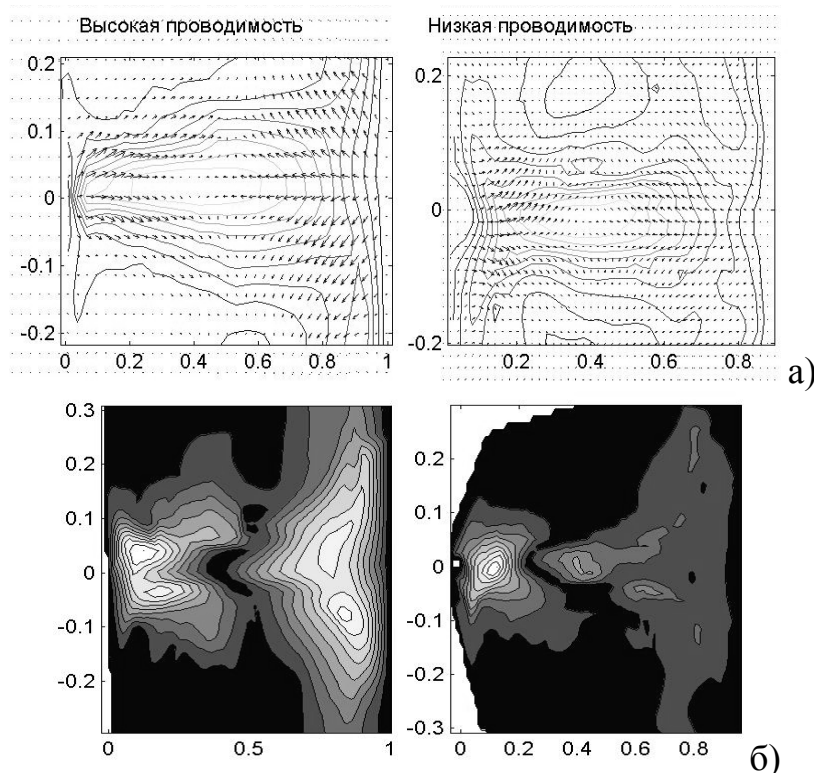


Рисунок 2.36. Карты линий уровня скорости (а) в жидкостях с высоким и низким уровнем низковольтной проводимости, стрелками показаны векторные поля сил. Карты линий уровня сил (б).

ЭГД-течения в жидкостях различной проводимости внешне очень похожи, однако зонная структура имеет некоторые различия. Как видно (рис.2.36), ЭГД-течения в «проводящей» жидкости имеют более узкую центральную струю, линии равного уровня скорости имеют более вытянутый в направлении течения характер, а у поверхности плоского электрода они сильнее сгущены, чем у течения с «низким» уровнем проводимости. Более отчетливо эти различия видны на картах линий уровня сил (рис.2.36, б). Течение в более проводящей жидкости обладает характерной структурой: расходящиеся вытянутые по направлению течения языки треугольной формы. Она, по-видимому, определяется растеканием объемного заряда в процессе его продвижения через межэлектродный промежуток вследствие малых времен релаксации. Для более проводящей жидкости время релаксации заряда $t = \varepsilon/\sigma$

равно 10^{-2} с, а для менее проводящей 10^2 с.

При средней скорости движения 10 см/с время пересечения струей межэлектродного промежутка составляет 0,1 с, то есть заряд, попавший в струю с поверхности иглы, под действием собственного поля растекается в объеме жидкости. Этим объясняются раздвоение горба ускорения у поверхности лезвия и характерная форма зон ускорения в «проводящих» жидкостях. Существенные различия наблюдаются в структуре зоны торможения: в более проводящей жидкости зона торможения находится ближе к поверхности плоского электрода и имеет вид, напоминающий форму равностороннего треугольника. Зона торможения в жидкости с «низким» уровнем проводимости расплывчата и имеет значительно более низкий уровень тормозящих сил. В этом случае колебательный характер ЭГД–течения выражен слабее.

Следующая группа исследований проводилась для выявления различий кинематики и динамики ЭГД–течений в сильно- и слабонеоднородных электрических полях. Как уже отмечалось, некоторые исследователи пытаются разделить ЭГД–течения на два класса, обособив течения в сильнонеоднородных полях от течений в слабонеоднородных полях. Так, например, в серии работ [14–18] механизм ионообразования в сильнонеоднородных полях трактуется с позиций существенной роли добавочной диссоциации молекул в областях локализации поля, а в работах [1,2,12] ионообразование связывается с локальным джоулевым нагревом приэлектродных слоев жидкости. В свете этих работ в слабо- и сильнонеоднородном полях должны проявляться различные механизмы электризации жидкости. Структура объемного заряда в центральной струе ЭГД–течения, а, следовательно, и динамика течения в тех или иных условиях обусловлены вполне конкретным механизмом электризации, определяющим кинематику течения. Следовательно исследуя кинематическую структуру ЭГД–течения в слабо- и сильнонеоднородных полях, можно выявить различия, присущие тому или иному механизму электризации среды.

Все исследования были проведены для системы электродов цилиндр над пластиной размерами $4,5 \times 1$ см². Использовались медные цилиндрические провода диаметром 0,05; 0,5; 1; 3 и 4 мм, латунный цилиндрический стержень диаметром 20 мм, платиновая нить диаметром $3 \cdot 10^{-3}$ мм и режущая часть лезвия бритвы (сталь) толщиной 0,08 мм. Широкий набор электродов позволил изменять приэлектродную напряженность электрического поля и плотность тока проводимости в пределах трех–четырех порядков. Например, при напряжении 10 кВ напряженность электрического поля у поверхности цилиндрического электрода, рассчитанная в электростатическом приближении [13], с изменением его диаметра от 2 см до $3 \cdot 10^{-4}$ см изменялась от $1,7 \cdot 10^4$ до 10^7 В/см; у поверхности цилиндра диаметром 2 см она всего лишь в 2,5 раза больше, чем в системе плоскопараллельных электродов. Таким образом, охватываются ЭГД–течения в диапазоне от сильнонеоднородных полей до

близких к однородному. В качестве цилиндрического электрода использовались поочередно все перечисленные электроды, продольная ось цилиндров устанавливалась параллельно нижнему электроду. Во всех экспериментах этой серии верхний электрод отрицателен, межэлектродное расстояние составляло 1,5 см, использовался раствор йода в трансформаторном масле с концентрацией йода 10^{-4} г/см³.

На рис.2.37 представлены фотографии ЭГД–течений от электродов разных размеров. Видно, что течения качественно похожи, размеры центральной струи практически не зависят от размеров активного электрода. Полутеневая визуализация при слабом охлаждении поверхности одного из электродов показывает, что непосредственно от поверхности электрода вдоль срединного слоя центральной струи развивается тонкая струйка охлажденной жидкости. Поперечные размеры этой струйки значительно меньше поперечных размеров ЭГД–потока. Заряд струйки у поверхности электрода соответствует его заряду. За время пересечения струйкой межэлектродного промежутка (t_0) поперечное растекание заряда под влиянием поперечной составляющей E_y электрического поля не превышает $bE_y t_0 = l_y$ ($b \cdot E_y t_0 < \nu \cdot E$). Следовательно, $l_y/l_0 \leq (Re_{эл})^{-1}$. Электрическое число Рейнольдса в режиме развитого ЭГД–течения обычно не меньше 10. Таким образом, уширение заряженной струйки за время пересечения межэлектродного промежутка незначительно. Поэтому можно считать, что визуализированная полутеневым методом сердцевина струйки охлажденной жидкости является одновременно областью, заряженной одноименно с охлажденным электродом. Если используются электроды большего диаметра, то размеры этой струйки много меньше диаметра активного электрода.

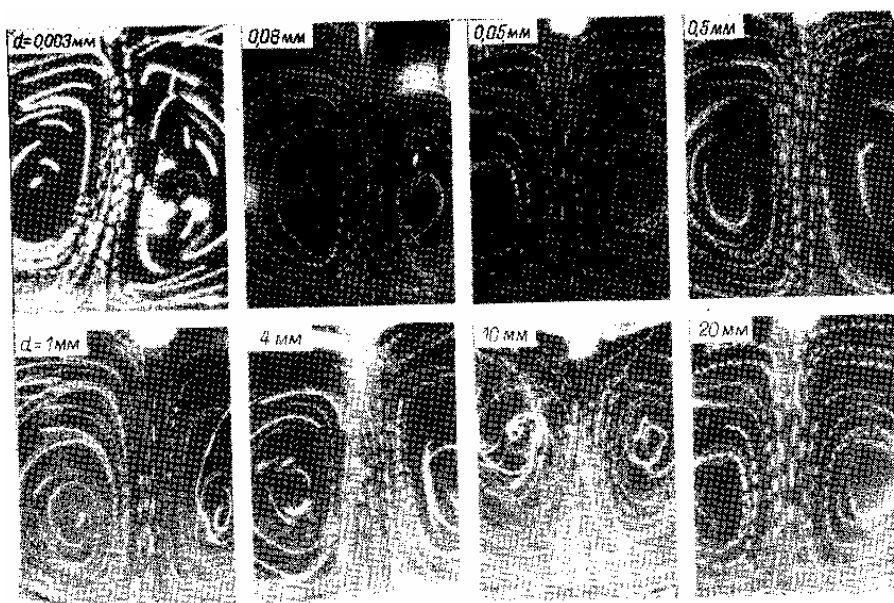


Рисунок 2.37. ЭГД–течений от электродов разных размеров.

На рис.2.38 представлены карты линий уровня скорости для течения в

слабо и сильно неоднородных полях, диаметр цилиндрического электрода 20 и 0,5 мм, низковольтная проводимость жидкости 10^{-13} Сим/см, напряжение – 10 кВ, ЭГД–течения носят развитый характер. На картах линий уровня скорости стрелками нанесены векторные поля сил. Видно (рис.2.38), что ЭГД–течения в слабо и сильно неоднородном полях похожи. Однако структура линий уровня скорости в слабо неоднородном поле существенно асимметрична относительно середины межэлектродного промежутка, в сторону более протяженной зоны торможения жидкости. Это особенно отчетливо наблюдается на векторных полях ускорения: зона ускорения в слабо неоднородном поле несимметрична и выражена менее четко, чем в сильно неоднородном. Зона торможения в слабо неоднородном поле также несимметрична относительно центральной оси течения и более размыта, чем в сильно неоднородном.

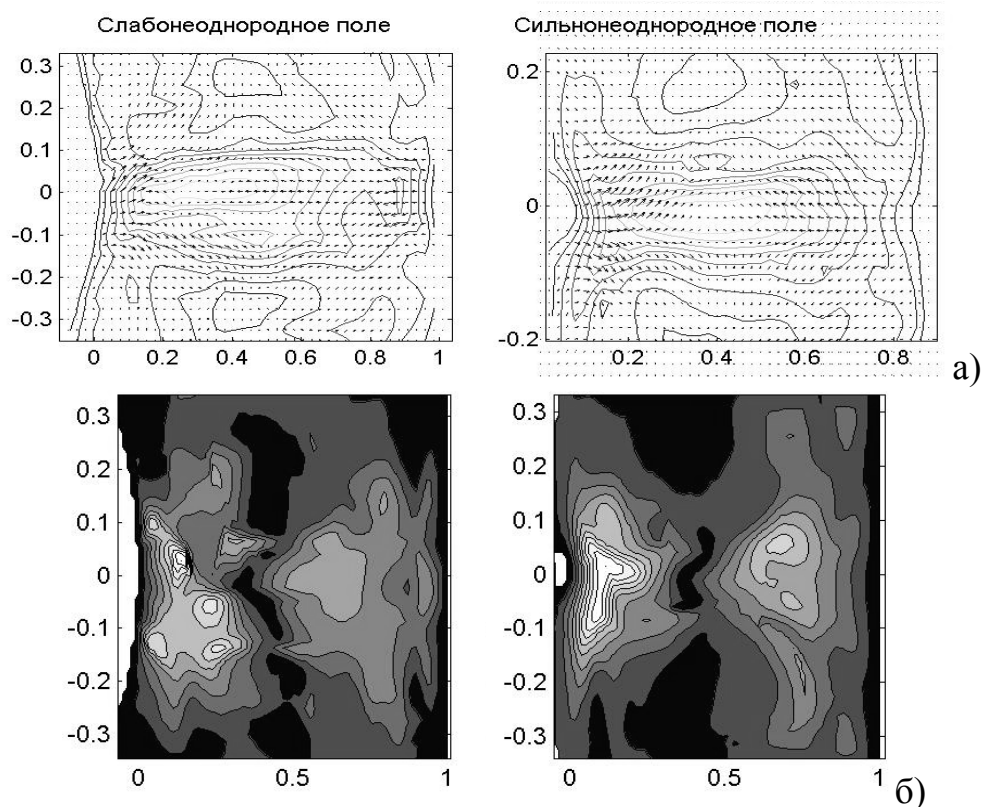


Рисунок 2.38. Карты линий уровня скорости (а) ЭГД-течений в слабо неоднородном и сильно неоднородном электрическом поле, стрелками показаны векторные поля сил. Карты линий уровня ускорений (б).

На рис.2.39 представлены в безразмерном виде вольтамперные зависимости при разных диаметрах активного электрода. Видно, что зависимости (рис.2.39) сохраняют типичный характер при изменении размеров активного электрода в пределах четырех порядков величины. Следует отметить также, что все особенности режимов неразвитого и развитого ЭГД–течений также имеют место, различия касаются лишь величин предельного

электрического числа Рейнольдса Re_{np} и коэффициента высоковольтной проводимости K . На рис.2.40 представлены зависимости предельного электрического числа Рейнольдса Re_{np} от напряжения, а также коэффициента K от относительного радиуса активного электрода.

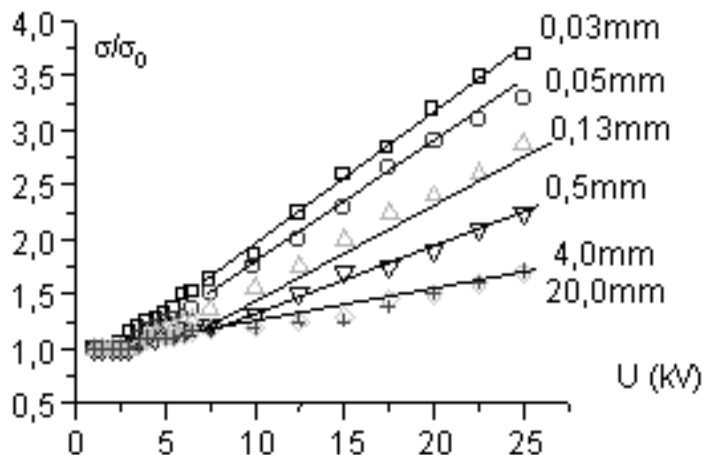


Рисунок 2.39. Вольтамперные зависимости при разных диаметрах активного электрода

Экспериментальные точки близки к линейным зависимостям $K \sim \ln(l_0/r)$, а $Re_{np} \sim \ln(l_0/r)$. Известно, что для системы цилиндр над плоскостью распределение потенциала описывается функцией $\varphi = \varphi_0 \cdot \ln(l_0/r)$, r – расстояние от оси цилиндра.

Таким образом, скорость ЭГД–течения пропорциональна потенциалу приэлектродных слоев жидкости, а не средней напряженности поля.

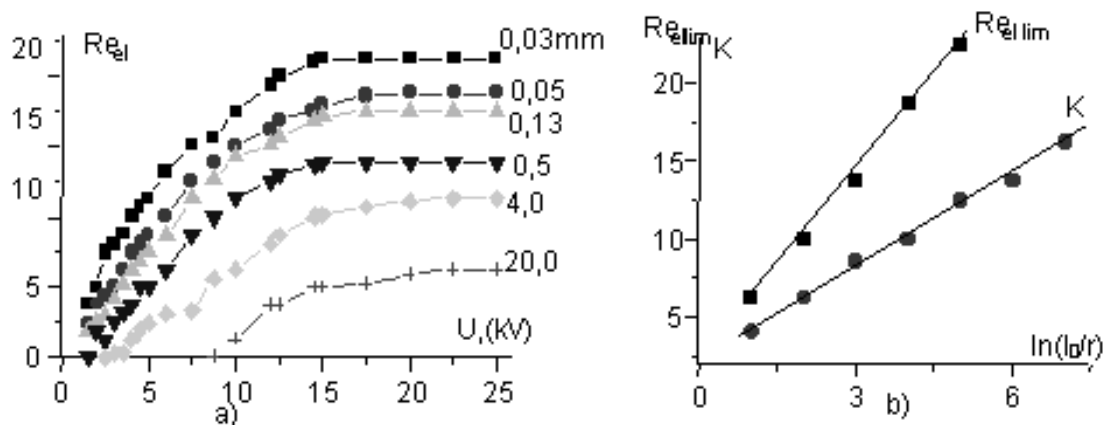


Рисунок 2.40. Зависимости предельного электрического числа Рейнольдса Re_{np} от напряжения и коэффициента высоковольтной проводимости K от относительного радиуса активного электрода.

Поскольку эксперименты данной серии были проведены в жидкостях с одинаковыми электрофизическими параметрами, то величина радиуса Дебая во всех экспериментах неизменна и составляет 10^{-4} см. Так как величина

приэлектродной напряженности поля $E_{эл}$ определяется, с одной стороны, размерами этой области, которые соответствуют радиусу Дебая (δ), а с другой – потенциалу области, то

$$E_{эл} \sim \varphi_{эл} / \delta \sim U \ln(l_0/r) / \delta$$

Скорость приэлектродного зарядообразования определяется величиной приэлектродной напряженности поля $E_{эл}$ и, в свою очередь, влияет на скорость ЭГД–течения. Поэтому полученные зависимости отражают особенности ионизационно-рекомбинационного механизма зарядообразования.

В то же время полученные экспериментальные результаты не поддаются непротиворечивой интерпретации с позиций объемно–диссоциативного механизма электризации жидкости. Действительно, как показано в работе [15], движущая кулоновская сила для системы коаксиальных цилиндров с радиусами R_1 и R_2 равна:

$$F_k = \frac{e^{3/2} U^{5/2} \epsilon_0^{1/2}}{8 \pi r^{7/2} k T [\ln(R_2/R_1)]^{5/2}}$$

Из этого выражения видно, что сила F_k обратно пропорциональна расстоянию от активного электрода (r) в степени $7/2$, т.е. сосредоточена в узкой приэлектродной области. Кроме того, движущая сила существенно зависит от радиуса активного электрода (R_1), и при его изменении на четыре порядка она изменяется на поверхности электрода более чем на четырнадцать порядков. Вместе с тем результаты исследований свидетельствуют, что движущая сила, очень слабо зависит диаметра активного электрода. Так, например, из рис.2.40, б следует, что скорость ЭГД–течения и движущая сила изменяются всего лишь в два-три раза при изменении R_1 на четыре порядка.

Распределение электрического поля в электростатическом приближении в системе электродов провод над плоскостью в приэлектродной зоне обратно пропорционально радиусу электрода. Это приводит к появлению различных моделей электрического ветра в слабо- и сильнонеоднородных электрических полях [12,14]. Действительно, поскольку электрическая сила $f = \rho E$, то при малой величине объемного заряда сила пропорциональна локальной напряженности электрического поля и растет с уменьшением радиуса активного электрода.

Однако в режиме развитого ЭГД–течения влияние объемного заряда столь существенно, что приводит к снижению напряженности поля в приэлектродной области, и поэтому максимум сил лежит в объеме жидкости. Объемный заряд кардинально изменяет электрическое поле электродов. Поэтому электрическое поле электродов ощутимо лишь у поверхности электрода. Это видно на рис.2.41, на котором представлены крупным планом

линии уровня скорости и векторное поле сил в зонах ускорения ЭГД–течений от электродов диаметром 20, 0.5 и 0.007 мм.

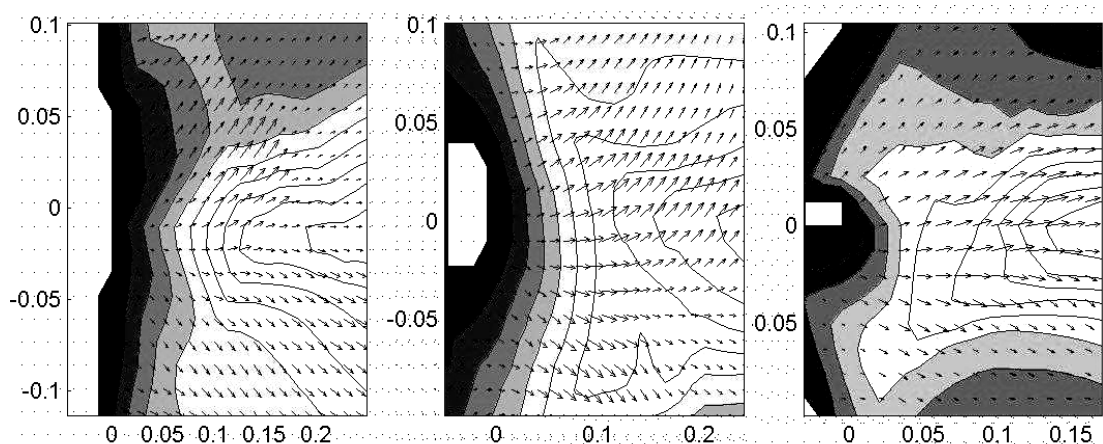


Рисунок 2.41. Карты линий уровня скорости и векторные поля сил в приэлектродных областях. Диаметры электродов 20, 0,5 и 0,07 мм, соответственно.

Основные различия касаются направленности вектора сил в приэлектродных областях. Видно, что в сильно неоднородных полях от электродов малого диаметра силы практически коллинеарны центральной оси течения. По мере увеличения диаметра активного электрода расходимость векторов в приэлектродных областях возрастает, а их проекция на направление течения уменьшается.

Анализ представленного материала показывает, что, во-первых, кинематическая, а следовательно, и динамическая структура центральной струи ЭГД–течения сохраняются при изменении размеров активного электрода в широких пределах, во-вторых, сохраняется поведение интегральных характеристик течения. Это значит, что механизм зарядообразования в специальных жидкостях не зависит от размеров активного электрода, и, следовательно, нет оснований разделять явления "электрического ветра" и изотермической ЭГД–конвекции, приписывая им различную природу. Структурные и интегральные характеристики ЭГД–течений, возникающих от электродов разного диаметра, отражают особенности ионизационно-рекомбинационного механизма зарядообразования.

Сопоставим возможности ионизационно-рекомбинационного и объемно-диссоциативного механизмов зарядообразования. Скорость образования объемного заряда в приэлектродных процессах определяется напряженностью поля у поверхности электрода. Напряженность поля внутри двойных приэлектродных слоев может достигать весьма высоких значений.

Хорошо известно [22] также, что энергия, необходимая для диссоциации молекул, т.е. для образования пары ионов, весьма высока и, как правило,

намного превышает энергию ионизации молекулы с отрывом электрона. Известно также, что некоторые молекулы обладают сродством к электрону, т.е. присоединяют его с выделением энергии. Так, например, для диссоциации молекулы кислорода необходимо 30,9 эВ, в то время как для ее ионизации в положительный ион – всего 12,5 эВ. Присоединение же электрона к молекуле кислорода происходит с выделением 1,46 эВ. Таким образом, диссоциации молекул самой жидкости является процессом энергоёмким, и даже при использовании острийковых и тонких проволочных электродов в объеме жидкости не возникает условий для её осуществления, так как дрейфовая скорость ионов в полях 10^4 – 10^5 В/см много меньше скорости теплового движения молекул.

В то же время поверхностная ионизация молекул, особенно обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами, является процессом энергетически более выгодным. Как показывают эксперименты, в приэлектродных областях могут быть реализованы условия, необходимые для протекания поверхностной ионизации, так как приэлектродная напряженность поля может достигать 10^8 В/см. Эти условия особенно благоприятны, когда в жидкость введены примеси, в нашем случае йод, обладающие повышенными электронно-акцепторными свойствами (энергия сродства к электрону у молекулы J_2 равна 3,2 эВ) и облегчающие ход реакции ионообразования у катода.

Таким образом, анализ зонной структуры ЭГД–течения в различных условиях показывает, что ион, получивший электрический заряд на поверхности электрода, в пределах неподвижной зоны движется относительно жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую молекулярную структуру, обеспечивающую в дальнейшем повышенную степень его взаимодействия с молекулярным окружением. Далее ион разгоняет жидкость в пределах зоны ускорения. Величина средней электрогидродинамической подвижности $Re_{эл}$, определяемая как отношение средней скорости жидкости v к средней скорости движения ионов относительно жидкости $b \cdot E$, в центральной струе ЭГД–течения составляет 10^{-20} , т.е. вне зоны ускорения ионы практически «вморожены» в жидкость [13, 26]. "Присоединенную массу" отдельного иона можно оценить, приравняв в зоне ускорения силы инерции электрическим силам: $\rho E \sim \gamma \partial v / \partial t$, здесь ρ , E , γ , v – соответственно, объемный заряд, напряженность электрического поля, плотность жидкости и скорость ЭГД–течения. Отношение $\rho/\gamma \sim E^{-1} \partial v / \partial t$ можно оценить, используя данные рисунков (рис.2.38), среднее ускорение в пределах зоны разгона лежит в диапазоне $1 \div 10$ м/с², средняя напряженность электрического поля 10^6 В/м, плотность жидкости 800 кг/м³. Отношение ρ/γ в центральной струе течения равно 10^{-5} Кл/кг, что соответствует присоединенной массе в $(0,2 \div 2) \cdot 10^{-14}$ г в расчете на однозарядный ион. Масса молекул углеводородных масел лежит в пределах $(3 \div 5) \cdot 10^{-25}$ кг. Следовательно,

в зоне ускорения каждый ион достаточно жестко связан с дальним сольватным окружением, содержащим $(0,5 \div 5) \cdot 10^{10}$ молекул жидкости. Повышенное ион-молекулярное взаимодействие приводит к весьма высокому коэффициенту преобразования электрической энергии в кинетическую.

Рассмотрим некоторые интегральные характеристики ЭГД-течений: зависимости средней скорости течения и тока через жидкость от напряжения на электродах. В [13,26] представлены результаты их изучения в жидкостях различной низковольтной проводимости. Экспериментальные данные в режиме развитого ЭГД-течения достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью скорости от приложенного напряжения: $v = k \cdot U$ ($Re_{эл} = v/b \cdot E = \text{const}$), соответствующие участки вольтамперных зависимостей имеют параболический характер: $I = k \cdot U^2$. Плотность электрического тока равна сумме миграционной и конвективной компонент: $j \cong \rho(v + bE)$. Поскольку в режиме развитого ЭГД-течения отношение v/bE для жидкостей промежуточного диапазона проводимостей не менее 10, полная плотность тока определяется конвективной составляющей тока $j \cong \rho v$. Принимая во внимание квадратичный характер вольтамперной характеристики можно сделать вывод, что $\rho \sim E \sim U/2$. Учитывая предшествующие соображения о жестком ион-молекулярном взаимодействии и, следовательно, малых джоулевых потерях, можно приравнять среднюю плотность электрической и кинетической энергий в центральной струе ЭГД-течения на уровне центра межэлектродного расстояния: $e \cdot E^2 \sim \gamma^2/2$, откуда $v \sim 2E (e/\gamma)^{0,5}$. Тогда, считая, что напряженность поля в рассматриваемой части центральной струи пропорциональна ее среднему значению $E \sim U/2$, получим $v \sim U$, наблюдающееся в экспериментах. Известно, что ток рекомбинации пропорционален $a \cdot r_i^2$, где a – коэффициент рекомбинации, r_i^2 – квадрат плотности объемного заряда. Если считать, что на электродах скорость введения заряда $r_i \sim U$, U – напряжение на электродах, то квадратичный характер вольтамперной характеристики становится понятным. В этом случае конвективная составляющая тока $rv \sim U^2$, а $v \sim U$, что и наблюдается в экспериментах. Таким образом, квадратичный участок вольтамперной характеристики можно объяснить, с позиций определяющей роли рекомбинации, а не конвективного вклада.

В заключении можно выделить некоторые основные положения:

1. Анализ кинематической структуры ЭГД-течений в сильно и слабо неоднородных полях показывает, что они имеют единую природу – приэлектродные реакции (инжекция) на обоих электродах.
2. Конкретизированы особенности режима неразвитого и развитого ЭГД-течений. В режиме развитого течения плотность инжектируемого заряда пропорциональна напряжению на электродах, а высокое ион-молекулярное взаимодействие в центральной струе течения появляется, по-видимому, за счет формирования надмолекулярных структур.

3. Механизм высоковольтной проводимости жидких диэлектриков определяется, по-видимому, замедленной стадией процесса прохождения тока - рекомбинацией ионов в объеме.

Исследование особенностей ЭГД-течений в системе электродов игла–плоскость [14, 35,39]

В данной части приводятся результаты исследования особенностей ЭГД–течений в системе электродов игла-плоскость. В отличие от системы провод над плоскостью, в системе игла (шар) над плоскость возможны более высокие значения напряженности поля, плотности объемного заряда, а, следовательно, и плотности электрических сил.

Исследуемая модель является осесимметричной. Она представляет собой цилиндрическую кювету, в которую помещены активный (игла) и пассивный (плоскость) электроды (рис.2.42). Экспериментальная модель обладает следующими размерами: диаметр основания иглы 0,2 мм, радиус закругления кончика 0,1 мм, межэлектродное расстояние 7 мм, но может изменяться в пределах 5÷15 мм, диаметр кюветы 40 мм и высота 30 мм.



Рисунок 2.42 Фотография экспериментальной установки.

Экспериментальные данные

Характеристики ЭГД–течений зависят от свойств используемой диэлектрической жидкости. Токопрохождение в слабопроводящих жидкостях определяется, в основном, примесными ионами, причём состав смеси, в силу её слабой концентрации, часто остаётся неизвестным. При использовании чистого трансформаторного масла из-за малого количества примесных ионов процесс инъекции заряда нестабилен во времени, и возникающие ЭГД–течения носят нестабильный характер: наблюдается спонтанное изменение направления течений при постоянном напряжении. Регистрации и обработка таких течений затруднительна. Для повышения стабильности и интенсивности течений и

получения результатов, отличающихся высокой повторяемостью, применяются примеси с повышенными электронно-акцепторными свойствами. В частности, в качестве примеси можно использовать бутиловый спирт или йод. При изменении пропорции смеси проводимость жидкости может меняться на несколько порядков, в то время как относительная диэлектрическая проницаемость остаётся практически постоянной. Другим способом повышения стабильности ЭГД-течений является выбор оптимального материала электрода. При прочих равных условиях изменение материала активного электрода может привести к изменению средней плотности избыточного заряда более чем на порядок.

Исследования проводились в 15 %-м растворе бутилового спирта в трансформаторном масле, что позволило получить стабильные и интенсивные ЭГД-течения. Активный электрод сделан из стали, пассивный – из латуни.

Механические свойства смеси, в отличие от электрической проводимости, изменились несущественно по сравнению со свойствами чистого трансформаторного масла. Механическая плотность бутанола и трансформаторного масла примерно равны соответственно: $\rho_{\text{б}} = 810 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{тм}} = 850 \text{ кг/м}^3$, следовательно, при 15 %-й концентрации бутилового спирта изменение плотности составляет не более 1 %. Динамическая вязкость η составляла величину $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

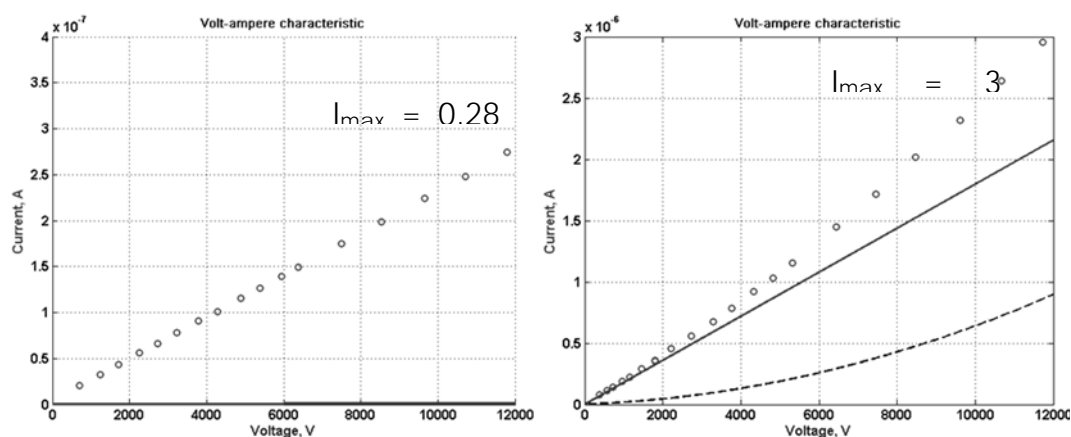


Рисунок 2.43. Вольтамперные характеристики чистого трансформаторного масла (а) и смеси трансформаторного масла с бутанолом (б): “о” – экспериментальные значения; сплошная линия – ток проводимости, рассчитанный в ANSYS, пунктир – разность экспериментальных значений и расчёта.

Для смеси трансформаторного масла и бутилового спирта с низковольтной проводимостью $\sigma \approx 1,1 \cdot 10^{-10} (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ и для чистого трансформаторного масла ($\sigma = (5,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-14} (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$) были получены вольтамперные характеристики ЭГД-течений для напряжений от 1 до 12 кВ. По значениям низковольтной проводимости были отдельно рассчитаны

вольтамперные характеристики, обусловленные исключительно током проводимости. Расчёт производился при помощи пакета ANSYS, использовалась та же геометрия, что и в эксперименте. Результаты эксперимента и численного расчёта представлены на рис.2.43. На вольтамперной зависимости для смеси трансформаторного масла и бутанола построена разность двух зависимостей, экспериментальной и рассчитанной (рис.2.43, б).

В чистом трансформаторном масле ток, обусловленный низковольтной проводимостью (рис.2.43, а), фактически не влияет на значение полного тока. В то же время, для смеси трансформаторного масла и бутилового спирта ток проводимости даёт наибольший вклад в полное значение тока. Разность между экспериментальным значением тока и обусловленным низковольтной проводимостью, вероятно, следует отнести к конвективной составляющей тока. Конвективный ток в чистом трансформаторном масле при напряжении 5 кВ имеет значение 0,12 мкА, а в рабочей смеси – 0,18 мкА.

Видеосъемка ЭГД-течений проводилась при значениях напряжений ± 4 , ± 5 , ± 6 кВ и при частоте импульсной подсветки 150 Гц. Полученный видеоряд раскладывался в серию изображений, которые обрабатывались при помощи оригинальной программы по обработке ЭГД-течений *EHD reader*, разработанной с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета СПбГУ [18]. Программа включает в себя два модуля, один из которых обеспечивает загрузку и преобразование графических файлов, ввод координат, с элементами прогнозирования и автоматического поиска, а также удаление неверно введённых точек (искаженных траекторий), и второй – аппроксимацию введённых данных, построение полей по отдельным точкам, графическое представление информации на экране. Фотография трека и общий вид программы *EHD reader* представлены на рис.2.44.

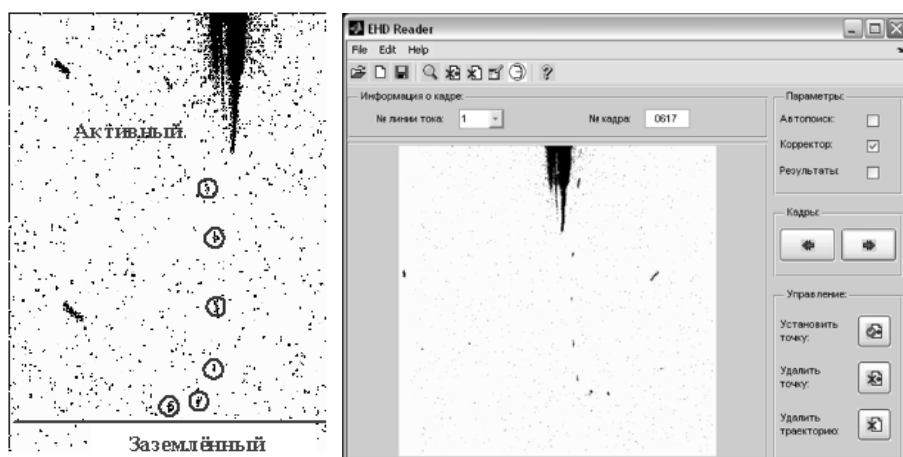


Рисунок 2.44 Фотография трека (слева) и общий вид программы *EHD reader* (справа), частота подсветки 150 Гц.

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты.

На рис.2.45 представлены обработанные линии тока жидкости (а), векторный график профиля скоростей (б), карта линий уровня модуля скорости течения жидкости (в) и поверхностный (трехмерный) график модуля скорости (г). Как видно, количество обработанных линий тока данных достаточно велико (более 50), а заполнение межэлектродного промежутка достаточно однородно.

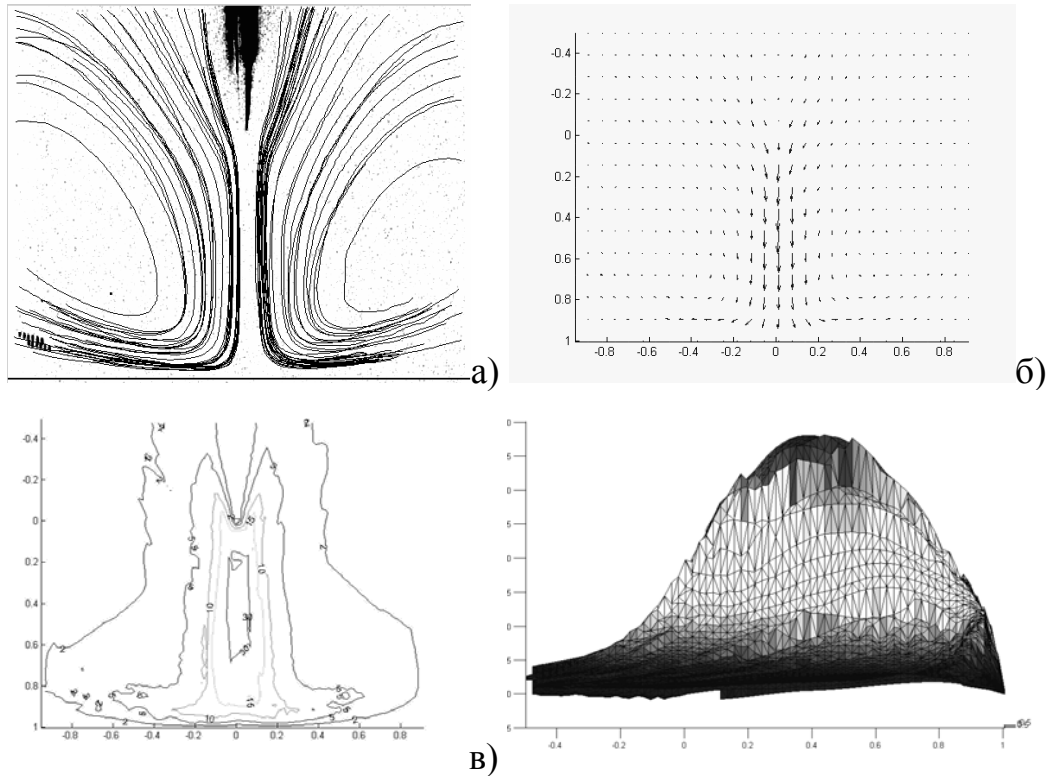


Рисунок 2.45. Обработанные линии тока жидкости (а), векторный график профиля скоростей (б), карта линий уровня модуля скорости течения жидкости (в) и поверхностный (трехмерный) график модуля скорости (г).

Общая структура ЭГД–течений хорошо видна на контурном и векторном графиках. В непосредственной близости к электродам имеется область очень малых скоростей. Основное течение сосредоточено в сравнительно узкой области между электродами. В этой зоне векторы скорости направлены вдоль оси симметрии, и их величина меняется незначительно. В остальной части установки скорости в десятки раз меньше, чем в центральной струе. Разгон жидкости начинается на некотором расстоянии выше кончика иглы и возле активного электрода образуется воронкообразная область. На рис.2.46 представлены траектории и векторы скорости вдоль них. Для каждого значения напряжения производилась обработка не менее 50 треков.

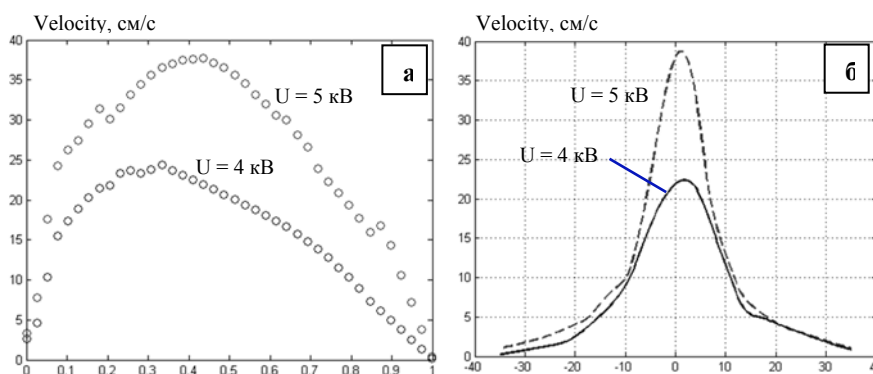


Рисунок 2.46. Осевые графики скорости для значений напряжения + 4 и + 5 кВ (а) и профили скорости через середину межэлектродного промежутка (б).

Видно, что общие черты ЭГД–течения, описанные ранее для двумерного случая течений, сохраняются. Течение реализуется в виде однородной струйки, направленной от иглы к плоскости. Течение в струйке имеет параллельноструйный ламинарный характер (рис.2.45), имеется короткая зона ускорения, лежащая у острия иглы, профили скорости на протяжении большей части струи достаточно узкие (рис.2.46).

На рис.2.46, а, представлены осевые графики скорости (y -компоненты) для двух значений напряжений: $U = +4$ кВ и $+5$ кВ. Графики построены вдоль пути, который параллелен оси симметрии и отстоит от неё на расстояние радиуса электрода, такой выбор пути обусловлен отсутствием экспериментальных данных непосредственно на оси симметрии модели.

Характерные значения скорости для этих случаев равны 35 и 20 см/с, соответственно. При изменении напряжения на один киловольт средняя скорость увеличивается почти в два раза. Сразу за максимальными значениями, расположенными на расстоянии 0,3 и 0,4 от величины межэлектродного промежутка, наблюдается плавный спад скорости, в отличие от системы электродов провод-плоскость в данном случае отсутствует зона равномерного движения. В конце межэлектродного промежутка торможение жидкости усиливается, что можно связать с наличием области повышенного давления у противоэлектрода.

На рис.2.47, а, представлены профили скорости на разных уровнях: 0,2, 0,5 и 0,8 от длины межэлектродного промежутка, вдоль центральной струйки ЭГД–течения, для напряжения $U = +5$ кВ. Произведено сравнение профилей скорости для разных сечений (рис.2.47, а) и определена точка перегиба полученного распределения скорости (рис.2.47, б). Видно, что первые профили близко соответствуют друг другу, а у противоэлектрода струя расширяется и замедляется. На рис.2.47, б, представлена зависимость производной продольной скорости по поперечной координате. Излом поперечной производной является характерным признаком перехода от силового течения внутри струи к вязкому снаружи. В электрогидродинамике силовая часть течения совпадает с областью локализации объемного заряда.

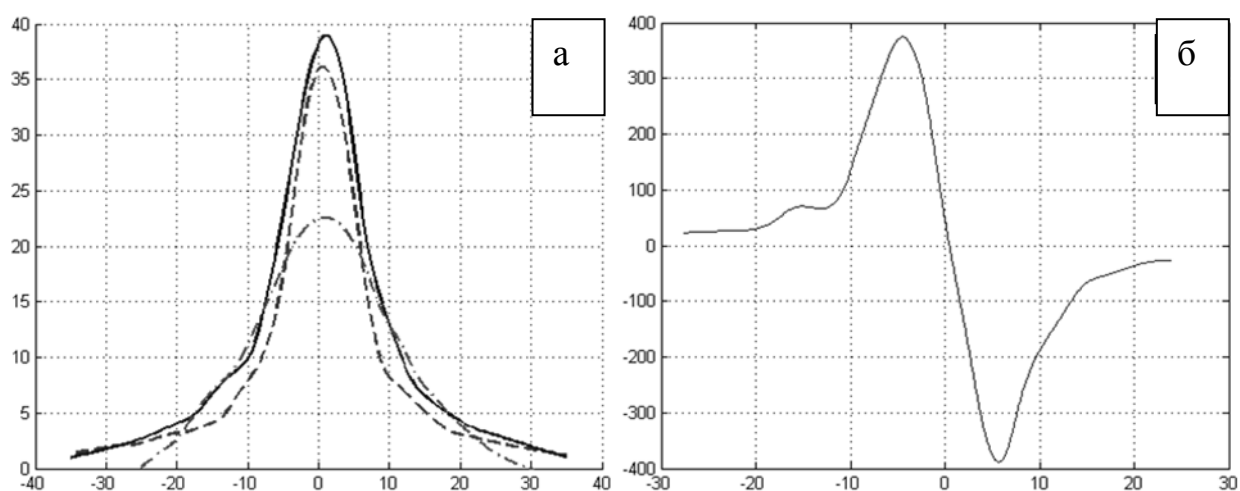


Рисунок 2.47. Сравнение профилей скорости для разных сечений при $U = +5$ кВ (а); поперечная производная скорости (б).

В данном случае характерный радиус области, где действуют объёмные (кулоновские) силы составляет примерно 5 радиусов электрода-иглы. Причём, из вида графиков скорости (рис.2.46, а) следует, что размер заряженной области в первой половине межэлектродного промежутка меняется мало, в то время как у противозэлектрода наблюдается заметное расширение заряженной струйки.

Аналогичные результаты были получены при отрицательных напряжениях на активном электроде. Соответствующие графики имеют похожую структуру, и расхождение не превышает 5÷10 %.

Таким образом, анализ структуры ЭГД–течений в системе провод над плоскостью и игла над плоскостью показал, что основные черты течений – зонная структура, характерная для течений с объемной нагрузкой – сохраняется. Судя по анализу профиля скорости течения, ширина заряженной струйки составляет 4÷5 радиусов игольчатого электрода. Судя по величине скорости течения, в системе игла-плоскость плотность объемного заряда в центральной струе ЭГД–течения и плотность действующих объемных кулоновских сил значительно выше. Это станет ясно при анализе результатов компьютерного моделирования.

Анализ структуры ЭГД–течений в симметричной системе электродов

Как известно, в электростатике широко используется принцип зеркальных отражений. Так электрическое поле в симметричной системе электродов типа шар–шар, провод–провод можно определить согласно этому принципу, восстанавливая электрическое поле в симметричной системе электродов, как сумму электрического поля созданного несимметричными

электродами типа шар–плоскость, провод–плоскость и его зеркального отображения.

Согласно принципу зеркальных отражений можно предположить, что структура ЭГД–течений в симметричной системе электродов типа провод–провод, в случае малого влияния объемного электрического заряда, должна быть зеркально симметрична относительно структуры ЭГД–течений в несимметричной системе провод над плоскостью.

На рис.2.48 представлены векторные поля и карта линий уровня напряженности электрического поля в симметричной, провод–провод, системе электродов, вычисленные в электростатическом приближении. Плоскость А–А соответствует условной плоскости симметрии. Ось x направлена от катода к аноду (катод сверху), ось y – слева направо.

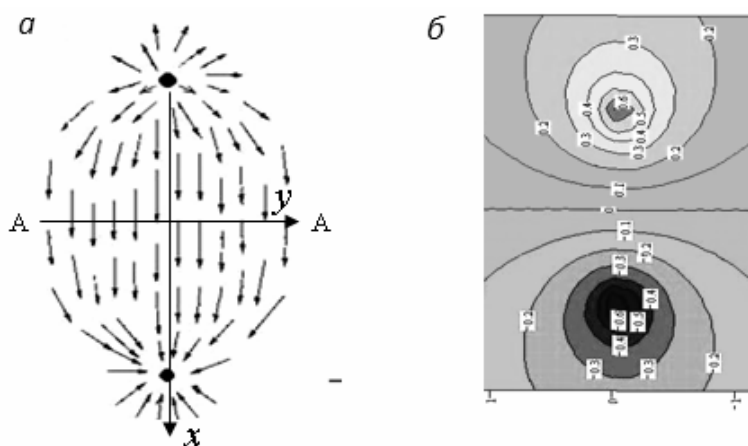


Рисунок 2.48. Силовые линии электрического поля (а), распределение потенциала (б) в симметричной системе.

Таким образом, для реализации режима симметричных встречных ЭГД–течений, подобных несимметричному течению в системе провод–провод необходимо реализовать равные условия зарядообразования на аноде и катоде.

В предыдущей главе была рассмотрена зонная структура ЭГД–течений в несимметричной системе электродов. Детально исследована структура зоны ускорения, центральной струи и зоны торможения.

Анализ структуры встречных симметричных ЭГД–течений особенно интересен тем, что в плоскости симметрии А–А отсутствует электрод и, следовательно, в отличие от несимметричного течения в системе электродов провод над плоскостью, в плоскости А–А реализуется исключительно рекомбинация противоположно заряженных ионов, приносимых встречными ЭГД–течениями от анода и катода. Это дает возможность исследовать зоны активной рекомбинации, оставшейся недостаточно изученной при анализе несимметричных ЭГД–течений.

Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровождающимся целым рядом превращений. Если жидкий

диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными ионами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому считают, что перенос заряда на границе электрод–жидкость осуществляется преимущественно на примесные молекулы. В [13] было предложено использовать в качестве примесей, обладающих электронно-акцепторными свойствами, бутанол и йод. Эти примеси при растворении в трансформаторном масле заметно влияют на скорость ионообразования на катоде.

В первой серии экспериментов электроды были выполнены из медных проводов одинакового диаметра 0,3 мм [13,27,31,33]. Исследовалось влияние примесей, обладающих электронно-донорными либо акцепторными свойствами, на кинематику течения. При одинаковых условиях ионообразования на поверхности анода и катода ЭГД–течение в системе двух взаимно параллельных проводов должно реализоваться в виде встречных потоков с одинаковой интенсивностью. Вводя в жидкость примеси, обладающие повышенным сродством к электрону (спирты, галогены), можно стимулировать ионообразование у поверхности катода и, следовательно, интенсифицировать течение от него на фоне встречного течения от анода. Если же в жидкость ввести примеси, обладающие пониженной энергией ионизации, например металлоорганические соединения, то можно интенсифицировать скорость ионообразования у поверхности анода и таким образом повысить скорость ЭГД–течения от его поверхности на фоне ЭГД–течения от поверхности катода. Итак, путем изменения контактных свойств границы электрод–жидкость, можно изменять структуру ЭГД–потоков.

Что касается неполярной хорошо очищенной жидкости, то в ней наиболее вероятным является новообразование в результате электрорастворения металла электрода. Как уже отмечалось, эта реакция идет на аноде с образованием у поверхности электрода положительных ионов. Поэтому в жидкостях с высокой степенью очистки следует ожидать возникновения ЭГД–течения от анода. Для проверки этих соображений была проведена серия наблюдений с использованием пузырьковой визуализации ЭГД–течений. В первой серии экспериментов электроды были выполнены из медных проводов диаметром 0,3 мм. Исследовалось влияние примесей, обладающих электронно-акцепторными свойствами (спирты, йод, лейцин и т.д.). Как и предполагалось, в хорошо очищенном трансформаторном масле в системе медных электродов одинакового диаметра 0,3 мм наблюдается сквозное течение от анода (рис.2.49, а).

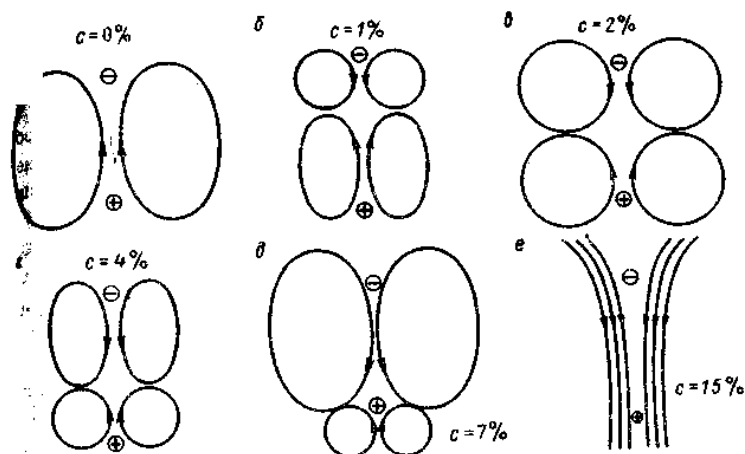


Рисунок 2.49. Структура ЭГД–течений в растворах бутанола в трансформаторном масле различных концентраций.

При введении примеси бутилового спирта, содержащей группу -ОН и обладающей повышенным сродством к электрону, преобладающим становится ионообразование на катоде по схеме $M + e \rightarrow M^-$. При малых концентрациях c бутилового спирта интенсивности ионообразования у анода и катода сравниваются, это приводит к переходу от режима сквозного течения к режиму встречных течений от обоих электродов (рис.2.49, б,в). Картина течений нестабильна во времени, наблюдается спонтанное изменение направления течений при постоянном напряжении.

При плавном увеличении концентрации бутилового спирта до 10 % происходит постепенная интенсификация ЭГД–течений от катода, симметричная структура течений нарушается и, проходя ряд последовательных стадий, переходит в картину, показанную на рис.2.49, г,д. Видно, что течение от катода более интенсивное, поэтому струя, исходящая от него, заходит за середину межэлектродного промежутка. Этот процесс продолжается вплоть до концентраций бутилового спирта 10÷15 %, когда течение от катода становится подавляющим и переходит в сквозное (рис.2.49, е). В этом режиме вихри у положительного электрода исчезают, наблюдается лишь некоторая неподвижная область у поверхности положительного электрода, размер которой не превышает 1 мм.

При растворении в чистом трансформаторном масле йода, обладающего повышенным сродством к электрону (3,2 эВ), наблюдается аналогичный эффект, но при значительно меньших концентрациях примеси. При малых концентрациях йода ($10^{-5} \div 10^{-6}$ г/см³) в жидкости наблюдаются встречные ЭГД–течения от обоих электродов типа представленных на рис.2.49, б,в. Увеличение концентрации йода приводит к росту интенсивности ЭГД–течения от катода, и при $c = 10^{-4} \div 10^{-3}$ г/см³, проводимость растворов составляет величину порядка 10^{-12} (Ом·см)⁻¹ и наблюдается сквозное течение от катода. Интенсивность сквозного течения в растворах йода ниже, чем в растворах бутилового спирта. Из-за оптической непрозрачности растворов йода

исследовать структуру ЭГД–течений в растворах йода высоких концентраций не удалось. Сквозное течение от катода наблюдается также в трансформаторном масле повышенной влажности, содержащем, как и растворы спиртов, гидроксильную группу –ОН.

Анализ кинематики сквозного ЭГД–течения показывает, что оно имеет четко очерченную область центральной струи – область приложения кулоновских сил. Протяженность ее не превышает длину межэлектродного промежутка, а ширина определяется размерами приэлектродной заряженной зоны и в нашем случае составляет 2÷3 мм. В начале центральной струи, у активного электрода, линии тока жидкости сужаются, образуя воронкообразную полость у катода. Далее по промежутку они взаимно параллельны, а за анодом вновь расходятся, образуя в заэлектродной области длинный хвост. В свободном пространстве направление сквозного течения испытывает случайные временные флуктуации. Распределение объемного заряда в хвосте двухслойно: центральная область заряжена одноименно с пассивным электродом, периферические области хвоста – зарядом противоположного знака. Заряд с пассивного электрода стекает в заэлектродное пространство, и, следовательно, зона рекомбинации смещена по ходу течения в заэлектродную область.

Увеличение концентрации бутилового спирта больше 20 % приводит к новому изменению структуры потоков. При проводимости 10^{-10} (Ом·см)⁻¹ появляется слабое встречное течение от анода, и ЭГД–течение приобретает четырехячеистую структуру. При этом течение от отрицательного электрода выражено сильнее, ячейки этого течения занимают большую часть межэлектродного промежутка. Противотечение от положительного электрода менее интенсивно, ячейки смещены за нижний электрод. При этом существенно ослабляется сквозной поток жидкости, выходящий далеко за пределы межэлектродного промежутка. Область, занимаемая течением, сужается. Дальнейшее повышение концентрации бутилового спирта приводит к повышению интенсивности встречных потоков от положительного электрода. Размеры ячеек течения от каждого из электродов уравниваются, течение симметризуется. Горизонтальная плоскость раздела течений от верхнего и нижнего электродов смещается к середине межэлектродного промежутка (рис.2.49).

Встречные течения в области центральной струи имеют характерные особенности, линии тока взаимно параллельны и прямолинейны. Центральные струи встречных потоков разделяются, образуя две поперечные, расходящиеся боковые струи. Линии тока этих струй параллельны воображаемой прямой, проходящей через центр межэлектродного промежутка, нормальной к направлению центральной струи течения. Течение в области центральных струй устойчиво и ламинарно, мелкомасштабных завихрений не наблюдается.

С ростом напряжения описанная четырехячеистая структура начинает деформироваться и распадаться. Поскольку потоки заряжены разноименным

зарядом, то процесс нейтрализации и рекомбинации заряда разноименно заряженных струй проходит в области расходящихся боковых струй. При этом в области боковых струй должно быть наведенное поперечное поле, вдоль которого осуществляется миграция разнополярных ионов с последующей их рекомбинацией.

В случае встречного четырехячеистого ЭГД–течения струи, отходящие от поверхности каждого из электродов и движущиеся навстречу, заряжены противоположно друг другу. Заряд центральной части каждой из струй соответствует заряду того электрода, от поверхности которого эта течёт струя. После встречи в середине межэлектродного промежутка при ламинарном течении противоположно заряженные области жидкости текут взаимно параллельным курсом вдоль плоскости, разделяющей потоки от верхнего и нижнего электродов. Поскольку в режиме ламинарного течения перемешивание отсутствует, то в стационарном режиме ($i = \text{const}$) при $Re \gg 1$ интенсивная конвективная доставка заряда в зону встречи струй должна быть скомпенсирована рекомбинацией противоположно заряженных ионов вдоль плоскости, разделяющей встречные струи. При течении в системе провод–плоскость из-за большой площади смоченной поверхности заряд, одноименный заряду плоского электрода, получают возвратные потоки жидкости.

Как было показано, рекомбинация противоположно заряженных струй потока, в том числе и в центральной струе течения. Указанные различия зарядовой структуры встречных ЭГД–течений формируют их индивидуальную кинематическую структуру. Так, например, из-за сильного взаимодействия встречных противоположно заряженных ЭГД–потоков течение в области горизонтальных расходящихся струй носит квазиодномерный характер, струи заметно вытянуты. В то же время физический механизм образования ЭГД-течений в симметричных и несимметричных системах электродов един, о чем свидетельствуют характер интегральных характеристик течения и его структурные характеристики.

Какова же причина возникновения встречных ЭГД–течений при больших концентрациях электронно-акцепторной примеси (бутанола). Жидкость, содержащая 20 % и более бутанола, обладает низковольтной проводимостью: более чем 10^{-10} (Ом·см)⁻¹. Время релаксации заряда ($\tau = \epsilon/\sigma$) в этих жидкостях не превышает 0,001 с, а безразмерный параметр $\Gamma = l_0/(v \cdot \tau) < 10$ при скоростях 1 м/с и $l_0 = 1$ см. Это значит, что электрический заряд центральной струи успевает мигрировать в объем жидкости, не доходя до поверхности противоэлектрода, т.е. мы имеем дело с режимом неразвитого ЭГД–течения. В таком режиме объемный заряд, образующийся у поверхности противоэлектрода, не может дойти до противоэлектрода и поэтому сквозное течение вновь переходит во встречное.

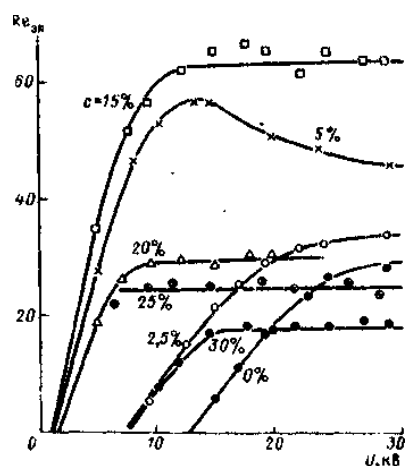


Рисунок 2.50. Зависимости электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах бутанола в трансформаторном масле различных концентраций.

На рис.2.50 представлены зависимости электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах бутанола в трансформаторном масле различной концентрации. Они имеют типичный вид – начальный рост и переход в насыщение. Пороговые напряжения имеют повышенные значения у жидкостей высокой и низкой проводимости, у жидкостей с содержанием бутанола 5÷15 % пороговые значения минимальны. В то же время предельные значения электрического числа Рейнольдса имеют максимум при тех же значениях концентрации бутанола.

Анализ скоростных характеристик ЭГД–течений [27,31,33]

Проведем сравнительный анализ встречных течений в симметричной системе электродов (провод–провод) и течения в несимметричной (провод–плоскость) системе электродов (рис.2.51).

Электроды на фотографиях (рис.2.51) наблюдаются в виде темных кругов. Видно, что встречные течения почти симметричны относительно середины межэлектродного промежутка. Характерной особенностью встречных течений являются неподвижная область в середине межэлектродного промежутка в месте встречи центральных струй и длинные боковые струи, текущие параллельным курсом вдоль плоскости симметрии. Линии тока боковых струй взаимнопараллельны и при полной симметрии зарядообразования на электродах перпендикулярны оси x . Продольная длина боковых струй составляет 2÷5 длин межэлектродного промежутка.

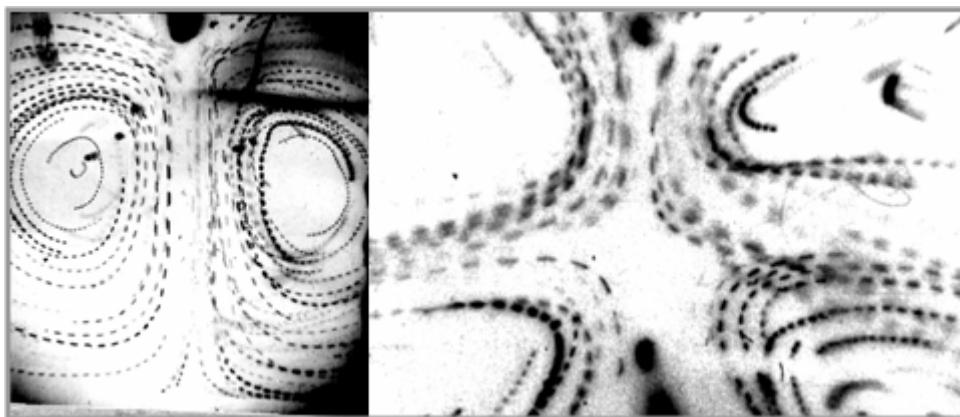


Рисунок 2.51. Несимметричные (слева) и встречные (справа) ЭГД-течения.

На рис.2.52 представлены карты линий уровня скоростей и сил ЭГД-течений в несимметричной (провод–плоскость) и симметричной (провод–провод) системах электродов. Для удобства сравнения на картах линий уровня приведена лишь половина встречных симметричных течений. В данном случае плоскость раздела встречных течений несколько смещена относительно середины межэлектродного промежутка и лежит на уровне 0,65.

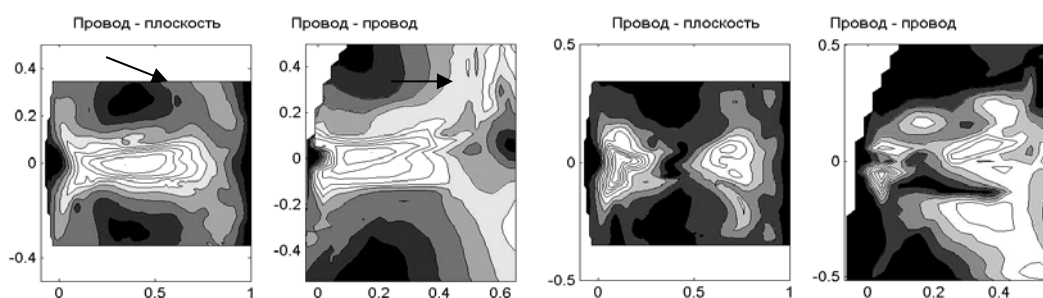


Рисунок 2.52. Карты линий уровня скоростей (слева) и сил (справа) в несимметричной и в симметричной системах электродов. Стрелкам обозначены боковые струи.

На представленных рисунках (рис.2.52) видна зонная структура течений, как в несимметричном, так и в симметричном случаях. В зоне ускорения векторы сил направлены по ходу течения, вдоль оси x , в зоне торможения против течения. В области центральной струи линии равного уровня скорости вытянуты в направления течения. Как видно (рис.2.52), в средней части центральной струи происходит изменение направления действия сил на обратное течению – жидкость начинает тормозить.

В несимметричном течении изменение направления сил происходит практически в середине межэлектродного промежутка, на уровне центров завихрений течения. Области ускорения и торможения симметричны относительно середины межэлектродного промежутка, и имеют форму, близкую к треугольной. В области ускорения вершина треугольника направлена по ходу течения, в области торможения в противоположную

сторону. Максимум сил торможения отстоит от поверхности плоского электрода и лежит на уровне 0,85. Раздвоение центральной струи происходит на том же уровне. После раздвоения центральная струя отражается от поверхности противоиэлектрода под острым углом. В начальной области боковых струй в симметричном случае действующая сила имеет составляющую вдоль направления течения, жидкость в боковых струях испытывает небольшое ускорение.

В симметричном течении картина иная. Центральная струя встречного ЭГД-течения несколько короче. Раздвоение на боковые струи происходит на уровне $0,3 \div 0,4$ межэлектродного промежутка. Напротив электрода, по ходу течения, появляется область нулевой скорости, имеющая круглую форму (рис.2.52). По картам линий уровня ускорений видно, что область сил торможения значительно шире в направлении, перпендикулярном оси x и существенно размыта. Имеется два максимума торможения, смещенных относительно оси x .

Для детального анализа структуры боковых струй на рис.2.53 представлены карта линий уровня скорости боковой струи и поверхностный график проекции силы на направление движение жидкости, исследованные с повышенным разрешением. Направление оси y на графиках обозначено стрелкой. Уровень 0 соответствует середине межэлектродного промежутка. Electroды лежат за пределами графика. Стрелками показано векторное поле ускорений. Поверхностный график для наглядности построен с обратным знаком. Видно (рис.2.53), что в середине межэлектродного промежутка имеется область нулевой скорости, круглой формы. Далее на протяжении участка длиной 0,51 жидкость разгоняется в направлении оси y , затем происходит очень медленное торможение жидкости на участке длиной 0,2 l.

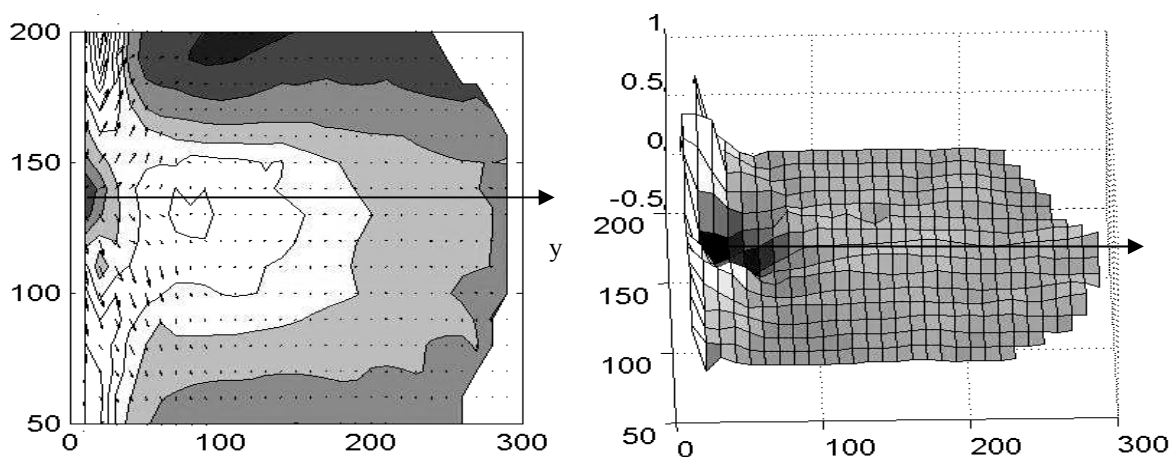


Рисунок 2.53. Карта линий уровня скорости (слева), поверхностный график сил (справа) в области боковой струи в симметричном случае.

Основное различие зон торможения несимметричного и встречных ЭГД-течений заключается в отсутствии у встречных течений плоского электрода, а,

следовательно, отсутствию источника ионов противоположного знака. Поэтому в несимметричной системе у ЭГД-течения нет вытянутых боковых усов, так как у поверхности плоского электрода происходит перезарядка течения от плоского электрода и поэтому появляется составляющая скорости обратного направления. Как видно из рис.2.51, линии тока несимметричного течения отражаются от поверхности плоского электрода под острым углом.

В симметричной системе перезарядка отсутствует, так как нет источника противоионов. В боковых струях идет рекомбинация и этот процесс медленный. Поэтому противоположно заряженные струи долго идут не расходясь, пока противозаряды не прорекомбинируют. На рис.2.54 представлена схема транспортировки объемного электрического заряда во встречных ЭГД-течениях и возможная схема его активной рекомбинации. Поскольку ЭГД-течения ламинарны, процесс перемешивания жидкости в поперечном направлении отсутствует, сближение противозарядов в следующих параллельным курсом противоположно заряженных боковых струях может осуществляться только путем миграции ионов в поперечном электрическом поле, наведенном объемными зарядами. Именно в разноименно-заряженных боковых струях условия для рекомбинации наиболее благоприятны, так как именно здесь расстояние между разноименно-заряженными слоями минимально (рис.2.54). ЭГД-течение в боковых струях квазиоднородно, протяженность боковых струй существенно превышает длину межэлектродного промежутка, а на пути следования боковых струй имеется небольшая зона ускорения.

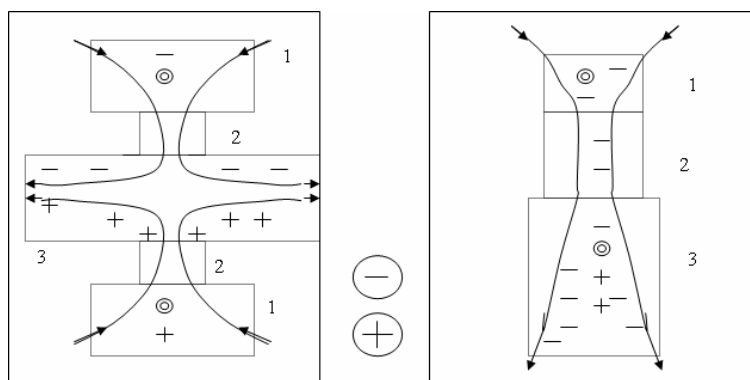


Рисунок 2.54. Схема транспортировки объемного электрического заряда во встречных ЭГД-течениях и возможная схема его активной рекомбинации.

Эта особенность боковых струй находит объяснения, если учесть, что в результате рекомбинации противозарядов, суммарная плотность заряда вдоль направления течения падает, и, следовательно, появляется составляющая электрического поля, направленная вдоль течения в боковой струе. Процесс рекомбинации противоположно-заряженных боковых струй является наиболее медленным, так как рекомбинация осуществляется при сближении зарядов на длину радиуса Дебая, этот процесс идет путем миграции поперек течения. Это

объясняет вытянутую в поперечном направлении форму боковых усов встречных ЭГД–течений.

Описанные особенности зонной структуры ЭГД–течений позволяют понять физический механизм высоковольтной проводимости жидких диэлектриков. Как уже отмечалось, вольтамперная характеристика жидких диэлектриков, содержащих примеси, обычно имеет два основных участка: допороговый омический участок и послепороговый квадратичный участок. Эти особенности ВАХ обсуждаются в ряде работ [1, 11, 12, 13]. Впервые попытки объяснения послепорогового участка ВАХ при помощи конвективной транспортировки заряда ЭГД–течением были предприняты Остроумовым [1]. В дальнейшем эта идея разрабатывалась в работах [11,13]. Поскольку электрогидродинамическая подвижность значительно выше обычной, появление ЭГД–течений значительно ускоряет транспортировку заряда через межэлектродный промежуток и, следовательно, существенно изменяет характер вольтамперной характеристики. Однако при более детальном рассмотрении всех стадий транспортировки заряда с учетом зонной структуры ЭГД–течения, можно сделать вывод, что квадратичный характер вольтамперной характеристики определяется наиболее медленной стадией процесса.

Рассмотрим эти стадии на примере встречных ЭГД–течений в симметричной системе электродов провод-провод:

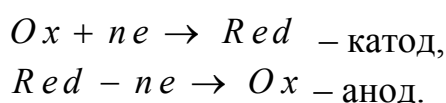
1. Первая стадия процесса это стадия перехода заряда с поверхности электрода в жидкость. На катоде эта стадия характеризуется переходом электрона с металла на молекулу примеси, на аноде наоборот электрон с примесной молекулы переходит на металлический электрод, образуя положительный ион.
2. Вторая стадия это миграция иона через неподвижный приэлектродный слой в жидкость. На пути следования ион обрывает сольватной оболочкой, обеспечивающей повышенную степень взаимодействия заряда с окружающими молекулами жидкости.
3. За пределами приэлектродного слоя ион движется, сначала разгоняя жидкость в пределах зоны ускорения, а затем практически без ускорения в центральной струе ЭГД–течения.
4. Далее в пределах встречных боковых струй происходит рекомбинация противозарядов, поступающих от анода и катода.

Можно условно записать электрическое сопротивление межэлектродного промежутка в виде суммы сопротивлений отдельных стадий процесса $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$. Именно наиболее медленная стадия процесса, имеющая наиболее высокое сопротивление, определяет ход вольтамперной характеристики системы электроды–жидкость. Какая же из описанных стадий является наиболее медленной? Предположим, что это стадия 4 – стадия рекомбинации заряда. Оценки характерного времени приэлектродных реакций показывают, что они протекают достаточно быстро. Приэлектродные слои

имеют малую толщину, порядка 0,1 мм, напряженность поля в них достаточно высока. Поэтому относительное сопротивление приэлектродного слоя R_2 мало. Как уже отмечалось, ЭГД–подвижность достаточно высока, и, следовательно, сопротивление R_3 также невелико.

Встречные и сквозное ЭГД-течения. Особенности ионизационно-рекомбинационного механизма образования ионов [13,22,26]

Поскольку токопрохождение через жидкий диэлектрик обычно не сопровождается растворением электродов или выделением на них веществ, рассмотрим элементарный акт ионообразования, протекающий по окислительно-восстановительному механизму:



Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровождающимся целым рядом превращений. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными ионами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому считают, что перенос заряда на межфазной границе осуществляется преимущественно на примесные молекулы. Обозначим энергию ионизации восстановленной формы через E_{Red} , а энергию сродства к электрону окисленной формы через E_{Ox} . Уровень Ферми окислительно-восстановительной реакции определяется в виде

$$F_0 = \frac{1}{2} [E_{Ox} + E_{Red}], \quad E_{Ox} - E_{red} = 2E_p, \quad (2.9)$$

где E_p – энергия, необходимая для реорганизации состояния растворителя при появлении в нем частицы окисленной или восстановленной формы. Для водных растворов величина этой энергии колеблется в окрестности 0,52 эВ. В соответствии с теорией кинетики приэлектродного обмена, плотность катодного и анодного токов соответственно равны:

$$j_a = ec_{red} k \exp \left\{ \frac{[e(\varphi_M - \Delta\varphi) - E_{cp}]^2}{4kTE_p} \right\}, \quad (2.10)$$

$$j_k = ec_{ox} k \exp \left\{ \frac{[e(\varphi_M - \Delta\varphi) - E_u]^2}{4kTE_p} \right\}, \quad (2.11)$$

где $e \cdot \varphi_M$ – уровень Ферми металла; E_u , E_{cp} – энергии ионизации и сродства к электрону примесной молекулы. Таким образом, в приэлектродной области образуется заряженный слой. Прохождение тока в любой электрохимической системе состоит из нескольких стадий: транспортировка ионов к границе раздела электрод–жидкость, процесс разряда иона либо ионизации нейтральной частицы у электрода и отвод продуктов реакции из приэлектродной зоны. Кинетика приэлектродных процессов обычно содержит несколько стадий, например, стадию переноса электронов через границу раздела электрод–жидкость, то есть электрохимическую, и стадию отвода продуктов электрохимических реакций в объем жидкости.

Как видно из формул, изменение условий зарядообразования на одном из электродов должно нарушить симметрию в картине ЭГД–течений. Эксперимент показывает, что изменение условий инжекции заряда на одном из электродов приводит к искажению симметричной структуры ЭГД–течений. Это изменение, как это видно из выражений (2.10) и (2.11), может произойти при изменении напряжения на электродах, либо при изменении состава или концентрации примесной добавки, либо при изменении материала либо покрытия одного из электродов.

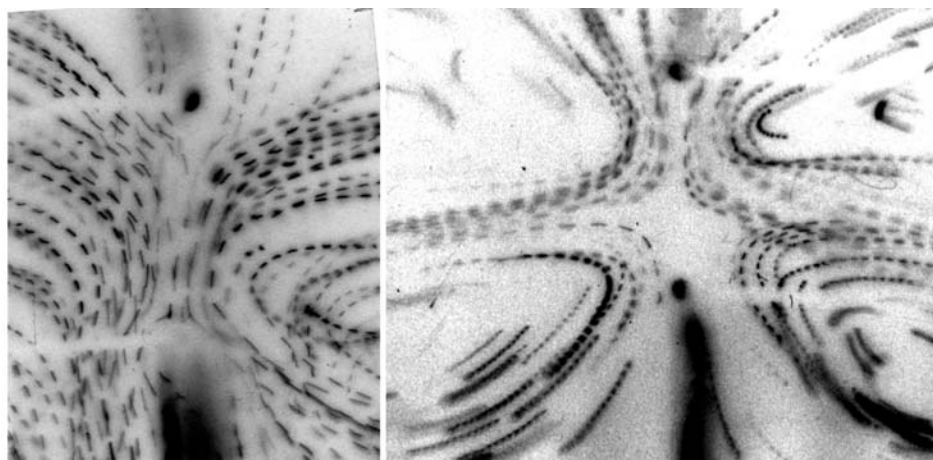


Рисунок 2.55. Сквозное (слева) и встречные (справа) ЭГД–течения.

При существенных нарушениях симметричности условий зарядообразования происходит переход от встречных течений к сквозному, представленный на фотографиях (рис.2.55). Переход от встречных течений к сквозному происходит через ряд промежуточных стадий. При небольших нарушениях симметрии условий зарядообразования происходит искажение структуры встречных течений (рис.2.56). Положение плоскости раздела симметричных встречных ЭГД–течений смещается к электроду, на котором условия зарядообразования менее благоприятны. При переходе от встречных симметричных течений к сквозному путем увеличения концентрации примеси (бутанола) увеличивается скорость зарядообразования на катоде и,

следовательно, плотность заряда в струе от катода. Поэтому в середине межэлектродного промежутка, в месте встречи течений, суммарный заряд катодной и анодной струй является преимущественно отрицательным, и остается составляющая сил в направлении анода. Поэтому боковые струи идут под некоторым углом к центральной оси.

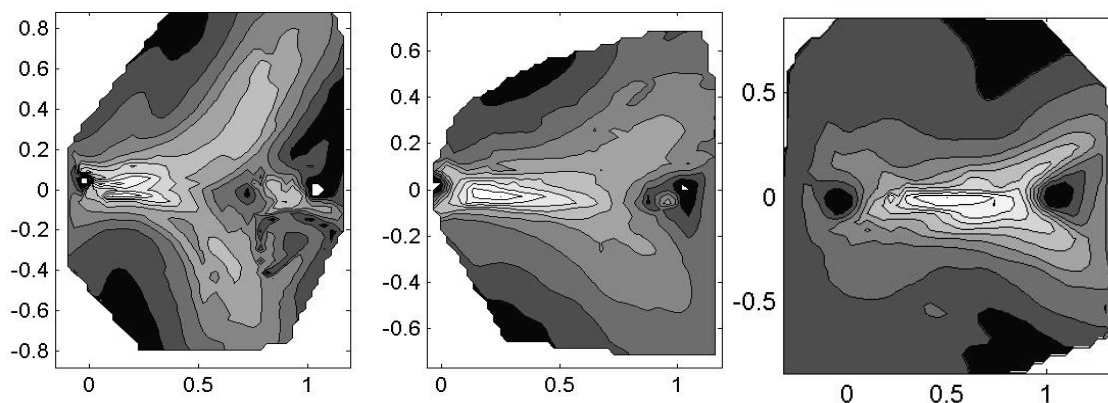


Рисунок 2.56. Контурные графики скорости различных стадий встречных ЭГД-течений.

При дальнейшем увеличении концентрации бутанола скорость зарядообразования на катоде растет, и плотность заряда в катодной струе намного превышает анодную. Ускорение в прикатодной области намного выше, чем в прианодной, поэтому течение от анода не успевает развиваться. Встречный поток от анода сносится в заэлектродную область. Боковые струи выносятся за пределы межэлектродного промежутка. Сквозное течение можно представить как предельный случай встречных течений, когда ЭГД-течение от одного из электродов не успевает развиваться, угол наклона боковых струй к первоначальному направлению течения уменьшается до очень малой величины, а боковые струи выходят далеко за пределы межэлектродного промежутка, огибая противозлектрод. Область ускорения появляется за пределами межэлектродного промежутка, за анодом, где электрическое поле должно быть направлено в обратную к течению сторону. Казалось бы, что на течение в заэлектродной области со стороны электрического поля должны действовать тормозящие силы. Однако на самом деле здесь наблюдаются зоны ускорения. Течение в зоне шлейфа ламинарно, нет турбулентности, нет перемешивания струй. Противоположно заряженные струи в заэлектродной области движутся параллельно, не перемешиваясь. Противоионы, как и в боковых струях, могут сблизиться только за счет дрейфа (миграции) в собственном поперечном поле. Этот процесс медленный, так как скорость течения много больше скорости ионного дрейфа. Для рекомбинации им нужно сблизиться на расстояние, равное радиусу Дебая. Струя из-за внутреннего взаимодействия противоположно заряженных слоев, не может завернуть, пока не закончится рекомбинация. Поэтому заэлектродный шлейф длинный, порядка нескольких

длин межэлектродного промежутка.

На рис.2.57 представлены карты линий уровня скорости и сил встречных ЭГД-течений в симметричной системе электродов провод-провод с различным уровнем асимметрии, небольшой слева и более существенной справа. Электроды расположены на уровне $(0,0)$ - катод и $(0,1)$ - анод. Несимметричное ЭГД-течение направлено преимущественно от катода к аноду. Встречные ЭГД-течения имеют существенную степень асимметрии, течение от катода более интенсивно, чем от анода, боковые струи идут под углом к центральной струе.

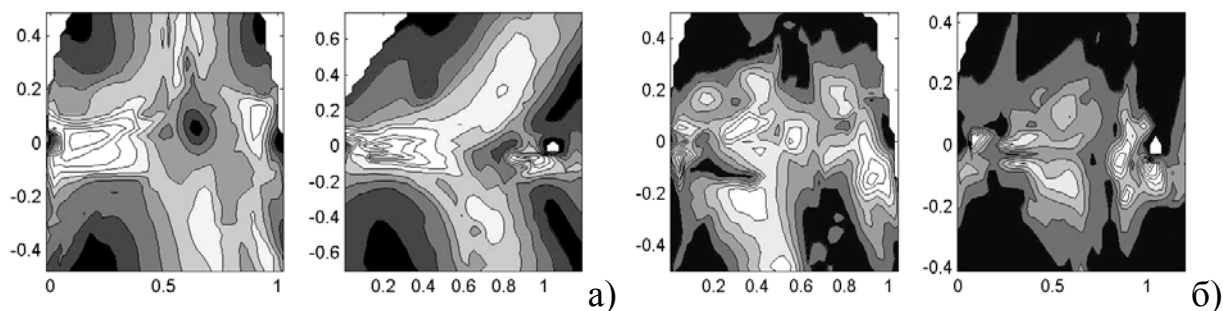


Рисунок 2.57. Карты линий уровня скорости (а) и сил (б) встречных ЭГД-течений с различным уровнем асимметрии, небольшой (слева) и более существенной (справа).

На рис.2.58 представлены карты линий уровня скорости сквозного и встречных ЭГД-течений в симметричной системе электродов провод-провод. Электроды расположены на уровне $(0,0)$ – катод и $(0,1)$ – анод. Сквозное ЭГД-течение направлено от катода к аноду, Встречные ЭГД-течения имеют небольшую степень асимметрии, течение от катода более интенсивно, чем от анода.

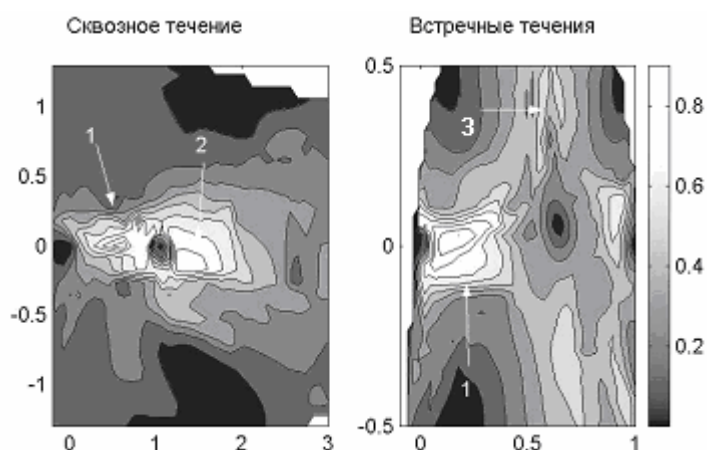


Рисунок 2.58. Карты линий уровня скорости.

Переход от режима несимметричных встречных ЭГД-течений к сквозному приведен на картах линий уровня скорости (рис.2.58). Стрелками на графиках течений обозначены: 1 - струя от катода, 2 - струя от анода, 3 -

боковая струя.

На поверхностных графиках скорости (рис.2.59) эти участки видны в виде хребтов: 1 - идет от катода в середину межэлектродного промежутка, где раздваивается на два, расходящихся под косым углом к центральной оси течения (стрелки, рис.2.59), 2 - пик у анода.

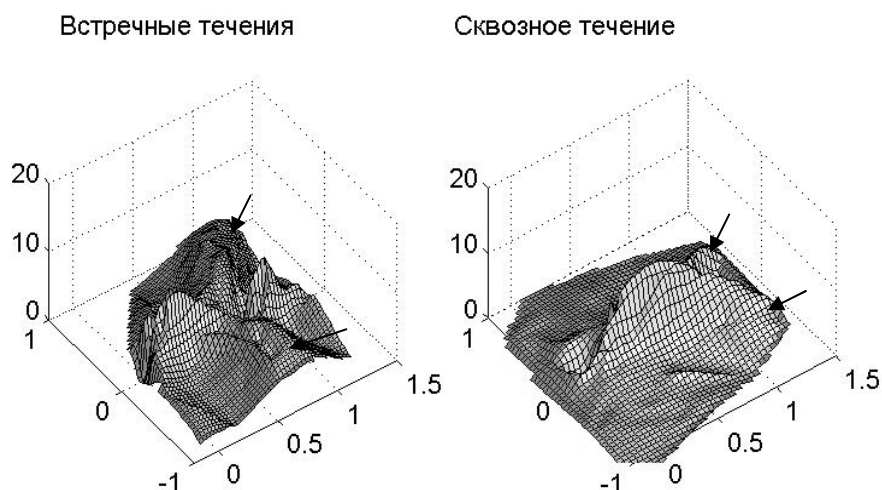


Рисунок 2.59. Поверхностные графики скорости встречных и сквозного течений.

Между хребтом и пиком имеется ложбинка, расположенная на уровне, соответствующем месту встречи противоположно направленных струй ЭГД–течений (рис.2.59). На картах линий уровня скорости эти хребты видны в виде светлых областей, соответствующих повышенному уровню скорости, а ложбинка в виде темной области, несколько смещенной от середины межэлектродного промежутка к аноду. Видно, что наибольшее ускорение жидкость испытывает в струе текущей от катода, однако небольшие области ускорения имеются также и в боковых струях.

На рис.2.60 представлены карта линий уровня скорости и поверхностный график скорости сквозного ЭГД–течения – общий план. На картах линий уровня скорости сквозного течения струя, идущая от катода, обозначена стрелкой 1, а за электродная струя стрелкой 2. По осям отложено относительное расстояние в длинах межэлектродного промежутка. Электроды расположены на уровнях: катод – (0,0), анод – (0,1). Приэлектродные области видны на картах линий уровня скорости в виде темных пятен на уровне (0,0) и (0,1). На поверхностном графике скорости приэлектродная область у анода видна в виде ложбинки на уровне (0,1).

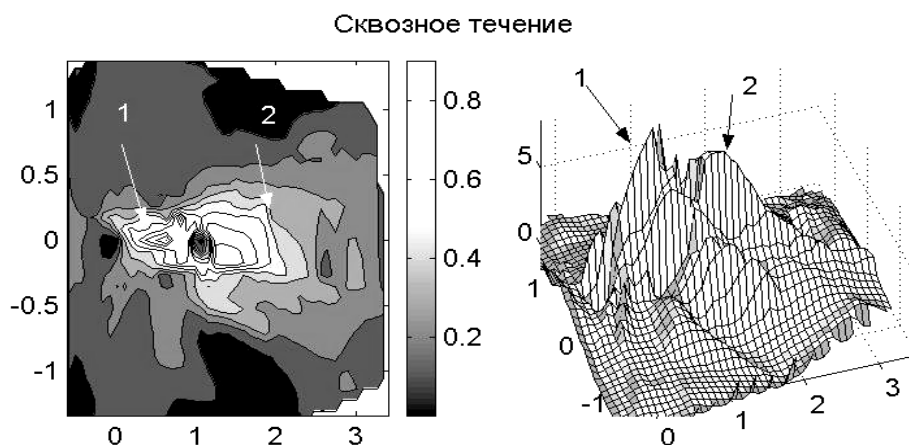


Рисунок 2.60. Карта линий уровня скорости (слева) и поверхностный график скорости (справа) сквозного ЭГД-течения.

Видно, что в заэлектродной области интенсивный спад скорости начинается на уровне 2, скорость спадает до уровня 0.4 от максимального значения на расстоянии 3, т.е. на расстоянии в два межэлектродных промежутка за анодом. В заэлектродной области, на уровне $1,2 \div 1,5$, имеется зона ускорения. Таким образом, зонная структура сквозного ЭГД-течения существенно отличается от несимметричных и встречных течений: центральная струя выходит за пределы межэлектродного промежутка, обтекая анод, зона рекомбинации и зона торможения вынесены далеко за пределы межэлектродного промежутка в заэлектродную область, где поле электродов в электростатическом приближении направлено противоположно направлению ускорения жидкости. Как видно (рис.2.60), зона ускорения сквозного ЭГД-течения растянута более чем на половину межэлектродного промежутка.

Эти удивительные свойства сквозного ЭГД-течения делают его особенно привлекательным для использования в различных ЭГД-устройствах, так как в нем реализованы оптимальные условия для преобразования электрической энергии в энергию гидродинамическую. Этот важный вывод имеет большое прикладное значение, так как открывает новое направления в конструировании ЭГД-устройств. Отличительной особенностью этого направления является рациональный подбор свойств границы раздела электрод-жидкость и учет особенностей зонной структуры ЭГД-течений при конструировании ЭГД-устройств. Поэтому свойства сквозного ЭГД-течения исследованы наиболее детально.

На рис.2.61 представлены линии тока сквозного ЭГД-течения в околоэлектродных областях. Эти области обработаны с повышенным в 10 раз разрешением, составляющим 100 пикселей/мм, что позволяет детально исследовать структуру приэлектродных зон. Как показано ранее, именно в приэлектродных областях идет преобразование электрической энергии в гидродинамическую.

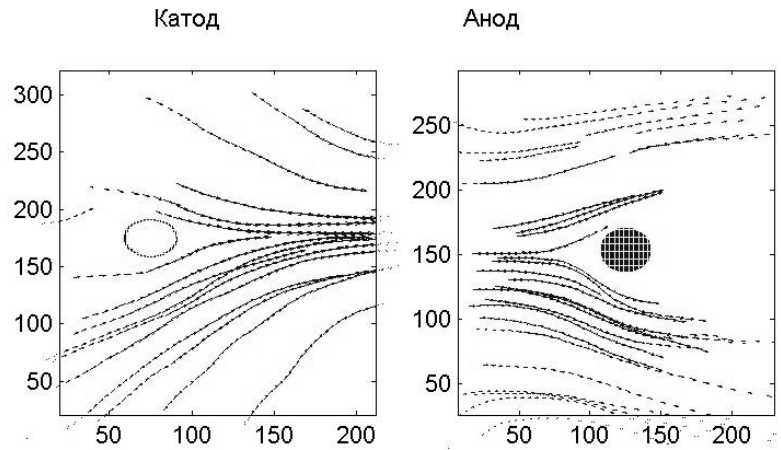


Рисунок 2.61. Лини тока ЭГД-течения у катода и анода.

На рис.2.62 представлены карты линий уровня скорости встречных и сквозного течений в приэлектродных областях у катода (слева) и анода (справа). Видно, что зона интенсивного ускорения встречных ЭГД-течений у катода очень короткая и составляет $0,05 \cdot l_0$, в реальном масштабе $\sim 0,35$ мм. На этом участке наблюдается рост скорости в $5 \div 6$ раз. При среднем уровне скорости в $0,1$ м/с ускорения жидкости достигают нескольких g . Аналогичная картина наблюдается у анода, однако здесь ускорения меньше.

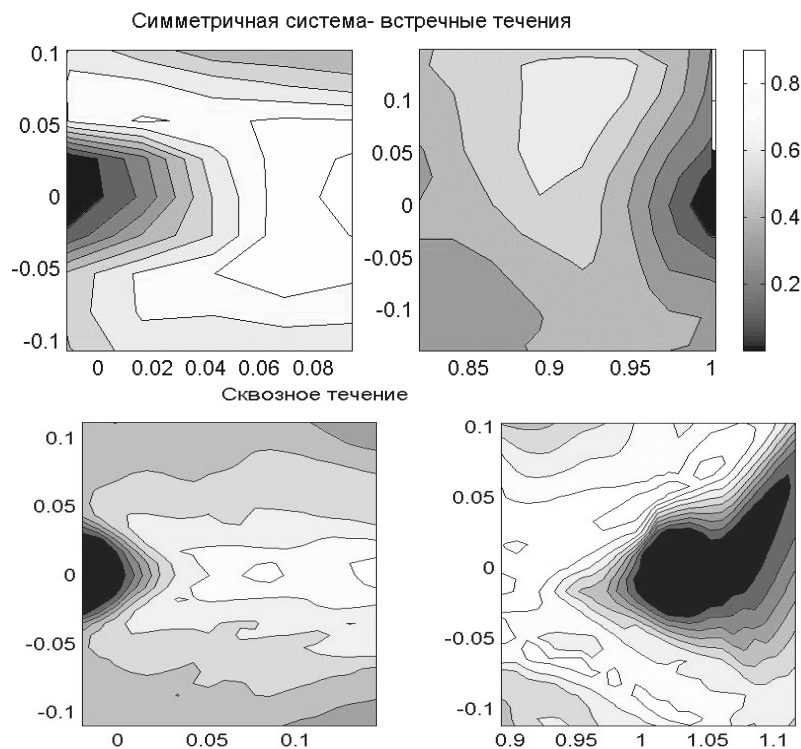


Рисунок 2.62. Распределения скорости у поверхности электродов.

Тонкая структура зон ускорения сквозного ЭГД-течения представлена на рис.2.63, слева. Зона ускорения имеет два участка: приэлектродный участок быстрого роста ускорения с максимумом на уровне $0,6$, и участок медленного

изменения ускорения, раздвоенный и несколько смещенный относительно центральной оси, простирающийся до середины межэлектродного промежутка и далее в заэлектродную область. Следует отметить, что область действия сил в начальной части центральной струи сквозного ЭГД-течения очень узкая $\sim 0,02 - 0,05$, далее область раздваивается симметрично относительно центральной оси течения и утолщается.

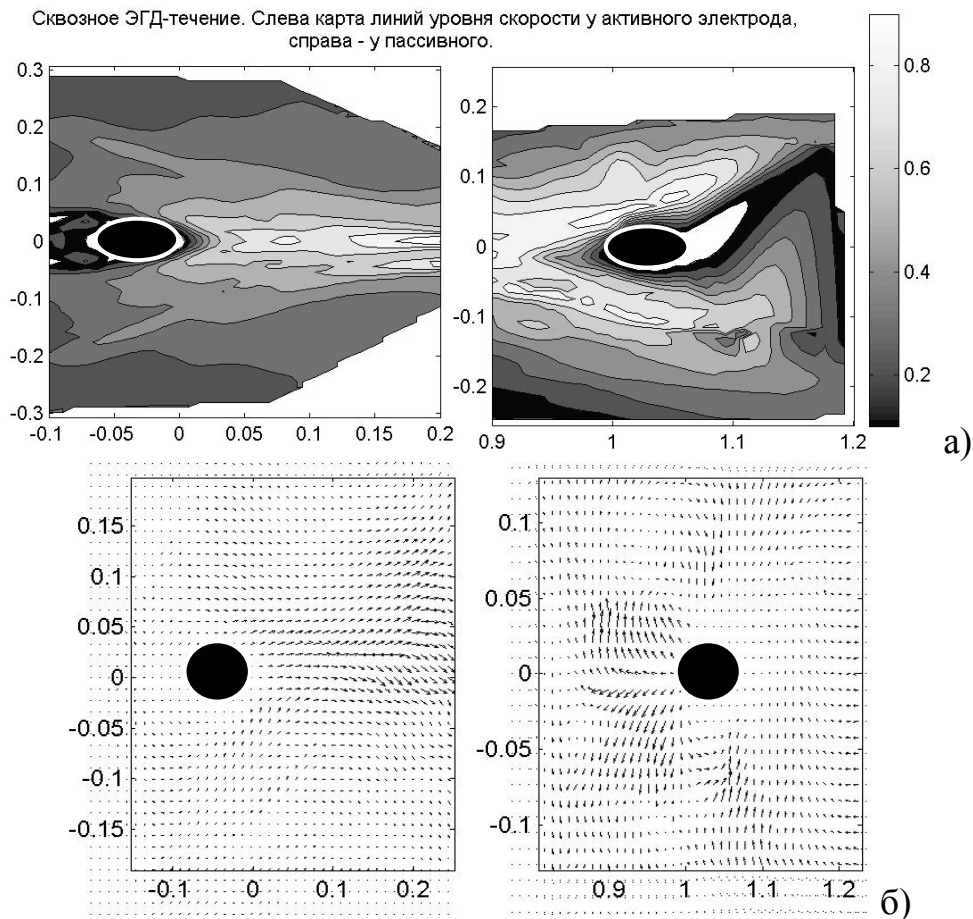


Рисунок 2.63. *Карты линий уровня скорости (а) и векторные поля сквозного течения (б) у катода (слева) и анода (справа).*

Существенные отличия видны в структуре приэлектродной области у анода. В лобовой части на уровне 0,95 имеется участок торможения. Лобовая часть неподвижной приэлектродной области имеет конусообразную форму, хвостовая часть неподвижной жидкости вытянута по ходу течения. В случае встречных течений структура приэлектродного слоя у анода аналогична структуре прикатодного слоя.

Таким образом, анализ зонной структуры течения показывает, что ион, получивший электрический заряд на поверхности электрода, в пределах неподвижной зоны движется относительно жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую молекулярную структуру, обеспечивающую в дальнейшем повышенную

степень его взаимодействия с молекулярным окружением. Далее появляется гидродинамическая составляющая, выводящая сквозное течение за пределы межэлектродного промежутка. Поскольку биполярная структура боковых струй встречных течений очевидна, то логично предположить, что при трансформации встречных течений в сквозное биполярная структура «боковых струй» сохраняется. Аналогично этому сохраняется область активной рекомбинации заряда, однако в этом предельном случае она находится за пределами межэлектродного промежутка. В этом случае становится понятной скоростная структура заэлектродной области течения, где жидкость движется практически однородно, без отрицательного ускорения. Это происходит в результате того, что объемный заряд в заэлектродной области уравновешен зарядом струй текущих от активного электрода и в целом заэлектродная струя практически не испытывает действия электрических сил и тормозится исключительно под действием вязких сил.

Зависимость кинематических и электрофизических характеристик сквозного ЭГД–течения от величины межэлектродного промежутка

Зависимость кинематики ЭГД-течений от размеров промежутка интересна, прежде всего тем, что позволяет оценить взаимовлияние приэлектродных заряженных слоев.

Исследование проводилось в 10 %-м растворе бутилового спирта в трансформаторном масле, в качестве электродов использовались платиновые проволоочки диаметром 0,2 мм. Диапазон изменения промежутка составлял – 5 см. Анализ кинематики ЭГД–течений при разных межэлектродных расстояниях (1; 1,5; 2,5 и 10 мм) показывает, что при малых расстояниях (до 2 мм) течение реализуется в виде двух замкнутых ячеек – внутренних вихрей, размеры которых не превышают размеров промежутка. При его длине 2,5 мм на фоне внутренних вихрей появляется сквозное течение, выходящее за границы пассивного электрода. При этом у поверхности последнего хорошо виден слой неподвижной жидкости, обтекаемый сквозным потоком. Таким образом, при увеличении размеров промежутка выше некоторой критической величины характер течения изменяется от внутреннего к сквозному [13].

На рис.2.64 представлены зависимости скорости ЭГД–течений дальней (а) и ближней (б) зонах от величины межэлектродного промежутка, измеренные при разных напряжениях на электродах. Зависимости характеризуют среднюю скорость центральной струи внутренних вихрей и сквозного течения, измеренную за пределами промежутка. Зависимости имеют максимум при величине $l_0 \sim 0,5$ см.

Пересчет зависимостей $v = v(U)$ к координатам $Re_{эл} = f(l_0)$ показал, что кривые $e_{эл} = f(l_0)$ имеют вид кривой с плато. При изменении промежутка от 1 до 10 мм предельное электрическое число Рейнольдса возрастает, при дальнейшем увеличении промежутка оно остается постоянным. Таким образом, вид

зависимостей позволяет выделить две зоны – ближнюю ($l_0 < l_{кр}$), в пределах которой значение $Re_{эл}$ возрастает, и дальнюю ($l_0 > l_{кр}$), в которой скорость развитого течения пропорциональна средней по межэлектродному промежутку напряженности поля $v \sim (U/l_0)$, а электрическое число Рейнольдса постоянно.

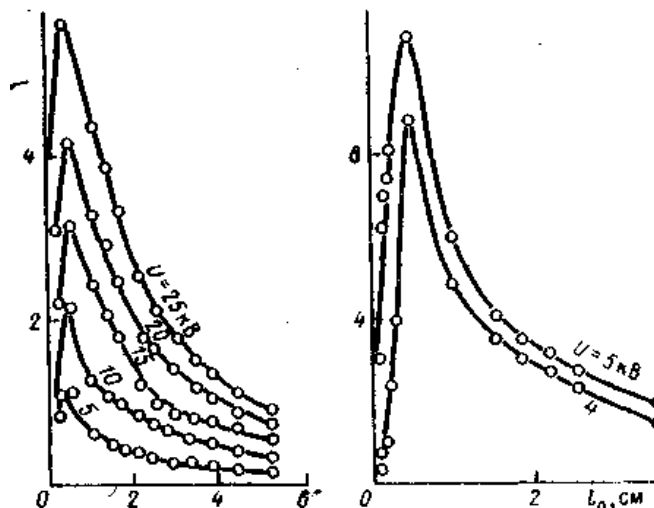


Рисунок 2.64. Зависимость скорости v [см/с] в дальней (слева) и ближней (справа) от длины межэлектродного промежутка [см] при разных напряжениях

Наличие экстремумов у зависимости $v(l_0)$ свидетельствует о наличии в ближней зоне приэлектродных заряженных структур – у каждого электрода имеется некоторая неподвижная область накопления заряда. При сближении электродов сближаются заряженные области, и на расстоянии $l_{кр} = 0,6$ см начинает сказываться их взаимовлияние, что приводит к снижению интенсивности течений и изменению их характера. Заряженную приэлектродную область у пассивного электрода можно зафиксировать визуально. Линии тока ЭГД-течения огибают некую неподвижную приэлектродную область с размерами $0,5 \div 1$ мм. Она особенно хорошо заметна в растворах йода в трансформаторном масле, где она регистрируется в виде просветленного приэлектродного слоя (1 мм) у поверхности пассивного электрода на фоне общей фиолетовой окраски жидкости. Этот слой, по-видимому, обусловлен превращением "окрашенных" молекул в бесцветные ионы.

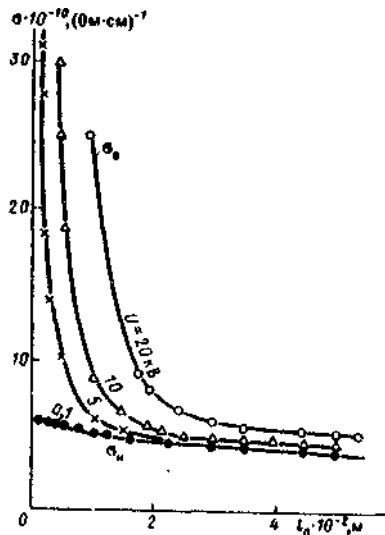


Рисунок 2.65. Зависимость низковольтной проводимости σ_n от длины межэлектродного промежутка l_0 для симметричной системы электродов

На рис.2.65 представлена зависимость низковольтной проводимости σ_n от длины межэлектродного промежутка l_0 для симметричной системы электродов. Диапазон исследования $l_0 - 60$ мм. Средняя низковольтная проводимость определялась по формуле:

$$\sigma_n = [\text{Ln}(l_0/r) i] / (\pi d_{np} U),$$

где r – радиус электрода; d_{np} – длина электрода. Видно, что проводимость изменяется очень слабо. Для высоковольтной проводимости σ_e , как и ранее, оказалась справедливой формула $\sigma_e = K \cdot U$, причем в пределах дальней зоны получена эмпирическая формула $E = U / 2r \cdot \ln(l_0/r)$ (рис.2.66). В ближней зоне ($l_0 < 5$ мм) наблюдается более сильная зависимость $k = f(r)$.

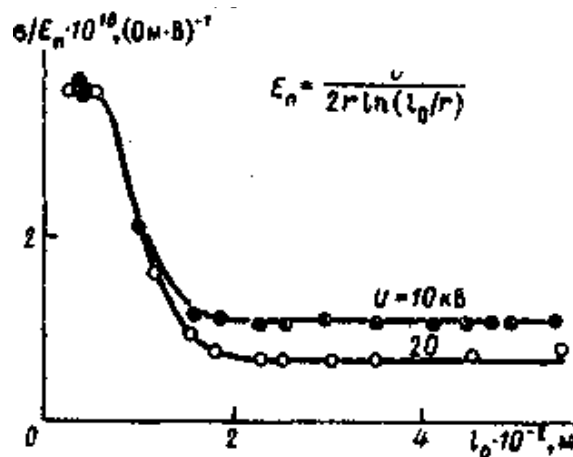


Рисунок 2.66. Зависимость высоковольтной проводимости σ от длины межэлектродного промежутка l_0 для симметричной системы электродов

Итак, обобщая результаты исследований, отметим, что наличие приэлектродных заряженных слоев приводит к изменению режима ЭГД-течения от сквозного к замедленному вихревому внутреннему при уменьшении межэлектродного расстояния ниже некоторой пороговой величины. Изменение режима ЭГД-течений сопровождается изменением характера высоковольтной проводимости.

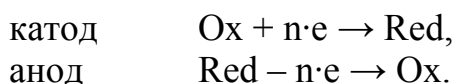
Следует отметить, что условия зарядообразования на электродах зависят не только от концентрации примеси, но и от прочих условий, например от разности потенциалов. Поэтому полной симметрии встречных течений достичь достаточно трудно, она нарушается при изменении напряжения, материала электродов, концентрации примеси. Устойчивые встречные течения реализуются, как правило, от электродов малого диаметра.

Влияние материала электродов на скорость и структуру ЭГД-течений в симметричной системе электродов провод-провод

В литературе в настоящее время имеется информация о работе выхода с поверхности очищенных металлов в вакуум, данные различных авторов и полученные с использованием различных методов существенно отличаются. Имеются также некоторые данные об энергии ионизации и средствах к электрону, уединенных молекул и групп [22].

Исследование работы выхода электронов различных материалов производят разными методами, среди которых следует отметить фотоэлектрический метод измерения контактной разности потенциалов, который обладает неоспоримыми преимуществами, так как позволяет измерять работу выхода электрона, не связывая ее с состоянием поверхностного слоя и наличием на нем адсорбированных из окружающей среды атомов или молекул.

Поскольку токопрохождение через жидкий диэлектрик обычно не сопровождается растворением электродов или выделением вещества, рассмотрим элементарный акт ионообразования, протекающий по окислительно-восстановительному механизму:



Элементарный акт сопровождается переходом электронов через границу раздела фаз металл – жидкий диэлектрик. Межфазная граница является контактом двух тел, поэтому ее свойства в некотором смысле аналогичны свойствам контакта металл – твердый диэлектрик (полупроводник). Вместе с тем контактирующие среды обладают, во-первых, принципиально разными механизмами проводимости: металл – электронным, а жидкий диэлектрик – ионным, во-вторых, различным агрегатным состоянием сред: твердым и жидким. Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным

процессом, сопровождающимся целым рядом превращений, особое внимание обратим на акт перехода электронов металла в жидкость. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными ионами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому будем считать, что перенос заряда на межфазной границе осуществляется преимущественно на примесные молекулы.

Обозначим энергию ионизации восстановленной формы через E_{Red} , а энергию сродства к электрону окисленной формы через E_{Ox} . Уровень Ферми окислительно-восстановительной реакции определяется в виде:

$$F_0 = [E_{Ox} + E_{Red}] / 2, \quad E_{Ox} - E_{Red} = 2E_p$$

где E_p – энергия, необходимая для реорганизации состояния растворителя при появлении в нем частицы окисленной или восстановленной формы. Согласно некоторым данным, для водных растворов величина этой энергии колеблется в пределах $0,5 \div 2$ эВ. Связь между электрохимическими потенциалами электронов в растворе и величиной F_0 описывается выражением

$\mu = F_0 N_a - RT \ln(c_{Ox}/c_{Red})$	(2.12)
--	--------

Здесь F_0 – уровень Ферми электрохимической системы. Второе слагаемое в (2.12) обычно мало, и его можно не учитывать.

В соответствии с общими термодинамическими принципами на границе электрод–электролит электрохимические потенциалы уравниваются: $\mu_m = \mu_{эл}$. Условие равновесия окислительно-восстановительной реакции имеет следующий вид: $\mu_{Red} = \mu_{Ox} + n \cdot \mu_m$. В условиях протекания электрического тока потенциал электрода изменяется на величину $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$, называемую перенапряжением. В соответствии с теорией кинетики приэлектродного обмена, плотность катодного и анодного токов равна, соответственно [13]:

$j_{к} = e c_{Red} k \exp\left\{-\frac{[e(\varphi_m - \Delta\varphi) - E_{Red}]^2}{4 k T E_p}\right\},$ $j_{а} = e c_{Ox} k \exp\left\{-\frac{[e(\varphi_m - \Delta\varphi) - E_{Ox}]^2}{4 k T E_p}\right\}.$	(2.13)
---	--------

Здесь $e \cdot \varphi_m$ – уровень Ферми металла; E_u , E_{cp} – энергии ионизации и сродства к электрону примесной молекулы.

Таким образом, анализ теоретических работ по исследованию контакта металл–диэлектрик, а также металл–электролит показывает, что в рассматриваемой области образуется заряженный слой, обусловленный различием работ выхода из контактирующих веществ. Прохождение

электрического тока через контактный слой на границе металл– диэлектрик сопровождается туннелированием электронов через барьер. Пограничный ток контакта металл-электролит на катоде определяется разницей работы выхода с поверхности металла и энергией сродства к электрону окисленной формы, а на аноде – разницей энергии ионизации восстановленной формы и работой выхода с поверхности металла. Применение формул (2.13) для непосредственного расчета анодного и катодного токов невозможно, так как в реальных условиях необходим учет диффузии, конвекции, миграции и т.д.

Если жидкость неподвижна, то отвод образовавшихся в контактном слое ионов осуществляется только путем миграции, скорость которой ограничена ввиду сравнительно малой подвижности ионов. Как уже отмечалось, если скорость ионообразования меньше, чем скорость отвода ионов из приэлектродных областей, то у электродов возникает избыток заряда, одноименного с электродом. Это приводит к снижению величины электродного перенапряжения и, следовательно, уменьшает электродный ток. Процесс длится до установления стационарного режима.

Если жидкость приходит в движение, то скорость отвода заряда от поверхности электродов резко увеличивается из-за появления конвективного механизма переноса заряда, и возникающий у электродов объемный заряд уносится ЭГД–течением из приэлектродной области. Поэтому ограничения, которые возникли при дрейфовом механизме транспортировки, снимаются, и скорость ионообразования на электродах возрастает. Это приводит к возникновению нелинейного участка кривой для вольтамперной характеристики, имеющего квадратичный, а не экспоненциальный характер, как это следует из формул (2.13). Однако, руководствуясь выражениями (2.13), можно определить зависимость интенсивности восстановительных и окислительных реакций от материала электрода и вводимой в жидкость примеси.

Реакции ионообразования на аноде и катоде обычно проходят неодинаково. Известно, что отрыв электрона от молекулы требует затрат энергии и характеризуется потенциалом ионизации. Так, например, энергия ионизации молекулы йода в положительный ион ($J_2 - e \rightarrow J^+$) равна 9,7 эВ. Присоединение электрона к атому или молекуле может происходить с выделением энергии. В этом случае говорят, что частица обладает сродством к электрону. Мерой сродства к электрону служит энергия E_{cp} , выделенная при ионизации молекулы в отрицательный ион. Для молекулы йода $E_{cp} \approx 3,2$ эВ; для групп -ОН, -СN и -NO₂ E_{cp} соответственно равна 2, 3 и 3 эВ [13] (для Cl $E_{cp} = 1,2$ эВ). С позиций ионизационно-рекомбинационного механизма введение в жидкость примесных молекул галогенов, а также молекул, содержащих группы -ОН, -СN, -NO₂, обладающих сродством к электрону, должно привести к интенсификации процессов ионообразования на катоде. Плотность объемного заряда, а, следовательно, и плотность возникающих кулоновских сил у поверхности каждого из электродов определяется, с одной стороны, скоростью

ионообразования, а с другой – скоростью конвективного отвода объемного заряда. В режиме ламинарного течения скорость ЭГД–течения пропорциональна действующей кулоновской силе, а следовательно, и плотности возникающего избыточного объемного заряда. Поэтому по изменению скорости ЭГД–течений от того или иного электрода, а также по изменению хода кривой вольтамперной характеристики можно судить об увеличении скорости ионообразования у соответствующего электрода.

Таблица 2.1.

Материал электрода	Работа выхода, эВ.		Е _{ср} , эВ
	методом КРП	рекоменд. значения	
Mg	3,6	3,6	0,5
Al	3,4	4,3	0,4
Zn	3,7	4,2	-
Ta	4,0	4,1	-
Pb	3,9	4,0	-
Ti	4,1	4,0	1,9-2,4
Ni	4,3	4,5	-
Ag	4,4	4,3	-
W	4,4	4,5	1,7 - 2
Cu	4,5	4,4	3,2
Pt	4,5	5,3	2,6
Al-Al ₂ O ₃	-	3,9 - 4,3	-
Ti-BaO	-	1,6	-
Cu-CuO	-	2 - 4,3	-
Pt -Al ₂ O ₃	-	3,0	-
W-BaO	-	1,34	-
Ni-KCl	-	1	-
Fe - FeO	-	3,85	-

Видно (табл.2.1), что диапазон изменения работы выхода с поверхности чистых металлов невелик и лежит в пределах от 1,8 эВ у цезия до 6 эВ у платины. При этом щелочные металлы, обладающие наиболее низкой работой выхода, не могут быть использованы в качестве электродов ввиду своей пластичности и повышенной реакционной активности с атмосферным кислородом. Из доступных металлов в качестве электродов целесообразно использовать Al, Ti, Mg, Fe, Cu, Zn, Pb, Ag, Ta, Pt с диапазоном изменения работы выхода от 3,38 эВ для алюминия до 5,3 эВ для платины. Приведенные данные присущи хорошо очищенным поверхностям металлов. В атмосфере при комнатной температуре поверхность многих металлов оказывается покрытой пленкой окислов. Известно также, что эти пленки снижают работу выхода. В табл.2.1, для сравнения, представлены результаты измерения работы выхода в

вакуум с поверхности металлов, покрытых пленкой окислов. Как видим, ряд окислов, например ВаО, существенно снижает работу выхода с поверхности электрода в вакуум. Именно поэтому электроды, покрытые окислами, широко используются, например, в вакуумных электронных лампах.

Наиболее низкие значения работы выхода наблюдаются у химически активных металлов щелочно-земельной группы, окисляющихся на воздухе. Исследования показали, что химически очищенные алюминий и магний, очень быстро стареют в таких жидких диэлектриках, как изооктан и трансформаторное масло. Старение идет различно в разных жидкостях, причиной старения не является кислород, растворенный в жидкости.

Для выяснения роли материала электрода на характер ЭГД-течений в лаборатории электрогидродинамики НИИ радиофизики СПбГУ была проведена серия экспериментов по изучению влияния свойств границы электрод-жидкость, а именно материала одного из электродов в симметричной системе из двух проводов диаметром 0,3 мм и длиной 29 мм, при межэлектродном расстоянии 0,4 мм. В качестве диэлектрической жидкости использовалось очищенное трансформаторное масло проводимостью $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Материалами электродов служили: Mg, Al, Ta, Ti, Cu, Au, Pb, W, Mo, W-Re(10), Nb, Id, Ni. Одновременно с этим осуществлялась запись ЭГД-течения на видеоманитофон с последующим исследованием поля скоростей возникающих ЭГД-течений. Используемая аппаратура позволила помимо автоматической записи вольтамперных характеристик автоматически регистрировать зависимость скорости движения жидкости при подаче пилообразного напряжения. Это позволило сопоставить полученные зависимости в динамике. Диапазон изменения напряжения составил $0 \div 30 \text{ кВ}$. На рис.2.67 представлены вольтамперные характеристики $I(U)$ при двух скоростях роста-спада напряжения $0,61 \text{ кВ/сек}$ и 6 кВ/сек для различных пар электродов.

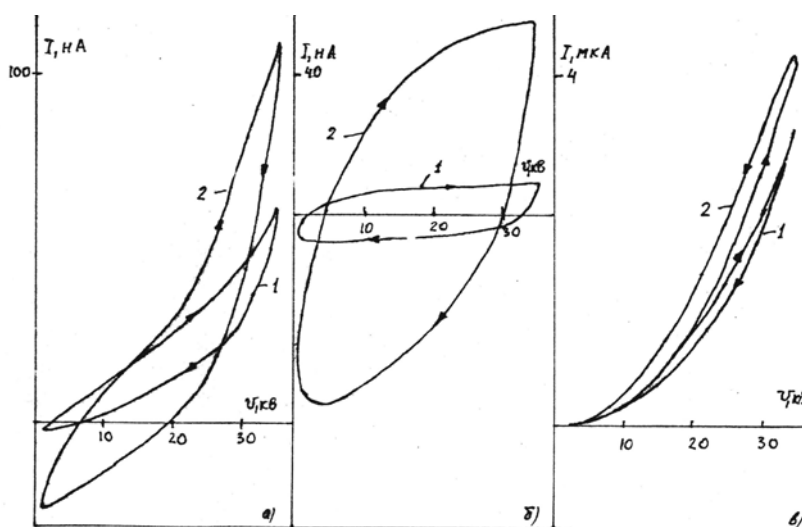


Рисунок 2.67. Динамические вольтамперные характеристики для различных пар анод-катод в очищенном трансформаторном масле.

Видно (рис.2.67), что вид зависимостей тока от напряжения $I(U)$ различен. Для различных пар металлических электродов зарегистрированы три вида петли гистерезиса:

1. направление обхода по часовой стрелке (ниспадающая ветвь лежит ниже возрастающей),
1. направление обхода против часовой стрелки (ниспадающая ветвь петли лежит выше возрастающей),
2. на гистерезисной кривой наблюдается изменение направления обхода (гистерезисная кривая имеет форму восьмерки).

Анализ гистерезисных кривых исследованных пар металлических электродов показал, что максимальные значения скорости и тока наблюдаются в паре $W^- - Ti^+$. Направление обхода против часовой стрелки.

Для пары $W^- - Ta^+$ картина иная. Петля гистерезиса значительно уже, меньше предельные значения токов и скорости. Направление ЭГД-течения от анода к катоду.

Для электродов $Ni^+ - W^-$, ЭГД-течение не имеет выраженного направления, наблюдается постоянное изменение направления течения. Гистерезисная кривая имеет форму восьмерки.

Для пары $W^- - Mg^+$ ситуация более стабильна, при малых напряжениях наблюдается течение от анода к катоду, при более высоких напряжениях направление ЭГД-течения изменяется на обратное. Гистерезис кривых выражен слабо.

Пара $W^- - Pb^+$ показала стабильное течение от катода к аноду. Скорости течения велики, направление обхода кривой гистерезиса скорости по часовой стрелке.

Как показало сопоставление имеющихся данных (табл.2.1) с результатами исследования однозначной связи характера гистерезисных кривых с разницей работ выхода не обнаружено, эта связь носит более сложный характер. Таким образом, поведение пар электродов оказывается непредсказуемым, если использовать для ее оценки только одну величину: разность работ выхода электрона. Как следует из формул (2.13) для оценки такой системы необходимо как минимум пять независимых величин, информация о которых отсутствует.

Переходные процессы и ЭГД-течения в переменном электрическом поле [13,23-26]

Развитие ЭГД-течений при включении напряжения

Исследование процесса развития ЭГД-течений при импульсной подаче напряжения очень интересно, поскольку позволяет судить о скорости проникновения объемного заряда в жидкость, с одной стороны, и о процессе формирования ЭГД-течения – с другой.

Образование объемного заряда в приэлектродной области включает две

стадии: переход электронов с поверхности катода в жидкость и процесс миграции заряда в объем жидкости за пределы прилипшего приэлектродного слоя. После завершения процесса формирования заряженных приэлектродных слоев происходит нарушение их гидродинамической устойчивости, заряженные слои жидкость разгоняются электрическим полем и возникает ЭГД–течение.

Анализ видеозаписи процесса развития ЭГД–течений в системе электродов провод над плоскостью, расположенных на расстоянии 1,2 см при разности потенциалов 5 кВ и длительности импульса 2,5 с, показал:

1. в течение некоторого времени задержки $t_3 = 0,16$ с от момента подачи напряжения жидкость остается неподвижной;
2. с момента t_3 с поверхности проволочного электрода начинает развиваться узконаправленный выброс заряженной жидкости;
3. выброс ускоряется за время, не более чем 0,02 с, на участке не более чем 0,5 мм, после чего движется к противоэлектроду с постоянной скоростью относительно неподвижной в целом окружающей жидкости;
4. по достижении выбросом противоэлектрода происходит его отражение в обратном направлении, приводящее к образованию замкнутого потока. По мере продвижения первого выброса из приэлектродной области развиваются последующие, причем каждый из них движется под некоторым углом к предыдущему, это объясняется неполной нейтрализацией подтекающих потоков жидкости и приводит к некоторому снижению скорости последующих выбросов;
5. появление последующего выброса начинается после рассасывания предыдущего;
6. локальные выбросы жидкости возникают аperiodично в течение всего времени действия импульса напряжения и с течением времени t_1 формируют ячеистый стационарный ЭГД–поток в результате увлечения зарядом первоначально неподвижной окружающей среды;
7. время формирования стационарного ЭГД–течения не превышает $t_1 = 5 \div 10 t_0$ (t_0 – время пересечения одиночным выбросом межэлектродного промежутка);
8. после отключения напряжения наблюдается процесс плавного спада скорости течения, время затухания ЭГД–течения после отключения напряжения в условиях эксперимента не превышает 0,3 с.

На рис.2.68 представлены осциллограммы тока и напряжения на медных электродах в 5 %-м растворе бутилового спирта в трансформаторном масле $\sigma_0 = 10^{-12}$ (Ом·см)⁻¹ и изооктане $\sigma_0 = 10^{-14}$ (Ом·см)⁻¹ при напряжении 5 кВ. Зависимости тока от времени $I(t)$ имеют кратковременные, время переднего фронта $t_{нф} = 10$ мс, всплески, соответствующие переднему и заднему фронтам импульса напряжения, на протяжении остального участка действия импульса ток через кювету остается практически постоянным. При изменении типа жидкости и ее проводимости характер зависимостей $I(t)$ (амплитуда всплеска и время спада тока) не изменяется. Сопоставление зависимостей $I(t)$ с

видеозаписью процессов возникновения ЭГД-течений показывает, что релаксация тока заканчивается значительно раньше возникновения заряженных приэлектродных слоев, а также раньше начала движения заряженных выбросов.

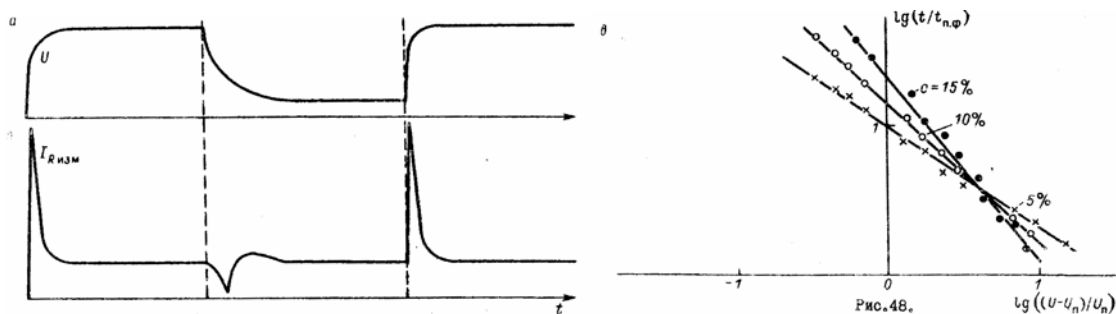


Рисунок 2.68. Осциллограммы напряжения и тока (а), зависимости времени задержки от напряжения в различных жидкостях (б).

На фотографиях (рис.2.69) представлены последовательные, с момента включения ступеньки напряжения, стадии развития ЭГД-течения в 10 %-й смеси бутилового спирта с трансформаторным маслом. Заметное движение жидкости в приэлектродной области наблюдается через некоторое время после подачи напряжения. Движение в первые моменты развивается не в виде целостного потока, а в виде движения отдельной малой области жидкости, движущейся от активного электрода сквозь неподвижную в целом среду (кадры а,б). Через некоторое время из приэлектродного слоя возникает новая заряженная область, движущаяся по несколько отличной траектории (кадры в,г,д).

Затем из приэлектродного слоя образуются следующие заряженные области, формулирующие ячеистое ЭГД течение в межэлектродном промежутке. Описанный механизм формирования ЭГД --течения приводит к постоянной флуктуации направления движения отдельных заряженных областей.

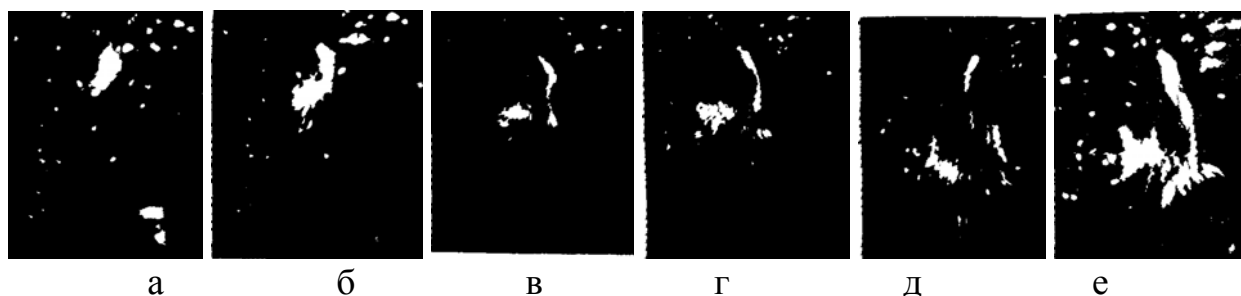


Рисунок 2.69. Процесс формирования ЭГД-течения при подаче ступеньки напряжения. Кадры соответствуют временам: 0,44, 0.60, 0.78, 0.84, 1.24, 1.46 сек.

На рис.2.70 представлена зависимость скорости движения отдельных выбросов через межэлектродный промежуток. Видно, что движение начинается

через 0,2 сек после подачи напряжения. Скорость движения первых трех выбросов плавно падает во времени по мере продвижения их вглубь межэлектродного промежутка по направлению к противозлектроду. Скорость продвижения последующих выбросов испытывает весьма сильные флуктуации, вызванные, по-видимому, прерывистым характером процесса введения объемного заряда с поверхности электрода в жидкость. Следует также отметить, что ускорение жидкости электрическим полем происходит за короткое время не превышающее 40 мсек.

Зависимости скорости от координаты напоминают распределения скорости установившегося ЭГД-течения. При низких напряжениях наблюдается неразвитое ЭГД-течение, когда выброс останавливается внутри межэлектродного промежутка, не достигая противозлектрода. При этом поперечные размеры заряженного выброса, по мере его продвижения, существенно увеличиваются под действием собственного электрического поля, плотность заряда в нем уменьшается, что приводит к его остановке внутри межэлектродного промежутка.

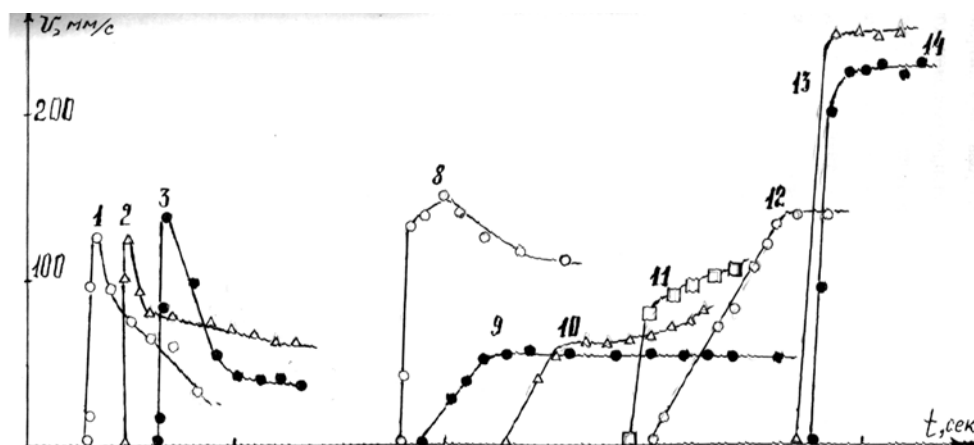


Рисунок 2.70. Динамика развития скорости движения отдельных выбросов после подачи на электроды ступеньки напряжения 5 кВ. Цифры у кривых — номера выбросов в порядке их возникновения.

При более высоких напряжениях время пересечения выбросом межэлектродного промежутка t_1 уменьшается и при $t_1 < t_0 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma$ наступает режим развитого ЭГД-течения, когда распределение скорости становится практически однородным на большей части межэлектродного промежутка, за исключением узкой приэлектродной области, где происходит ускорение жидкости.

Исследование процессов возникновения ЭГД-течений в различных жидкостях и при разных значениях напряжения выявило существенную зависимость времени задержки от параметров жидкости и питающего напряжения. Так при напряжениях, близких к пороговому, время задержки существенно возрастает, а при увеличении напряжения — монотонно падает. С

ростом концентрации бутилового спирта околопороговые значения времени задержки возрастают с ростом напряжения. Изучение зависимости времени задержки t_3 от напряжения и от низковольтной проводимости жидкости показало, что с высокой степенью повторяемости t_3 является степенной функцией напряжения. Получена эмпирическая формула, связывающая t_3 с основными параметрами среды:

$$t_3 = t_0 \left[\frac{U_n}{U - U_n} \right]^k.$$

Здесь U , U_n – напряжение на электродах и пороговое напряжение. Значения k , t_0 и U для 5, 10 и 15 %-х смесей бутилового спирта с трансформаторным маслом представлены в табл.2.2.

Таблица 2.2.

Содержание бутанола	U_n , кВ	t_0 , с	k	v , сСт	σ_0 , (Ом·м) ⁻¹
5%	1,6	0,1	0,65	25	$2 \cdot 10^{-10}$
10%	1,2	0,15	0,9	22	10^{-9}
15%	1,1	0,22	1,15	18	$3 \cdot 10^{-9}$

Время задержки, в соответствии с ионизационно-рекомбинационным механизмом возникновения ЭГД–течений, характеризует время проникновения заряда с поверхности электрода в приэлектродных слое жидкости. При подаче ступеньки напряжения с поверхности металлического электрода в жидкость проникает заряд, движущийся в первоначально неподвижной приэлектродной области со скоростью $v = b \cdot E$. Этот заряд за время t_3 проникает на расстояние

$$h = v_u t_3 = bE \left[\frac{U_n}{U - U_n} \right]^k.$$

Используя результаты, представленные в табл.2.2, получим, что диапазон изменения h для 5 %-го раствора составляет $0,12 \div 0,25$ мм при $U = 1 \div 15$ кВ. Эта величина соответствует размеру заряженных приэлектродных структур, обнаруженных зондовым методом.

Итак, для возникновения ЭГД–течений необходимо проникновение заряда на вполне определенную глубину от поверхности электрода, т.е. создание вокруг электрода заряженного слоя жидкости, толщина которого достаточно слабо зависит от напряжения, а определяется, по-видимому, энергией взаимодействия жидкости с поверхностью электрода. Нарушение устойчивости приэлектродных слоев происходит в виде отдельных

капелеобразных выбросов заряженной жидкости из приэлектродных слоев в межэлектродный промежуток.

Таким образом, в результате исследований установлен аperiodический дискретный характер нарушения ЭГД–устойчивости приэлектродных областей, происходящий с некоторой задержкой относительно момента подачи импульса напряжения. Установлена взаимосвязь времени задержки с параметрами жидкости, электродной системы и напряжением питания.

ЭГД-течения в переменном поле

Вопрос о существовании ЭГД-течений в переменном электрическом поле представляется проблематичным, прежде всего по той причине, что ЭГД–течение является однонаправленным движением заряженной жидкости. Заряженный элемент жидкости, находящийся внутри межэлектродного промежутка, не может изменить ни величину, ни знак заряда, так как в межэлектродном промежутке нет ни источников, ни стоков заряда. Поэтому под действием переменного электрического поля такой элемент жидкости может совершать только колебательное движение. Чтобы появилось течение, система электрод–жидкость должна обладать вентильными свойствами. Эти свойства могут появиться, например, вследствие разной скорости приэлектродных реакций у анода и катода. Тогда в течение одного полупериода в среду будет вводиться объемный гомозаряд у активного электрода, который под действием поля вызовет движение жидкости к противоэлектроду. В течение следующего полупериода электрические силы имеют противоположное направление, но действие их на элемент ослаблено, так как напряженность поля уменьшается по направлению к противоэлектроду. Таким образом, появляется постоянная составляющая сил, вызывающих направленное движение среды. Исследования показали, что послепороговая стадия ЭГД–течений характеризуется тем, что область их существования локализована в окрестности активного электрода. Здесь наблюдаются мелкомасштабные быстрые вихри. По мере повышения напряжения область локализации течения постепенно расширяется и охватывает весь межэлектродный промежуток (развитое течение). Если при фиксированном напряжении изменять частоту, то оказывается, что размеры области локализации течения являются функцией частоты. По-видимому, одним из условий существования ЭГД–течений в переменном поле является неравенство $\omega \ll \omega_0$ (ω_0 – собственная частота). В случае $\omega \gg \omega_0$ среда может рассматриваться как идеальный диэлектрик, и течения в ней невозможны.

Исследования проводились в группе смесей трансформаторного масла с бутиловым спиртом и йодом, обладающих различными электрофизическими свойствами. Это позволило изменять собственную частоту рабочей среды в достаточно больших пределах: от 1 Гц до 10 кГц. Как и в постоянном электрическом поле, течение фотографировалось при введении пузырьков,

кроме того, измерялись постоянная и переменная составляющие тока, а также напряжение на ячейке. Оказалось что структура ЭГД–потоков в переменном электрическом поле только при частотах внешнего поля, лежащих ниже собственной частоты жидкости, внешне похожа на ЭГД–течения в постоянном поле. В жидкостях, собственная частота которых $\omega_0 \sim \omega$ структура ЭГД–течения существенно изменяется. Линии тока в центральной струе ЭГД–течения в этом случае уже не взаимно параллельны, как в постоянном поле, а веерообразно расходятся от активного электрода к пассивному. На фоне направленного движения жидкости от активного электрода к пассивному наблюдаются мелкомасштабные быстрые вихри, локализованные, в основном, у активного электрода. Время кругового обращения жидкости в этих вихрях соответствует частоте внешнего электрического поля. В жидкостях, собственная частота которых меньше или близка к частоте питающего напряжения, наблюдалось два вида ЭГД–течений. При малых напряжениях, меньших некоторой критической величины $U_{кр}$ наблюдались медленные течения жидкости по направлению к лезвиеобразному электроду, т.е. в область концентрации поля, а при более высоких напряжениях от него.

В переменном электрическом поле ЭГД–течения имеют ряд особенностей. Как показали визуальные наблюдения, порог возникновения течений зависит от частоты питающего напряжения.

На рис.2.71 представлена зависимость порогового напряжения от частоты питающего напряжения. Начало движения определялось путем визуальной регистрации возникновения течений. Собственная частота этой жидкости равна 20 Гц, т.е. лежит на нижней границе исследованного частотного интервала. Видно, что с увеличением частоты величина порогового напряжения возрастает.

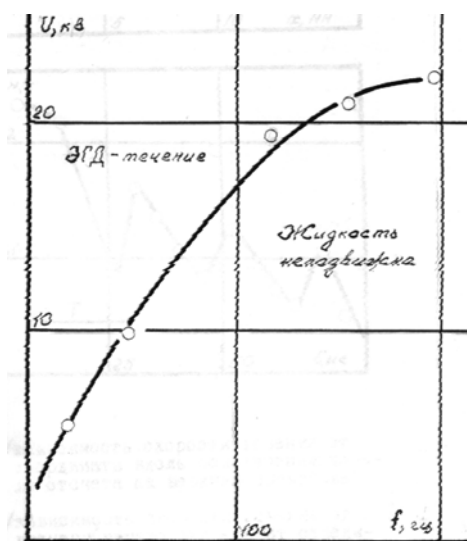


Рисунок 2.71. Зависимость порога возникновения ЭГД–течений от частоты питающего напряжения.

При низких частотах линии тока ЭГД-течения напоминают гипоциклоиду неправильной формы. Время прохождения каждой ветви примерно соответствует периоду питающего напряжения. На рис.2.72 представлены типичные осевые распределения скорости течения в центральной струе при переменном поле. Распределение резко отличается от аналогичных, полученных в постоянном электрическом поле. Зависимости скорости от координаты вдоль оси течения (рис.2.72, а) носят периодический характер с быстроубывающей амплитудой. На рис.2.72, б, для сравнения, представлена та же зависимость, однако, в качестве переменной вместо координаты выбрано время.

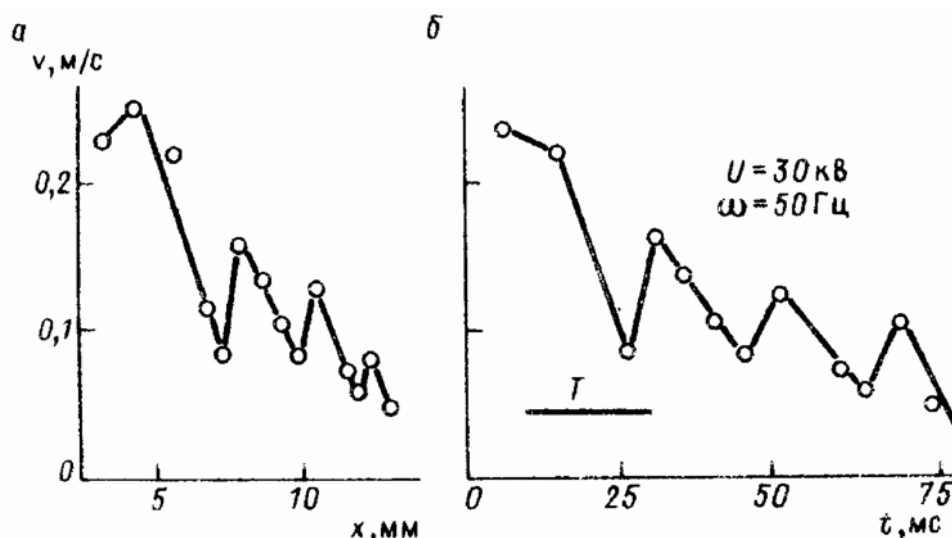


Рисунок 2.72. Распределение скорости течения вдоль линии тока (а) и зависимость скорости течения от времени (б).

Видно, что наряду с поступательной составляющей скорости, присутствует колебательная составляющая скорости, амплитуда которой достигает 50 % от поступательной. Зависимость колебательной составляющей скорости имеет периодический характер, период соответствует периоду питающего напряжения.

Периодическая компонента скорости свидетельствует о наличии периодической составляющей действующих кулоновских сил. В течение одного полупериода они положительны, тогда жидкость ускоряется полем, в течение следующего полупериода кулоновские силы отрицательны – жидкость замедляется.

Зависимость скорости инжекции заряда в приэлектродную область, по-видимому, зависит от полярности приложенного напряжения; в течение одного полупериода заряда вводится больше, чем в течение следующего, и, следовательно, течение должно обладать вентильными свойствами.

Наличие периодической составляющей действующих кулоновских сил приводит к появлению мелкомасштабных завихрений жидкости, проявляющихся на линиях тока в виде периодических завитков, напоминающих

ветви гипоциклоиды.

На рис.2.73 представлены вольтамперные характеристики для двух жидкостей, измеренные одновременно с фотографированием ЭГД-течений, полученные по переменному и постоянному току. Видно, что по переменному току с большой степенью точности соблюдается закон Ома. По постоянному току имеют место существенные отклонения от этого закона, вызванные конвективной составляющей тока. Следует отметить, что ЭГД-течения в переменной поле, как и в постоянном, направлено от острия к противоэлектроду. В этом же направлении идет перенос избыточного объемного заряда. Поэтому конвективный ток обладает вентиляльными свойствами и может иметь лишь постоянную либо низкочастотную пульсирующую составляющую.

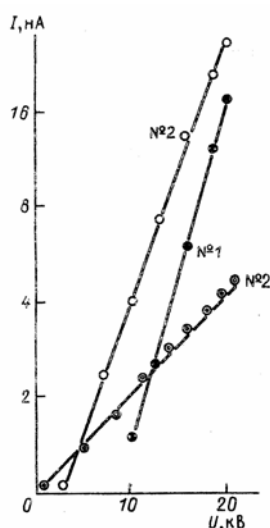


Рисунок 2.73. Вольтамперные характеристики по постоянному току жидкостей №1 (●) и №2 (○) и по переменному току жидкости №2 (⊕).

По постоянной составляющей закон Ома не соблюдается. Оказалось, что постоянная составляющая пропорциональна квадрату напряжения на электродах.

На рис.2.74 представлены зависимости скорости в центральной струе ЭГД-течения от разности потенциалов на электродах, в жидкости №1 (а) и в жидкости №2 (б). Жидкости подобраны таким образом, что их времена максвелловской релаксации различаются более чем в 100 раз. Это позволило в рамках имеющегося частотного диапазона $\omega \sim 20 \div 400$ Гц изменять диапазон относительной частоты ω/ω_0 , соответственно, от 0,008 до 0,16 и от 1 до 40. Таким образом, эксперименты охватывали как область квазистационарных процессов $\omega \ll \omega_0$, так и область диэлектрического приближения $\omega \gg \omega_0$.

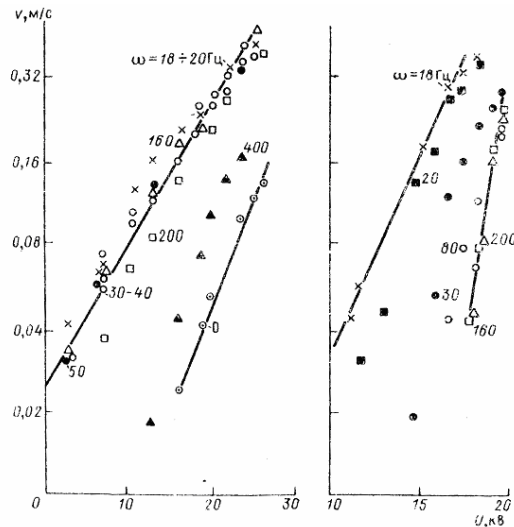


Рисунок 2.74. Зависимости скорости в центральной струе ЭГД-течения от разности потенциалов на электродах, в жидкости №1 (слева) и в жидкости №2 (справа) для различных частот.

Кривые имеют типичный вид независимо от вида исследованной жидкости. Для жидкости №1 они лишь несколько сдвинуты в область более высоких напряжений. Как и для постоянного тока, прослеживаются два участка: неразвитого течения и развитого. На рис.2.74, слева представлена зависимость $v = f(U)$ для постоянного тока. Эта зависимость лежит несколько ниже по шкале скоростей. Таким образом, ЭГД-течения переменного тока в жидкости №2 более интенсивны, чем течения постоянного тока. В то же время в жидкости №1 скорость течения при постоянном электрическом токе значительно выше.

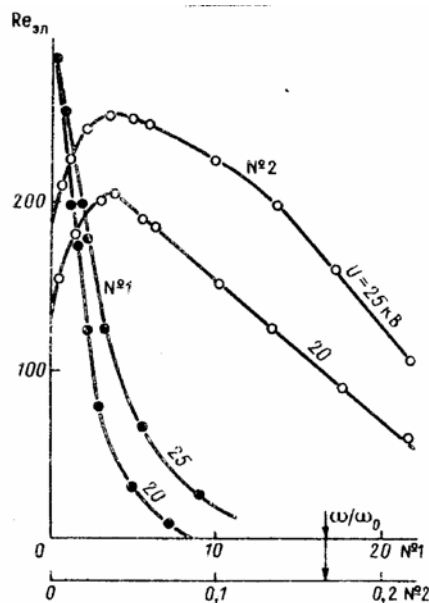


Рисунок 2.75. Зависимости скорости в центральной струе ЭГД-течения от частоты питающего напряжения в жидкости №1 и в жидкости №2.

На рис.2.75 представлены зависимости скорости ЭГД–течений от частоты питающего напряжения, построенные для двух фиксированных значений напряжения 20 и 25 кВ. В жидкости №1 ($\omega_0 = 20$ Гц) наблюдается быстрый спад скорости течения в диапазоне ω/ω_0 от 1 до 40. В жидкости №2 ($\omega_0 2500$ Гц) наблюдается сравнительно медленный линейный спад скорости течений с увеличением частоты питающего тока. В диапазоне относительных частот $\omega/\omega_0 = 0,008 \div 0,16$ скорость течений при постоянном напряжении значительно ниже. Поэтому при дальнейшем уменьшении частоты ниже $\omega < \omega_0$ следует ожидать максимума зависимости $v = f(\omega)$.

Итак, анализ зависимостей $v = f(\omega)$ показывает, что при высоких напряжениях можно рассматривать жидкости как идеальные диэлектрики, в которых не возникают ЭГД–течения, только если выполняется условие $\omega \gg \omega_0$. При выполнении условия $\omega \ll \omega_0$ течения в переменном поле приближаются по виду к течениям в постоянном поле, но имеют наряду с поступательной колебательную компоненту, и могут быть более интенсивными, чем течения в постоянном поле.

Таким образом, анализируя полученные результаты исследования возникновения ЭГД–течений при импульсной подаче напряжений, следует ввести в качестве критерия возникновения ЭГД–течений в переменном электрическом поле не неравенство $\omega < \omega_0$ ($T > \tau = \epsilon\epsilon_0/\sigma_0$), а неравенство $\tau_3 > T$, ибо не релаксация введенного в жидкость заряда, а процесс формирования приэлектродных заряженных структур определяет возникновение ЭГД–течений в жидких диэлектриках.

Литература

1. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. //Физические основы электрогидродинамики // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979
2. Остроумов Г.А. Некоторые гидродинамические явления, сопровождающиеся прохождением тока через изолирующие жидкости // Журнал экспериментальной и технической физики, 1956, Т.30, вып. 2, с.282-286.
3. Мяздриков О.А. Импульсный метод гранулометрического анализа.— Заводская лаборатория, 1964. 30, № 5, 584—586.
4. Мяздриков О.А. Датчик объемной гранулометрии.— Заводская лаборатория, 1965, 31, № И, с. 1402—1404.
5. Екимова Н.Ф., Мяздриков О.А., Николаев О.С, Орлов П.Н. К вопросу механического возбуждения люминесцентных панелей.— Электронная техника: серия I, Электроника СВЧ, 1966, № 12, с. 107 — 111.
6. Felsenthal P., Vonnegut B. Enhanced charge transfer in dielectric fluids containing conducting particles.— Brit. J. Appl. Phys., 1972, 12, p. 1801-1806.
7. Стишков Ю.К. Движение металлических шаров в слабопроводящих

- жидкостях под воздействием неоднородного электрического поля.— ЭОМ, 1974, № 4 (58), с. 44—51.
8. Либер В.А. К вопросу о динамике металлических включений в слабопроводящей жидкости при наложении однородного электрического поля.— ЭОМ, 1971, № 5 (41), с. 30 — 35.
 9. Мелчер Дж. Р., Электрогазодинамика// Магнитная гидродинамика. N 2.1974. с.3-30.
 - 10.Рубашов И.Б., Бортников И.С. Электрогазодинамика. – М.: Атомиздат, 1971. 167 с.
 - 11.Felici N.J D.C. conduction in liguid dielectrics. II// Divet current. 1971. Vol. 2. N 12.
 - 12.Болога М.К., Гроссу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977. 265с.
 - 13.Стишков Ю.К. Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л: Издательство ЛГУ, 1989. 174 с.
 - 14.Петриченко Н.А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях: Автореф. канд. дис. Л., 1973.
 - 15.Янтовский Е.И., Апфельбаум М.С. О насосном действии тонкого высоковольтного электрода в слабопроводящей диэлектрической жидкости. //Журнал технич.физики, 1980. Т.50. » 7. с.16II-I520.
 - 16.Апфельбаум М.С., Янтовский Е.И., О силе, действующей на игольчатый электрод, и вызываемых ею течениях// Магнитная электродинамика. N 4. 1977. с. 35 – 38.
 - 17.Апфельбаум М.С., Полянский В.А. Об образовании объемного заряда в слабопроводящих средах// Магнитная электродинамика. N 1. 1982. с. 40 – 48.
 - 18.Апфельбаум М.С. Течения слабопроводящих жидких диэлектриков в неоднородном электрическом поле. Автореф. канд. дис. Долгопрудный, 1986.
 - 19.Жакин А.И. О неизотермической электроконвекции// Изв. АН СССР. Сер. – Механика жидкостей и газа. N 2. 1980 с. 27 –32.
 - 20.Жакин А.И. Редокс – системы в электродинамике и расчет электроконвективных течений//Магнитная электродинамика. N 2. 1982. с. 37 – 40.
 - 21.Гогосов В.В., Полянский В.А. Электродинамика: задачи и приложения, основные уравнения, разрывные решения. Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. Т. 10. – М.: ВИНТИ, 1976. с. 5 –72.
 - 22.Л.В. Гурьвич, Г.В. Карачевцев, В.Н. Кондратьев и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону/– М.: Наука, 1974. 351 с.
 - 23.Пуяц В.В. Электроконвекция при импульсном электрическом поле.- ЭОМ, 1971, № 6 (42), с. 44-50.
 - 24.Пуяц В.В. О физической аналогии явлений тепловой и электроконвекции.— ЭОМ, 1973, № 2 (50), с. 34—36.

25. Стишков Ю.К. Электрогидродинамическая модель проводимости изолирующих жидкостей: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ. мат. наук. ЛГУ., 1971.
26. Стишков Ю.К. Нелинейное взаимодействие электрического поля с жидкой слабопроводящей средой. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ. мат. наук. ЛГУ., 1986.
27. Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности кинематической структуры электрогидродинамического течения в системах электродов “провод-провод” и “провод-плоскость” // ЖТФ, 2003, том 73, вып. 8. С. 34-39.
28. Буянов А.В., Стишков Ю.К. Исследование зависимости структуры течения от радиуса активного электрода // ЖТФ.
29. Стишков Ю.К., Павлейно М.А. // Электронная обработка материалов, 2000, №1. С. 14–21.
30. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Стишков Ю.К. Полуавтоматический метод компьютерной обработки поля скоростей ЭГД-течений // Электронная обработка материалов, 2007, № 1 (243). С. 24-30.
31. Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов // ЖТФ, 2004, том 74, вып. 8. С. 120-123.
32. Стишков Ю.К., Павлейно М. А., Буянов А. А., Статуя А. А., Елагин И. А. Использование современных компьютерных технологий в электрогидродинамике. // Сборник тезисов Региональной VIII конференции по распространению радиоволн, 2002. С. 41.
33. И.А.Елагин, Ю.К.Стишков Зона рекомбинации ЭГД-течений в системе провод-провод, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006, г. Санкт-Петербург
34. Ю.К.Стишков, В.А.Чирков Особенности зонной структуры ЭГД-течений в системе игла над плоскостью, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006, г. Санкт-Петербург
35. Чирков В.А. Физический факультет СПбГУ, Бакалаврская работа, 2007.