



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, Ю.К.Стишков**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ  
Раздел 4. ЭГД-устройства**

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, Ю.К.Стишков**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.  
РАЗДЕЛ 4. ЭГД-устройства – 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 рассмотрены вопросы создания электрогидродинамических преобразователей и насосов, критерии выбора геометрии, свойств электродной системы и примесного состава жидкости. Рассмотрены проблемы фильтрации и интенсификации теплообмена при помощи ЭГД-эффектов. Уделено внимание проблеме электрокаплеструйных устройств и проблемам электрогидроакустического преобразования. 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
ЭГД–устройства.....	4
Введение .....	4
Конструктивные усовершенствования электродной системы типа «провод–провод» для повышения интенсивности ЭГД–течений и ослабления выноса заряда за пределы межэлектродного промежутка [3-15].....	12
Влияние проводимости стенок канала на работу ЭГД–преобразователя .....	22
Циклический ЭГД-преобразователь.....	26
Компьютерное моделирование работы циклического ЭГД насоса в симметричной системе электродов .....	30
Решение электростатической и гидродинамической части задачи, принятые приближения.....	31
Граничные условия. Задание нагрузок .....	32
Анализ решения электрической задачи .....	32
Анализ решения гидродинамической задачи.....	33
Выводы.....	35
Обратный ЭГД–эффект.....	35
Физический механизм обратного ЭГД–эффекта.....	35
Основные свойства обратного ЭГД–эффекта .....	36
Исследование процессов старения активированных электродов.....	44
Старение активированных электродов, в изооктане, находящемся в контакте с атмосферным воздухом.....	44
Старение электродов в обезгаженной жидкости .....	45
Консервация поверхности электродов.....	45
Исследование работы ЭГД–насоса типа игла–конфузор [4,11-15,38].....	46
Влияние объемного заряда на процесс диспергирования жидкости в электрическом поле [15,39-42].....	54
ЭГД–распыление диэлектрической жидкости [15].....	59
ЭГД–фильтрация .....	66
Влияние ЭГД–течений на теплообмен в жидкости .....	69
Влияние нагревания или глубокого охлаждения активного электрода на кинематику ЭГД–течений.....	69
Исследование интенсификации теплообмена в конструкции теплообменника теплового насоса .....	75
Результаты измерений .....	77
Электрогидроакустические преобразователи [3].....	80
Литература .....	85

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

## Раздел 4

### ЭГД–устройства

#### Введение

Попытки использовать основные свойства явлений, которые возникают в жидких диэлектриках при прохождении электрического тока, в прикладных целях делались давно. По мере изучения электрогидродинамики (ЭГД) интерес к техническому применению результатов исследования этих явлений усилился. Это связано с технологической простотой этих устройств, их способностью работать в условиях невесомости, отсутствием движущихся и трущихся деталей и широким использованием жидких изолирующих сред: это разные ионно-конвективные насосы, ЭГД–генераторы, устройства автоматики и т.д. Техническое применение этих устройств «тормозилось» неполнотой и противоречивостью физических представлений о жидких диэлектриках и механизме развития ЭГД–течений.

В 60-80-х годах прошлого столетия, возникло намерение непосредственного практического применения электрогидродинамических течений в технических устройствах. В Советском Союзе оно проявилось на уровне научно-исследовательских работ (НИР) в форме хоздоговоров, которые инициировались со стороны военно-промышленного комплекса (ВПК), космической и электротехнической промышленности. Задача ставилась о разработке устройств, способных доставлять жидкие диэлектрики в качестве теплоносителя к теплообменным поверхностям тепловыделяющих объектов с целью обеспечения заданных тепловых режимов бортовых приборов и высоковольтного маслонаполненного оборудования электрических сетей.

Устройства, которые способны выводить ЭГД–течения из зоны силового воздействия электрического поля за пределы межэлектродного пространства и доставлять жидкий диэлектрик по замкнутому гидравлическому контуру к обслуживаемым объектам – чаще всего называют электрогидродинамическими насосами (ЭГДН).

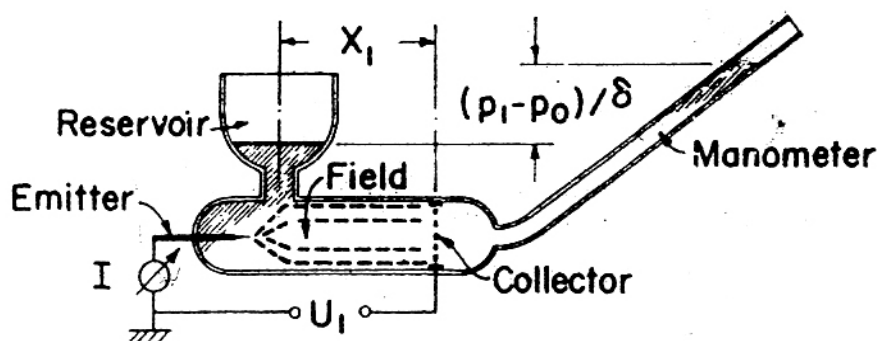
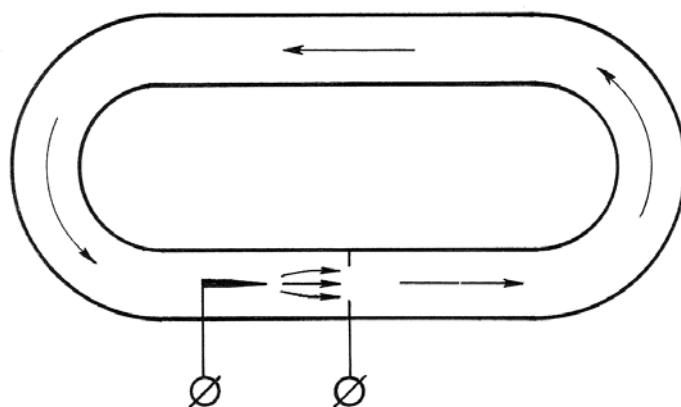


Рисунок 4.1. ЭГДН в открытом гидравлическом контуре.

В 1959 году Штуцер [1] разработал такие устройства для разомкнутого гидравлического контура (рис.4.1) и экспериментально доказал возможность создания избыточного давления таким течением, а значит и выхода течения жидкости за пределы межэлектродного пространства, обнаружив перепад давления на трубчатом манометре.

В 1960 году он построил такой же ЭГД–насос [2] в замкнутый гидравлический контур (рис.4.2), заполненный разного рода жидкими диэлектриками, и исследовал его работу в режиме циркуляции текучей среды по контуру.



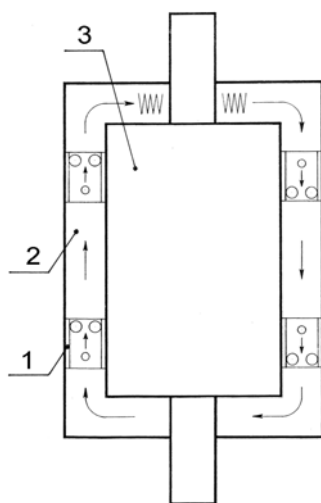
*Рисунок 4.2. ЭГДН в замкнутом гидравлическом контуре.*

Преимущества ЭГД–насосов, в сравнении с механическими насосами, заключаются, прежде всего, в том, что они непосредственно преобразуют энергию электрического поля в механическую энергию жидкого диэлектрика. Они не имеют движущихся деталей, обладают свойствами многообразия конструктивных типов и форм исполнения [10,11,17], хорошо адаптируются к обслуживаемым изделиям и их элементам [17], имеют малое гидравлическое сопротивление, легко управляются [19], имеют высокий эксплуатационный резерв работы [20], не требуют сложной технологии изготовления и дефицитных материалов.

ЭГД–насосы могут быть использованы как для обслуживания удаленных объектов охлаждения, объединенных магистральным трубопроводом различной степени сложности, так и в приборостроении, где может возникнуть необходимость использовать локально-автономные системы охлаждения непосредственно связанные с отдельным объектом.

В этом случае объект охлаждения окружают «гидравлической рубашкой» (рис.4.3) и полностью заполняют жидким диэлектриком–теплоносителем. В стесненных условиях целевых каналов «гидравлической рубашки» ранее перечисленные свойства ЭГД–насоса, могут быть реализованы в полной мере. Эти свойства ЭГД–насосов были учтены при разработке объекта охлаждения (термостатирования) [19], в котором должна быть обеспечена независимость

заданного интервала отклонения температурного поля от оптимального уровня при произвольно изменяющемся положении объекта в пространстве, находящемся под воздействием некоторого набора внешних возмущений.



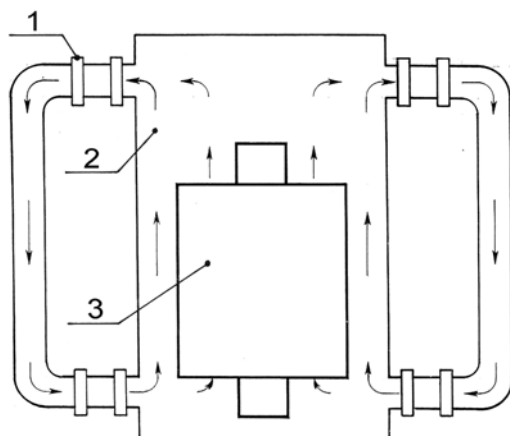
**Рисунок 4.3.** Схема ЭГД-термостата: 1 – ЭГДН, 2 – теплоноситель, 3 – Объект охлаждения (термостатирования).

Магистральные ЭГД-насосы электрохимического типа [10,11,18] (рис.4.4) могут быть использованы для обслуживания не только малоразмерных объектов, характерных для приборостроения, но и для крупногабаритных, характерных для электротехнической промышленности, например, силовых трансформаторов (рис.4.5). Тепловое состояние силовых трансформаторов существенно влияет на их надежность и эффективность работы, которые может успешно контролировать с помощью ЭГД-насосов.



**Рисунок 4.4.** Схема магистрального ЭГД-насоса.

Коэффициент полезного действия для некоторых образцов ЭГД-насосов достигает величины порядка 20 %.



**Рисунок 4.5.** Схема системы охлаждения силового трансформатора: 1 – ЭГД-насос, 2 – масло, 3 – объект охлаждения (обмотки трансформатора).

Реальные конструкции ЭГД-насосов, довольно просты – они содержат корпус из изолирующего материала, систему электродов и т.п. потокоограничивающие вставки, играющие роль гидродинамических формирователей направленного течения. Наиболее распространенной конструкцией ЭГД-насоса является система типа игла-кольцо, предложенная Штютцером и оказывается, как будет показано далее, довольно неудачной. По мнению разработчиков, механизм работы этих конструкций насосов аналогичен работе соответствующих устройств в газах: у острия игольчатого электрода возникает аналог «короны», вызывающей направленное движение жидкости. Такая система должна работать в любой слабопроводящей жидкости, откуда и название ЭГД-насос, нередко с припиской «для перекачки слабопроводящих сред» [1,2].

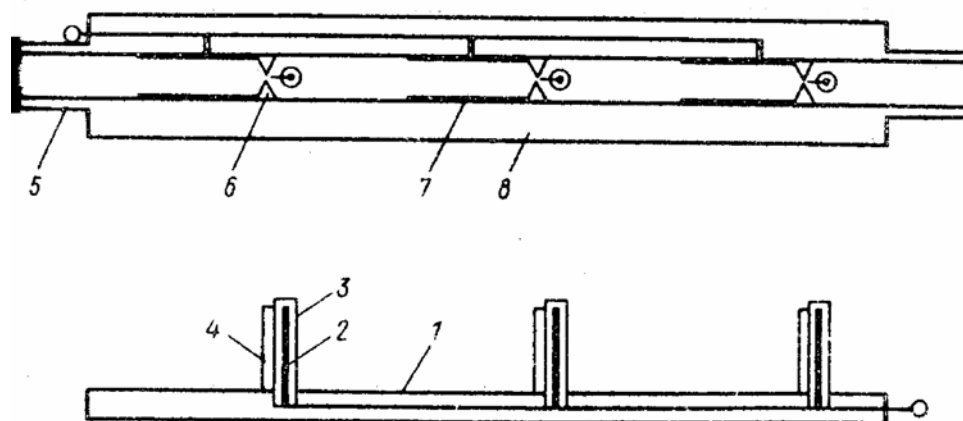
Конструктивные особенности различных устройств обычно связаны с изменением формы и размещения электродов.

Как будет показано далее, одна и та же конструкция ЭГД-насоса может совсем по-разному работать в жидкостях, различающихся составом примесей или материалом электродов. Детальное описание реальных свойств ЭГД-течений показывает, что в большинстве случаев течения реализуются в окрестностях межэлектродного промежутка – внутренние вихри, куда подается достаточно высокое, до 50 кВ, напряжение. Поэтому использование таких течений сопряжено с повышенной опасностью.

Как уже отмечалось выше, основной проблемой ЭГД-преобразования является получение однонаправленного движения среды. Наблюдения показали, что в реальных конструкциях ЭГД-преобразователей большая часть энергии идет на образование внутренних вихрей. Далее приводятся, в основном, результаты оригинальных конструкций ЭГД-насосов и их исследований, выполненных в лаборатории электрогидродинамики НИИРФ ЛГУ (СПбГУ).

ЭГД–насосы выгодно отличаются от электромеханических полным отсутствием трущихся и движущихся элементов, а, следовательно, высокой надежностью и полной бесшумностью в работе. Кроме того, они компактны и просты в изготовлении. ЭГД–насосы удобно использовать в теплообменниках, а также устройствах пневмоавтоматики, где в качестве теплоносителя можно применять слабопроводящие жидкости. Во всех этих устройствах желательно использовать течения жидкости в некотором внешнем контуре, вдали от места подключения высокого напряжения. Как показали исследования, выведение ЭГД–течения за пределы межэлектродного промежутка представляет сложную задачу, для решения которой необходима информация о физике ЭГД–процессов.

Классический вид конструкции ЭГД–насоса типа «лезвие – две параллельные пластины» представлен на рис.4.6. Эта система является аналогом системы «игла – кольцо», но для повышения производительности и упрощения геометрии течения вместе игольчатого электрода использован лезвиеобразный электрод (4), а вместо кольца – две параллельные пластины (7).



**Рисунок 4.6.** Классический вид ЭГД–насоса типа «лезвие–две параллельные пластины». Подробное описание представлено в тексте.

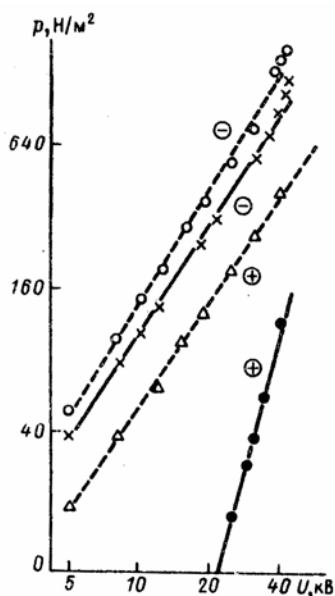
Конструктивно насос выполнен в виде канала прямоугольного сечения (1, 8) из плексигласа, в котором размещены три секции насоса, включенные, в зависимости от расположения и питания, последовательно – гидродинамически и параллельно – электрически. В предложенной конструкции эмиттерные и коллекторные электроды разделены коническими потокоограничивающими вставками (6) из плексигласа, предназначенными для устранения внутренних вихрей. Эмиттерные электроды укреплены на изолирующей пластине (5) при помощи медных штырей (2), изолированных полиэтиленовой трубкой (3). Лезвия (4) выполнены из режущей части бритвы и подпаяны к штырям.

На рис.4.7 представлены в билогарифмическом масштабе зависимости статического давления, измеренные в увлажненном трансформаторном масле  $\sigma_0 = 10^{-12}(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$  (сплошная линия) и в смеси очищенного трансформаторного



масла с йодом ( $c = 10^{-4} \text{ г/см}^3$ ) (пунктирная линия). Зависимости получены как для положительной, так и для отрицательной полярности напряжения, подаваемого на лезвиеобразные электроды. Видно, что с увеличением напряжения давление пропорционально квадрату напряжения. Весьма существенны полярные различия и их зависимость от состава и свойств среды, особенно ярко они проявляются в увлажненном трансформаторном масле.

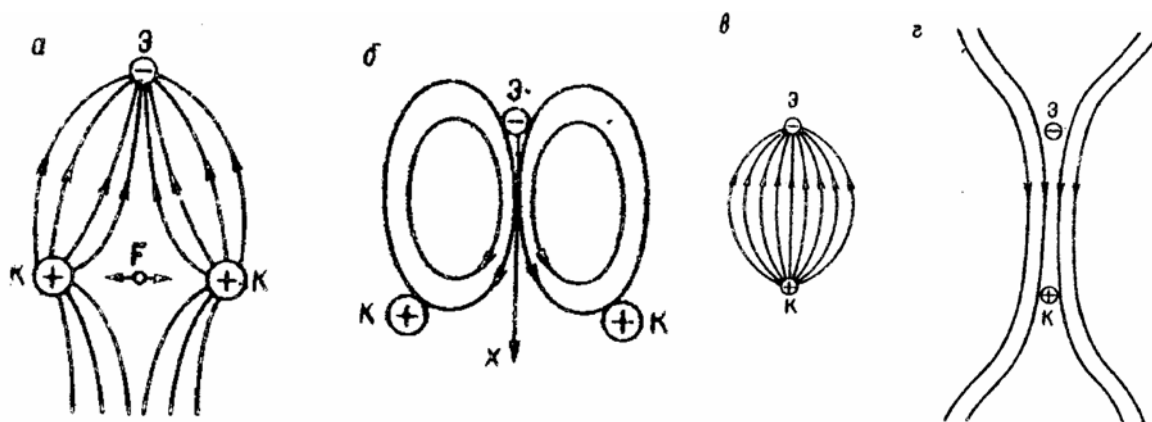
Исследование модели ЭГД–насоса, построенной по аналогии с классическими образцами, показало, что ее расходные и статические характеристики существенно зависят от электрофизических свойств исследуемой жидкости. Наблюдение ЭГД–течений в изготовленной конструкции выявило возникновение интенсивных внутренних вихрей внутри каждой отдельной секции насоса и позволило установить, что скорость течения жидкости во внешнем контуре много меньше скорости течения во внутренних вихрях.



**Рисунок 4.7.** Зависимость статического давления от подаваемого на электроды напряжения в увлажнённом трансформаторном масле (сплошная линия) и в очищенном трансформаторном масле с йодом (пунктирная линия) для разных полярностей подаваемого напряжения. Полярность обозначено знаком в круге.

Как известно, ЭГД–течение является следствием эффекта преобразования энергии движения ионов, т.е. электрического тока, в энергию механического движения среды. Электрический ток протекает лишь в пределах межэлектродного промежутка, а движение жидкости часто необходимо вывести за его пределы. Для этого следует устранить причины, способствующие замыканию течения между электродами. Одним из основных факторов является конфигурация силовых линий электрического поля внутри межэлектродного промежутка. На рис.4.8, а показана конфигурация силовых линий

электрического поля в системе электродов «провод–два параллельных стержня» (аналог системы «игла–кольцо2), а на рис.4.8, б – линии тока ЭГД–течения, соответствующего выбранной системе электродов.



**Рисунок 4.8.** Силовые линии (а,в) и линии тока жидкости (б,г) в системах электродов провод–два параллельных стержня (а,б) и провод–проволока (в,г).

Элемент жидкости, получивший заряд у эмиттера, движется под действием сил поля вдоль оси, проходящей через середину промежутка между коллекторами. По мере продвижения к противоэлектродам на этот элемент будет действовать составляющая сил, нормальных к оси  $x$ , растягивающая жидкость к электродам  $K-K$  (на рисунке показана стрелками). Под действием этой составляющей силы элемент получает ускорение в направлении, нормальном к оси  $x$ , центральная струя течения раздваиваются, образуя замкнутые ячейки внутри межэлектродного промежутка. Таким образом, система электродов «провод – два стержня» обладает расфокусирующим действием, способствующим образованию внутренних вихрей [3-11]. Расфокусирующее действие системы электродов «игла – кольцо» выражено еще сильнее.

Более удачной является система электродов «провод – провод». На рис.4.8, в, г изображена картина силовых линий поля в электростатическом приближении и картина тока ЭГД–течения. В этом случае электрическое поле обладает фокусирующим эффектом, т.е. течение концентрируется в направлении оси  $x$ . Поэтому в такой системе электродов устранены причины, способствующие образованию внутренних вихрей.

В системах типа «игла – кольцо», «игла – сетка» определяющим является геометрический фактор: площадь коллектора существенно больше площади эмиттера. При работе с фокусирующей системой электродов учет этого фактора можно реализовать путем увеличения диаметра коллектора, но это существенно повысит его гидродинамическое сопротивление. Лучше всего для повышения эффективной площади коллектора использовать форму профилированного тела. Это, с одной стороны, позволит существенно увеличить площадь поверхности, контактирующей с жидкостью, а с другой – снизит

гидродинамическое сопротивление. Кроме того, благодаря растянутой в направлении тока жидкости форме электрода обеспечивается увеличение времени контакта текущей жидкости с электродом, что также должно способствовать росту производительности насоса.

Как показали исследования, интенсивность зарядообразования, а, следовательно, и скорость ЭГД–течения существенно зависят от свойств границы электрод–жидкость. Было выявлено, что путем изменения состава и концентрации примесей в жидкости, а также изменением материалов электродов и их покрытия можно эффективно управлять не только скоростью, но и направлением ЭГД–течения, а также их структурой. Испытания классических конструкций ЭГД–насосов типа «игла – кольцо», «лезвие – пластина» также выявили определяющее влияние примесного состава жидкости на работу ЭГД–насоса.

Следуя этим данным, мы предлагаем ввести понятие «ЭГД–преобразователь», но не насос, т.е. понимать его как устройство для преобразования энергии электрического тока в энергию механического течения рабочей жидкости. При этом в качестве рабочей жидкости следует использовать не любую слабопроводящую жидкость, а обладающую определенным набором электрофизических и электрохимических свойств. Структура и направление ЭГД–течений обусловлены свойствами границы раздела электрод – жидкость, и, следовательно, электрофизические свойства жидкости, а также свойства смоченной поверхности электродов являются основными конструктивными признаками преобразователя.

В качестве простейшей опорной конструкции преобразователя можно использовать систему двух параллельных проводов в канале из диэлектрического материала. Эта система работает в режиме сквозной прокачки, например, при использовании в качестве рабочей жидкости трансформаторного масла с добавлением бутилового спирта.

Основные отличия ЭГД–преобразователя нового типа от традиционных конструкций ЭГД–насосов – это полное отсутствие геометрической асимметрии электродов, фокусирующее действие электродной системы, способствующее устранению внутренних вихрей, возможность использования электрохимической асимметрии, для получения прокачки. Электрохимическая асимметрия достигается либо использованием электродов, выполненных из различных материалов, либо использованием различных покрытий электродов, либо применением рабочей жидкости с полярными добавками. При прочих равных условиях интенсивность сквозной прокачки существенно зависит от концентрации полярных примесей. Так, например, при использовании медных проводов диаметром 0,3 мм на расстоянии 1 см максимальный эффект сквозной прокачки достигается при применении в качестве рабочей жидкости 10%-го раствора бутилового спирта в трансформаторном масле. Если увеличивать или уменьшать содержание примесей, то сквозное течение переходит во встречное. При этом существенно снижается эффект внешней прокачки.

Для выяснения роли материала электрода на характер ЭГД-течений в лаборатории электрогидродинамики была проведена серия экспериментов по изменению свойств границы электрод-жидкость путем изменения материала одного из электродов в симметричной системе из двух проволочек диаметром 0,3 мм, длиной 29 мм, при межэлектродном расстоянии 0,4 мм. В качестве диэлектрической жидкости использовалось очищенное трансформаторное масло проводимостью  $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Результаты исследований показали, что эффект сквозной прокачки имеет место при правильном выборе материалов пар анод–катод. Общего критерия установить не удалось, однако были сделаны рекомендации по выбору наиболее эффективных пар.

### **Конструктивные усовершенствования электродной системы типа «провод–провод» для повышения интенсивности ЭГД–течений и ослабления выноса заряда за пределы межэлектродного промежутка [3-15]**

Одной из основных особенностей ЭГД–преобразователя является необходимость использования высоких напряжений. Когда речь идет о реализации технических конструкций, то получение и использование высокого напряжения являются довольно сложной задачей. Когда же речь идет о высоких напряжениях, то возникает опасность пробоя изоляции, а также опасность возникновения коронного разряда. Поэтому весьма актуален вопрос о том, какой диапазон напряжений следует выбрать для эффективной работы ЭГД–преобразователя и не следует ли снизить рабочее напряжение путем сокращения размеров межэлектродного промежутка, не изменяя при этом скорости течения среды.

Исследования 10%-го раствора бутилового спирта в трансформаторном масле показали, что зависимость скорости ЭГД–течения от размеров межэлектродного промежутка при фиксированном напряжении на электродах имеет экстремум. Его расположение не зависит от величины подаваемого напряжения и составляет 5 мм. Эта длина является критической, так как характеризует границу между ближней и дальней зонами. При размерах межэлектродного промежутка меньше критического значения ЭГД–течение практически не выходит за пределы электродов, сквозная компонента течения исчезает. Кроме того, несмотря на возрастание средней напряженности поля в межэлектродном промежутке, при уменьшении его размеров меньше критического средняя интенсивность ЭГД–течения падает. Основываясь на этих данных, можно утверждать, что для работы в насосном режиме целесообразно размещать электроды на расстоянии не менее 8÷10 мм.

Анализ результатов исследования разных конструкций ЭГД–преобразователей, а также кинематики ЭГД–течений в симметричной системе электродов позволяет заключить, что геометрические особенности электродной системы дают возможность получить некоторый эффект, который обусловлен

повышением плотности тока на электроде с меньшей площадью поверхности. Действительно, как следует из закона сохранения заряда, в установившемся режиме должны соблюдаться условия

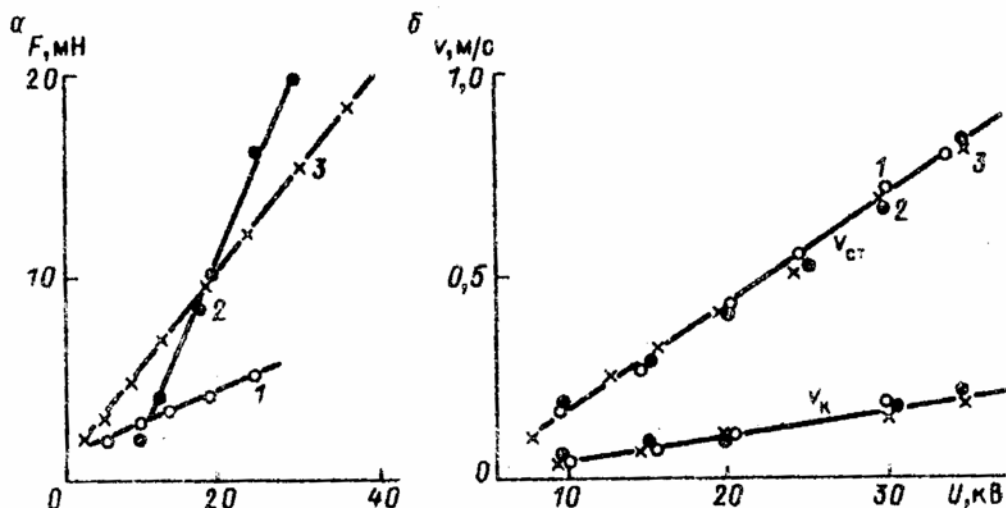
$$i_э = i_к, i_э \cdot s_э = i_к \cdot s_к, \quad (4.1)$$

и, следовательно, плотность тока на эмиттере пропорциональна отношению площадей:  $j_э = s_к / s_э$ . Как видно из соотношений (4.1), при прочих равных условиях на эмиттере плотность тока, а, следовательно, и плотность возникающего заряда выше, чем на коллекторе.

Для оценки влияния размеров пассивного электрода на кинематику и динамику сквозного ЭГД–течения были проведены эксперименты с различными электродами: провод  $\varnothing 0,3$  мм, стержень  $\varnothing 2,3$  мм и провод–профилированное тело. Длина профилированного тела равна 2,5 см, радиус закругления головки 0,5 мм. При применении в качестве пассивного электрода стержня отношение площадей электродов равно 7,7. Поскольку в установившемся режиме токи на электродах равны, то увеличение площади пассивного электрода приводит к снижению плотности тока на поверхности последнего, а, следовательно, и к снижению плотности объемного заряда. Это должно увеличить интенсивность сквозного ЭГД–течения. Применение электрода типа «крыло», вытянутого в направлении течения, увеличивает площадь соприкосновения электрода с жидкостью по ходу течения, что также должно повысить скорости обменных процессов у противозэлектрода и скорость сквозного течения.

Исследование проводилось в двух режимах: при полностью открытом и полностью закрытом канале. В первом случае измерялись скорости течения в центральной струе ЭГД–течения и в дальней части канала – скорость сквозного течения. Ширина канала во всех экспериментах составляла 1 см. Во втором случае измерялся перепад давлений между пассивным и активным электродами  $\Delta p_{cm}$  и вычислялась средняя статическая сила, действующая в канале:  $F_{cm} = \Delta p_{cm} \cdot S_к$ . Здесь  $S_к = 2,5 \text{ см}^2$  – площадь сечения канала.

На рис.4.9 представлены зависимости средней статической силы, действующей в канале  $F_{cm}$  (рис.4.9, а), скорости струи ( $v_{cm}$ ) и скорости сквозного течения ( $v_к$ ) (рис.4.9, б) от напряжения. При этом рис.4.9, а, соответствует измерениям в закрытом канале, а рис.4.9, б, – в полностью открытом. Кроме того, данные (1) относятся к системе электродов «провод – провод», (2) – «провод – стержень», (3) – «провод – профилированная пластинка». Видно, что изменение размеров и форм пассивного электрода не привело к изменению скорости течения в открытом канале (рис.4.9, б). Экспериментальные точки с погрешностью, не превышающей 10 % от средней величины, группируются относительно одной прямой. Это касается как скорости течения в центральной струе, так и скорости сквозного течения.



**Рисунок 4.9.** Зависимости средней статической силы  $F_{ст}$  (а), скорости струи ( $v_{ст}$ ) и сквозного течения ( $v_k$ ) (б) от напряжения, соответствующие измерениям в закрытом канале (а), и в полностью открытом (б). 1 – система электродов «провод – провод», 2 – «провод – стержень», 3 – «провод – профилированная пластинка».

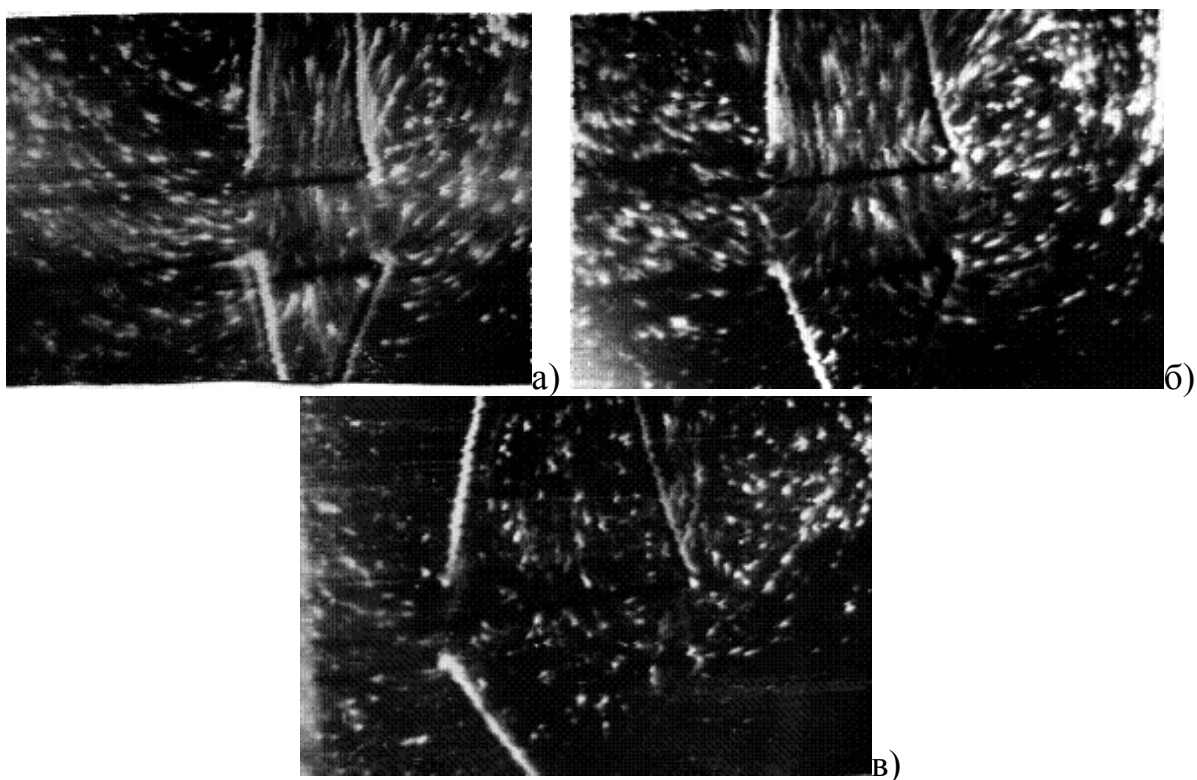
Для статических характеристик в закрытом канале (рис.4.9, а) ситуация иная. Зависимость средней электрической силы от напряжения для всех пар электродов линейна, однако тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс растет с увеличением диаметра пассивного электрода. В соответствии с этим, в области высоких напряжений, более 20 кВ, растет и абсолютное значение средней электрической силы, развиваемой в межэлектродном промежутке, или перепад давления.

Эффективная работа ЭГД–преобразователя по созданию заданного расхода жидкости во внешнем контуре возможна при условии согласованности внутренней и внешней нагрузок, иными словами преобразователь должен обеспечить необходимый перепад давлений на межэлектродном промежутке. Поскольку реально достигнутые скорости ЭГД–течений на одиночной ступени не превышают 1,5 м/с, для разгона жидкости до скоростей 5÷10 м/с необходимо последовательное включение нескольких ступеней ЭГД–преобразователя.

Для повышения расходных характеристик ЭГД–преобразователя целесообразно применять параллельное включение элементарных ячеек. Однако при этом следует учитывать взаимодействие потоков ЭГД–течения.

Для исследования этого вопроса было изучено взаимодействие ЭГД–течений, создаваемых двумя парами электродов типа двупроводной линии. Фотографии этих течений представлены на рис.4.10. Электроды нормальны к плоскости фотографирования и закреплены на держателях, видимых на фотографии в виде у-образных темных стержней. Нижняя пара электродов имеет отрицательный потенциал, течение направлено снизу вверх. При расстояниях  $l_1$  между парами электрода более чем  $5 \cdot l_0$  течения реализуются в

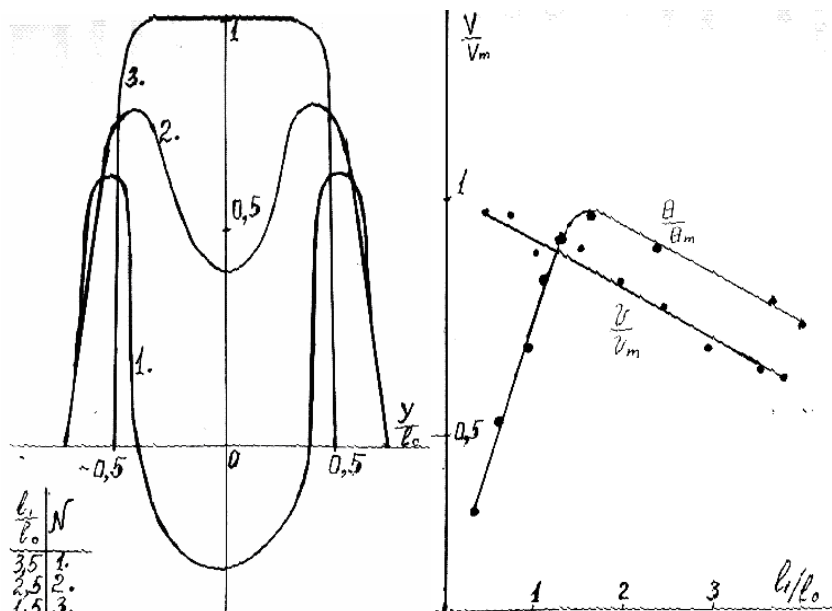
виде двух невзаимодействующих потоков. На рис.4.11, а представлены профили скоростей этих течений, снятые на уровне верхних электродов и нормированные к величине максимальной скорости и к расстоянию между парами  $l_1$ . Видно, что при  $l_1/l_0 > 3,5$  профили скорости имеют два выраженных пика, лежащих на оси соединяющей каждую пару электродов в плоскости фотографирования. При расстояниях  $l_1 \approx 2 \div 3 \cdot l_0$  (рис.4.10) течения начинают взаимодействовать, что проявляется характерным двугорбым профилем скорости, имеющим минимум, соответствующий середине расстояния между одноименными электродами (рис.4.11, б). Дальнейшее сближение электродов (рис.4.10) приводит к переходу от двугорбого к одногорбому профилю скорости, причем распределение скорости в промежутке между одноименными электродами практически однородно. Течение сохраняет ламинарный характер.



**Рисунок 4.10.** Фотографии течений, создаваемых 2-я парами электродов типа провод–провод (две параллельные элементарные ячейки): а –  $l_1/l_0 = 2$ , б –  $l_1/l_0 = 3,6$ , в –  $l_1/l_0 = 5$ .

Следует отметить, что результатом взаимодействия является не только формирование общего профиля скорости двух соседних ЭГД–потоков, но и некоторое увеличение максимальной скорости ЭГД–течения (рис.4.11, а). Эта зависимость для напряжений 15,2 и 25 кВ представлена на рис.4.11, б. На рис.4.11 (кривая 2) представлена зависимость расхода жидкости переносимого центральной струей на единицу длины электрода от  $l_1/l_0$ , имеющая выраженный экстремум для значений  $l_1 \approx 1,5 \cdot l_0$ .

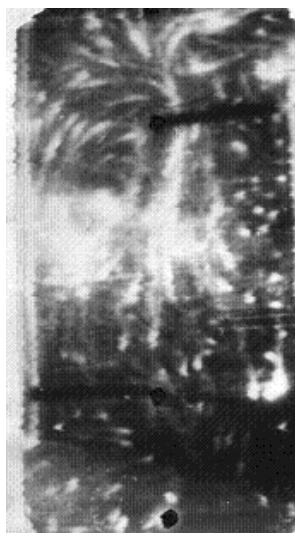
Таким образом, по результатам исследования взаимодействия ЭГД-течений можно рекомендовать наиболее оптимальное размещение электродов в виде параллельных проводов с расстоянием между парами в 1,5 расстояния между электродами в паре.



**Рисунок 4.11.** Профили потоков ЭГД-течений (а), создаваемых двумя парами электродов и зависимости расхода жидкости в центральной струе (б) на единицу длины электрода от  $l_1/l_0$ .

Для изучения возможности последовательного включения ступеней ЭГД-преобразователя было проведено исследование взаимодействия двух пар электродов типа двухпроводной линии, размещенных в канале, ограниченном диэлектрическими стенками. Электроды выполнены из медной лужёной проволоки диаметром 0,6 мм и длиной 25 мм и размещены в канале шириной 20 мм. Расстояние между соседними одноименными электродами сохранялось постоянным  $l_1 = 50$  мм варьировались размеры межэлектродного промежутка  $l_0$  от 5 до 25 мм. Это позволило исследовать влияние двух соседних пар друг на друга в диапазоне изменения относительной величины  $l_1/l_0$  от 1 до 10. Исследования проводились для нескольких фиксированных напряжений: 20, 30 и 40 кВ, измерялась средняя скорость течения в канале далеко за пределами межэлектродного промежутка. На рис.4.12 представлены фотографии ЭГД-течений в 10 %-ом растворе бутилового спирта в трансформаторном масле при величине  $l_1/l_0$  равной 3,0 и постоянном приложенном напряжении 30 кВ.



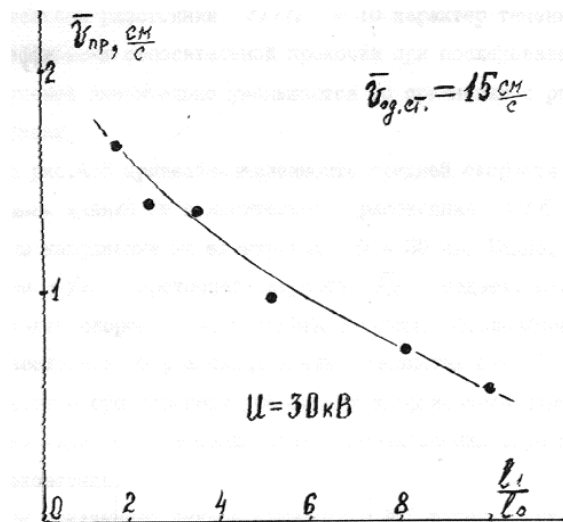


*Рисунок 4.12. Фотографии ЭГД–течений при относительном расстоянии  $l_1/l_0 = 3$  между ступенями.*

При межэлектродных расстояниях равных расстоянию между соседними ступенями ЭГД–течения реализуются в виде трёх вихревых потоков, замкнутых внутри соседних межэлектродных промежутков, коэффициент внешней прокачки при этом мал.

При относительном расстоянии между ступенями равном  $3 \div 5$  взаимовлияние ослабевает, вихревой ЭГД–поток между соседними ступенями вырождается. Однако ЭГД–течения в отдельных ступенях изменяет характер, вместо сквозного течения, наблюдаемого в этой жидкости при работе одиночной ступени, при последовательном включении двух ступеней в каждой из них реализуются преимущественно вихревые течения замкнутые внутри межэлектродного промежутка. При относительном расстоянии  $l_1/l_0 = 10$  характер течений сохраняется. Коэффициент относительной прокачки при последовательном включении ступеней значительно уменьшается, по сравнению с работой одиночной ступени.

На рис.4.13 представлена зависимость средней скорости ЭГД–течения во внешнем канале от относительного расстояния  $l_1/l_0$  при фиксированном напряжений на электродах  $U = 30$  кВ. Видно, что с увеличением  $l_1/l_0$  проточная скорость  $\bar{v}_{np}$  падает, несмотря на возрастание скорости вихревого ЭГД–течения, обусловленной уменьшением расстояния, а, следовательно, величины  $\bar{E} = U/l_0$ . Это свидетельствует о существенном уменьшении коэффициента относительной прокачки жидкости при последовательном включении ступеней ЭГД–преобразователя.



**Рисунок 4.13.** Зависимость средней скорости ЭГД-течения во внешней канале от относительного расстояния  $l_1/l_0$  при последовательном использовании двух ступеней ЭГД-преобразователя типа провод-провод.

Как показывает анализ кинематики ЭГД-течения при двухступенчатом включении ступеней ЭГД-преобразователя эффект уменьшения внешней прокачки обусловлен неполной разрядкой жидкости у поверхности противоиэлектрода-коллектора. Заряженная жидкость, вышедшая за пределы межэлектродного промежутка первой ступени, испытывает действие кулоновских сил со стороны последующей ступени направленных противоположно движению жидкости. Этот эффект приводит к ослаблению коэффициента относительной прокачки жидкости.

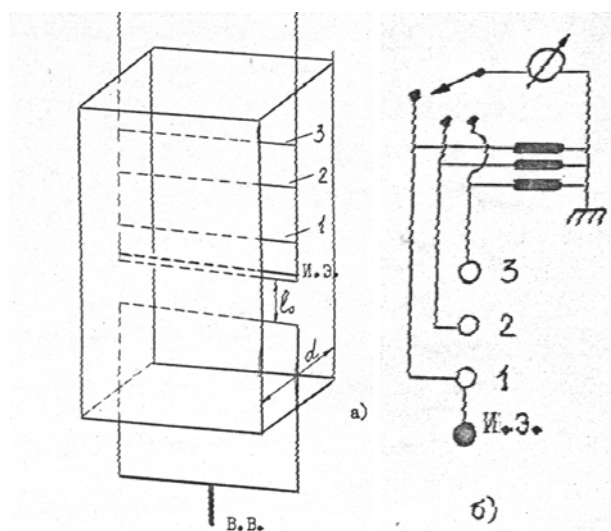
Таким образом, последовательное включение ступеней ЭГД-преобразователя без принятия специальных мер по разрядке жидкости, вышедшей за пределы межэлектродного промежутка приводит не к увеличению, а к уменьшению скорости течения жидкости во внешнем канале. Для нейтрализации жидкости во внешнем контуре необходимо за пределами межэлектродного промежутка устанавливать специальные металлические сетки, что требует проведения дополнительных исследований.

Для получения интенсивного направленного ЭГД-течения вне межэлектродного промежутка необходимо, во-первых, максимально ускорить жидкость в пределах межэлектродного промежутка и, во-вторых, максимально разрядить ее на выходе за пределы межэлектродного промежутка, чтобы уменьшить тормозящие действия кулоновских сил и влияние выносимого заряда на работу последовательно включенных секций.

Для осуществления первого условия необходимо ввести в жидкость заряд максимально возможной плотности с активного электрода и создать в зоне ускорения жидкости максимально-возможную напряженность электрического поля. Как уже говорилось, сокращение длины межэлектродного промежутка не дает желаемых результатов, т.к. снижается пробивная прочность жидкости и обнаруживается взаимовлияние приэлектродных областей. Анализ типовых

распределений скорости ЭГД-течений показывает, что зона ускорения сквозного ЭГД-течения составляет  $0,1 \div 0,2$  длины межэлектродного промежутка. Поэтому для увеличения ускорения желательно повысить локальную напряженность электрического поля в пределах этой зоны.

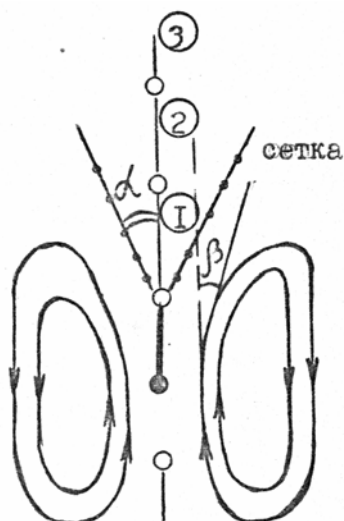
Поставленную задачу предложено решить путем установки дополнительного изолированного электрода (рис.4.14), электрически соединенного с пассивным. Этот электрод представляет собой медный провод, покрытый слоем полиэтилена, либо полихлорвинила и расположенный на расстоянии  $5 \div 7$  мм параллельно основному электроду (1) на который натекает ЭГД-течение. Введение дополнительного изолированного электрода, находящегося под потенциалом электрода (1) с одной стороны, не снижает пробивную прочность межэлектродного промежутка, а с другой стороны повышает напряженность электрического поля, а, следовательно, и плотность кулоновских сил  $f = \rho \cdot E$  в зоне ускорения жидкости.



**Рисунок 4.14.** Схема расположения электродов ЭГД-преобразователя в канале (а) и схема измерений (б).

Для определения величины электрического заряда, сносимого в заэлектродную зону, за основным электродом (1) размещены два дополнительных электрода (2) и (3) изолированные от основного электрода (1). Измерительная схема позволяет независимо измерять электрические токи, протекающие через электроды (1), (2) и (3) измеряя падения напряжения на соответствующих каждому электроду измерительных сопротивлениях (рис.4.14, б).

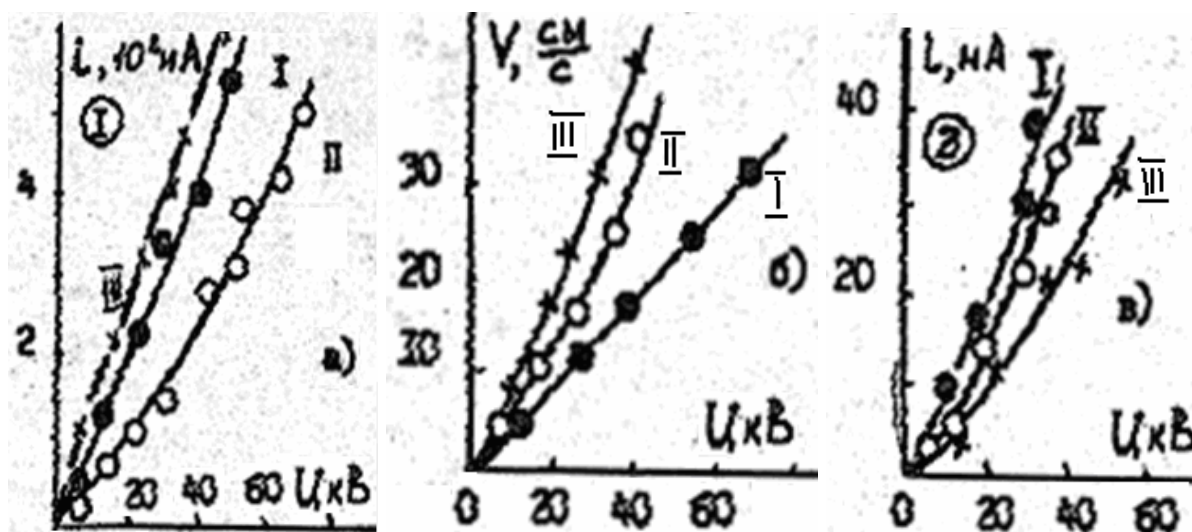
Для увеличения поверхности, на которой происходит разряд жидкости, поверхность противоиэлектрода электрода (1) в ряде экспериментов искусственно увеличивалась путем установки дополнительной сетки, угол раствора которой изменялся в различных экспериментах (рис.4.15).



**Рисунок 4.15.** Дополнительная сетка на протозоэлектроде.

Первая группа экспериментов проведена в свободной жидкости – трансформаторном масле с примесью бутанола  $\sigma_0 \sim 10^{-13} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ .

На рис.4.16, б представлены зависимости средней скорости в центральной струе ЭГД-течения от напряжения для трех вариантов электродной системы: I – основной электрод уединен (без изолированного электрода и сетки), II – основной электрод расположен за изолированным электродом, сетка отсутствует, III – основной электрод расположен за изолированным электродом и снабжен разветвленной сеткой.



**Рисунок 4.16.** Вольтамперные характеристики основного электрода (а); зависимости средней скорости в центральной струе ЭГД-течения от напряжения (б); вольтамперные характеристики электрода (2), характеризующие ток сноса (в): I – основной электрод уединен (без изолированного электрода и сетки), II – основной электрод расположен за изолированным электродом, сетка отсутствует, III – основной электрод расположен за изолированным электродом и снабжен разветвленной сеткой.

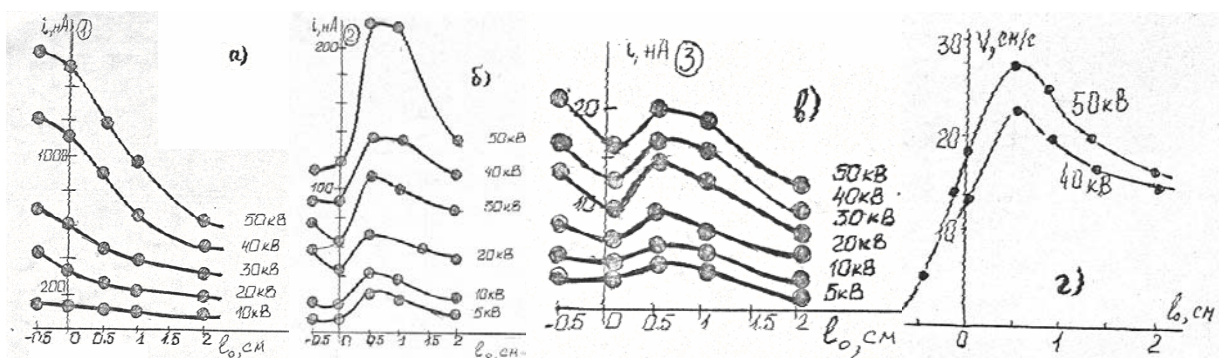
На рис.4.16, а представлены вольтамперные характеристики основного электрода, соответствующие этим трем случаям, а на рис.4.16, в – вольтамперные характеристики электрода (2), характеризующего ток сноса.

Видно, что введение изолированного электрода существенно повышает скорость течения при одновременном снижении тока через основной электрод. Наличие сетки еще более повышает скорость ЭГД–течения, и одновременно, как и следовало ожидать, существенно повышается ток через основной электрод и уменьшается ток сноса, по сравнению с первыми двумя случаями.

Таким образом, введение изолированного электрода и дополнительной сетки, увеличивающей эффективную площадь основного противоиэлектрода, как и предполагалось, благотворно влияет на организацию сквозного ЭГД–течения – увеличивает кулоновские силы в зоне разгона и уменьшает плотность заряда, сносимого течением в заэлектродную область.

Средняя скорость ЭГД–течения и ток через жидкость практически не зависят от угла раствора дополнительной сетки.

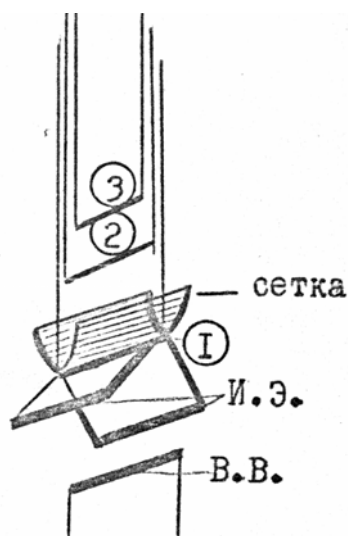
Введение одиночного изолированного электрода, расположенного между активным и пассивным электродами создает механическую преграду на пути центральной струи ЭГД–течения, что нежелательно. Для устранения этого недостатка предложено использовать пару разведенных изолированных электродов, расположенных симметрично, относительно центральной струи ЭГД–течения, под некоторым углом к плоскости, в которой лежат оси пассивного и активного электрода.



**Рисунок 4.17.** Зависимости тока для 1-го электрода (а), для 2-го и 3-го электродов – (б) и (в), соответственно, от  $l_0$  при двойном параллельном изолированном электроде; средней скорости (г) в центральной струе ЭГД–течения от  $l_0$ .

На рис.4.17 представлены вольтамперные характеристики пассивного электрода (1) и электродов (2), (3), измеряющих ток сноса. Эксперименты проведены в растворе бутанола в трансформаторном масле с проводимостью  $3 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при различных расстояниях  $l_0$  от внешней поверхности активного электрода до плоскости, на которой лежат оси симметрии изолированных электродов. Схема расположения изолированных электродов

представлена на рис.4.18. При таком расположении изолированные электроды не мешают течению центральной струи и, в то же время, повышают напряженность поля в зоне ускорения жидкости.



**Рисунок 4.18.** Изолированный электрод выполнен в виде двух параллельных проводов

На рис.4.17, г представлена зависимость средней скорости в центральной струе ЭГД–течения от  $l_0$ . Видно, что зависимости скорости  $V(l_0)$  и тока сноса (2) и (3) имеют экстремумы при  $l_0 \approx 0,5$  см. Величина тока сноса не превышает 10 % от тока пассивного электрода (1). Таким образом, система с двумя изолированными проводами наиболее оптимально работает при  $l_0 \approx 0,5$  см.

Основные экспериментальные исследования кинематики ЭГД–течений были получены для условий свободного пространства, в то же время работа ЭГД–преобразователя реализуется в сравнительно узком канале из диэлектрического материала. Заряд жидкости, осаждаясь на стенках канала, искажает поле в межэлектродном промежутке и может существенно повлиять на работу преобразователя.

### **Влияние проводимости стенок канала на работу ЭГД–преобразователя**

Для получения течения во внешнем контуре электроды ЭГД–преобразователя обычно располагаются в канале из диэлектрического материала. При этом неизбежно осаждение на стенках канала объемного заряда, который, в свою очередь, влияет на формирование ЭГД–течения в канале. Поэтому целесообразно исследовать влияние электрической проводимости стенок канала на работу ЭГД–преобразователя.

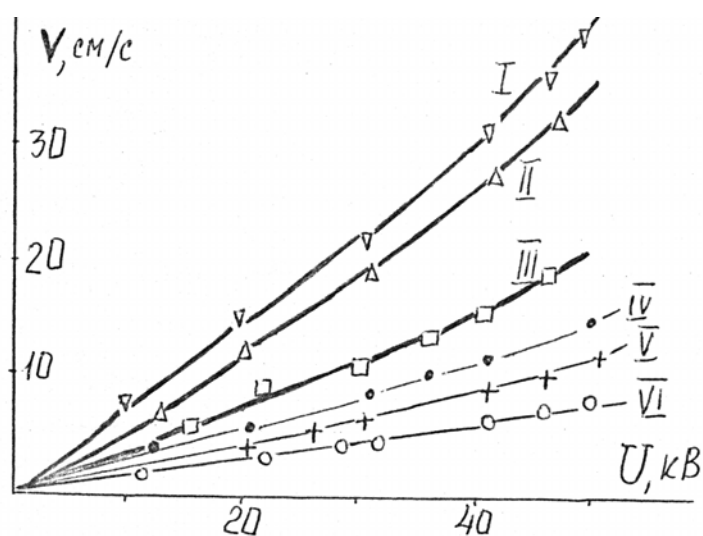
Для исследования влияния поверхностной проводимости канала были использованы различные покрытия стенок:

- металлизированная лавсановая пленка ПЭТФ-45 с поверхностной проводимостью  $10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ;
- пластинки из стекла пирекс проводимостью  $4 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ;
- без покрытия – проводимость оргстекла составляет  $10^{-18} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ;
- эпоксидная смола с добавкой йода или бронзовой пудры.

ЭГД–течение исследовалось в смеси бутанола с трансформаторным маслом проводимостью  $3 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ . Межэлектродное расстояние 1 см.

В экспериментах измерялся ток основного электрода (1), ток сноса – электроды (2) и (3) (рис.4.18) и поверхностный ток квазипроводящих стенок–вставок. Проводимость стенок из стекла и пленки ПЭТФ-35 близка к проводимости рабочей жидкости.

На рис.4.19 представлены зависимости средней скорости в центральной струе ЭГД–течения за пассивным электродом от напряжения. Кривые I, II, III соответствуют измерениям в свободной жидкости, кривые IV, V, VI при наличии канала, покрытого различными материалами: пленкой ПЭТФ-45, эпоксидной смолой с добавкой йода и с добавкой бронзовой пудры. Расстояние между стенками канала 1 см, жидкость – трансформаторное масло  $\sigma_0 = 3 \cdot 10^{13} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ .

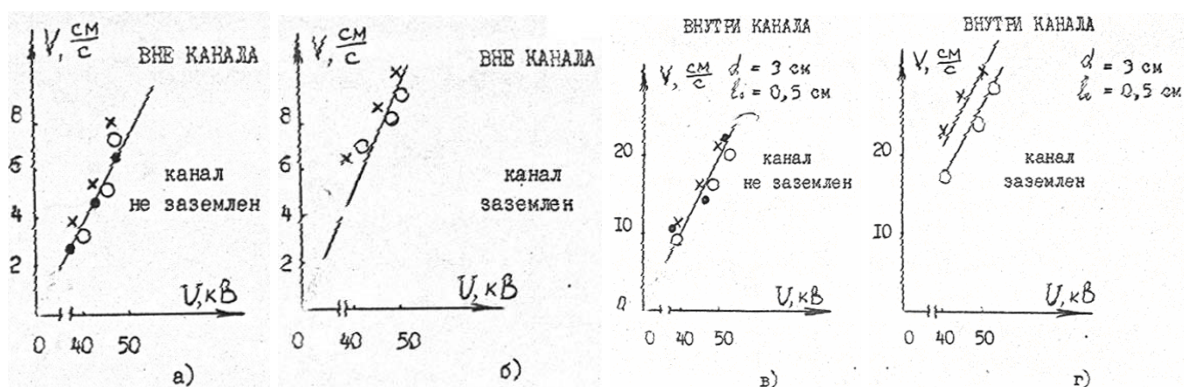


**Рисунок 4.19.** Зависимость средней скорости ЭГД–течения от напряжения.

Эксперименты по исследованию зависимостей тока пассивного электрода, тока квазипроводящих стенок–вставок и тока второго электрода от напряжения при разной ширине канала показали, что ток квазипроводящих стенок по величине близок к току основного электрода, что говорит о существенной роли заряда, оседающего на стенки канала в процессе ЭГД–течения. Ток второго электрода в условиях эксперимента оказался выше тока основного электрода. Было замечено, что наличие канала существенно снижает скорость ЭГД–течения по сравнению со свободной жидкостью. Интенсивность

течения зависит также и от материала покрытия канала, наилучшие результаты получены с пленкой ПЭТФ-45.

На рис.4.20 представлены зависимости скорости ЭГД-течения вне канала и внутри него для случаев, когда стенки канала электрически соединены с заземляющим электродом, который, в данном случае, совпадает с пассивным, и для случая, когда стенки электрически не соединены с электродами. Точки, соответствующие различным покрытиям стенок, обозначены на графике различными символами. Видно, что заземление канала, обеспечивающее сток заряда, оседающего на стенках, приводит к существенному увеличению скорости ЭГД-течения. Наиболее эффективно это влияние при стенках канала из стекла.



**Рисунок 4.20.** Зависимость скорости ЭГД-течения внутри канала (в), (г) и вне канала (а), (б) от напряжения при разном покрытии стенок канала. Канал не заземлен – (а), (в) или заземлён – (б), (г)

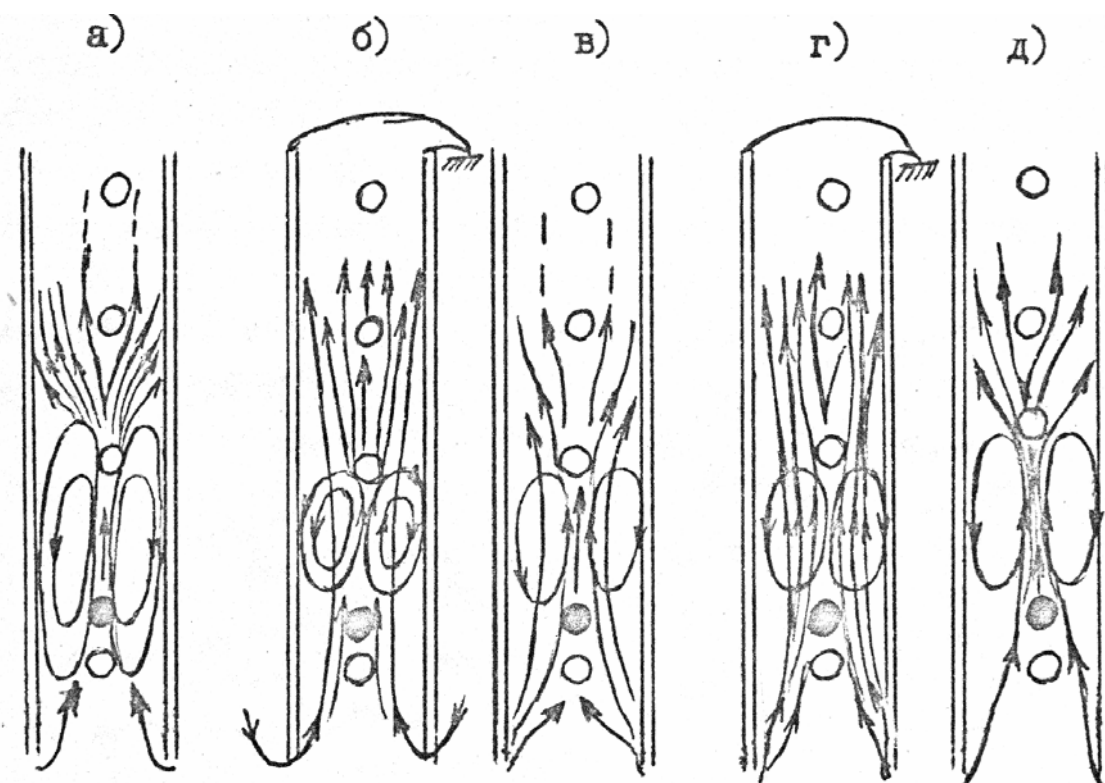
Изменение материала покрытия стенок канала меняет характер ЭГД-течения в нем. На рис.4.21 представлены эскизы линий тока жидкости при напряжении между электродами  $U = 40$  кВ. Видно, что в канале, выполненном из оргстекла (рис.4.21, а), течение, хоть и имеет сквозную компоненту, но уже за первым электродом поток расходится, а величина скорости быстро падает. Если же стенки канала покрыты пленкой ПЭТФ-45 (рис.4.21, б,в) и стенки заземлены (рис.4.21, б), то ЭГД-потoki имеют большую, чем в предыдущем случае, проточную компоненту. Потoki мало расходятся за первым электродом, возвратные течения локализованы только в зоне между изолированным и первым электродом. Величина скорости внутри канала выше, чем в предыдущем случае. Если же стенки канала не заземлять, то вид течений меняется. Появляется расхождение струи в заэлектродной области, но это расхождение меньше, чем в канале из оргстекла.

Если стенки канала выполнены из стекла, то течение как в предыдущем случае за первым электродом сильно расходится при незаземленных стенках канала (рис.4.21, д) или, при заземлении стенок канала, имеет проточную компоненту (рис.4.21, г). Видно, что во всех случаях, при заземлении стенок канала проточная компонента преобладает, область возвратных течений



уменьшается, расходимость струи в заэлектродной области мала. Организация потока ЭГД-течений в канале однозначно лучше при заземленных стенках канала. Скорость вне канала также зависит от того, заземлен канал или нет.

Таким образом, в результате экспериментов выяснилось, что эффективность потока, как в канале, так и вне него, зависит от того, из какого материала выполнена стенки канала. Для наибольшей эффективности, надо использовать покрытие, проводимость которого порядка проводимости рабочей среды. На стенки канала, как было сказано выше, осаждается заряд, который создает поле такого направления, которое тормозит течение, поэтому целесообразно отводить скопившийся заряд со стенок путем заземления стенок канала.



*Рисунок 4.21. Эскиз линий тока жидкости в канале при  $U = 40$  кВ при различных покрытиях стенок.*

Итак, проанализировав результаты исследований электрогидродинамических преобразователей различных конструкций, можно сформулировать основные требования для конструирования ЭГД-преобразователей:

1. Поскольку рабочие характеристики рассматриваемых устройств сильно зависят от состава прокачиваемых жидкостей, то предлагается заменить название ЭГД-насос на ЭГД-преобразователь, подразумевая под ним класс устройств, предназначенных для преобразования энергии электрического тока в энергию направленного движения жидкости. При этом конструктивными особенностями подобных устройств следует считать не

только геометрические особенности системы электродов, но и рациональное сочетание свойств рабочей жидкости преобразователя с материалом, покрытием, формой и размещением системы электродов, а также формой подаваемого напряжения.

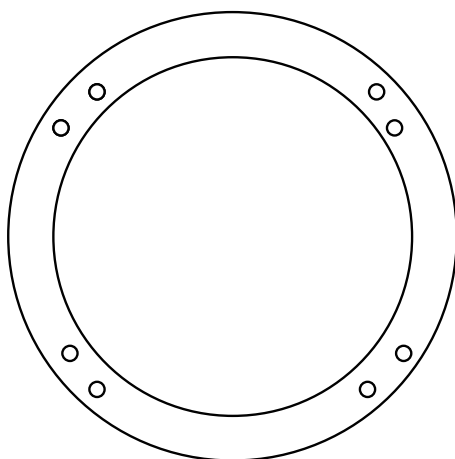
2. Эффективная работа ЭГД–преобразователей возможна на внешних нагрузках, не превышающих пороговую критическую величину. Повышение критической нагрузки возможно за счет как геометрического, так и электрохимического фактора.
3. Для увеличения эффективности работы ЭГД–преобразователей вместо традиционных электродов типа «игла – кольцо» следует использовать фокусирующие системы типа «провод – стержень», «провод – профилированное тело».

### Циклический ЭГД-преобразователь

Рассмотрим уравнение Бернулли:  $\Delta p + \frac{w^2}{2} - W_E = const$  . Удельная

электрическая энергия  $W_E$  преобразуется при работе ЭГД–преобразователя в кинетическую энергию движущейся жидкости и потенциальную энергию – давление в жидкости. В случае ЭГД–течений в свободном объёме основную долю в общем балансе составляет кинетическая энергия движущейся среды; при наличии диэлектрических каналов доля потенциальной энергии возрастает – в закрытом канале возникает существенный перепад давлений  $\Delta p$  на межэлектродном промежутке. В соответствии с этим, различают два типа ЭГД–преобразователей: динамические и статические. В динамическом ЭГД–преобразователе необходимо по возможности сильнее разогнать жидкость в пределах рабочего промежутка. Для этого требуется внешний контур с небольшим гидравлическим сопротивлением. Наилучшим образом эти условия реализованы в модели циклического ЭГД–преобразователя, выполненного в виде замкнутого канала, заключенного между двумя цилиндрическими стенками разных диаметров из диэлектрического материала.

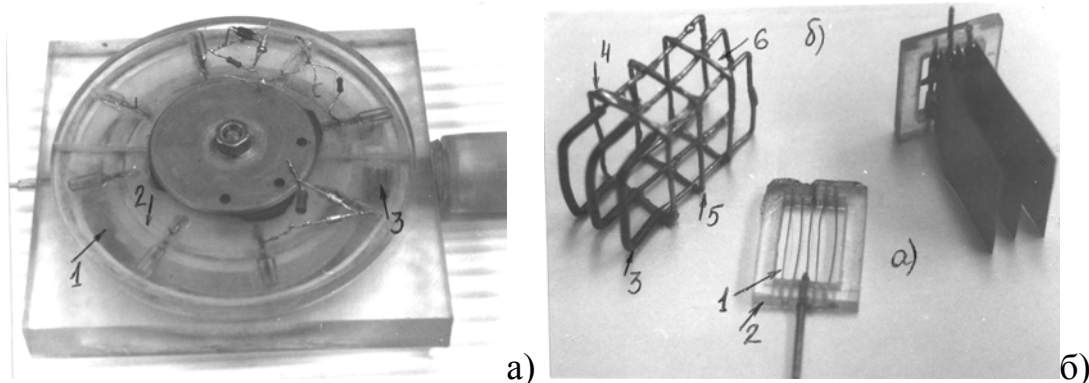
На рис.4.22 представлен эскиз циклического ЭГД–преобразователя, разработанного сотрудниками лаборатории электрогидродинамики в 80-х годах в рамках хоздоговора. По периметру канала попарно размещены электроды, на которые подается высокое напряжение от источника. Расстояние между разнополярными электродами 3÷5 мм, расстояние между парами 3÷5 см. В пределах каждой пары электродов жидкости разгоняются электрическим полем, вызывая общее течение жидкости по каналу циклического ЭГД–преобразователя. Последовательное включение пар может привести к увеличению общей скорости ЭГД–течения жидкости.



**Рисунок 4.22.** Эскиз циклического ЭГД–преобразователя

Предлагаемая модель циклического ЭГД–преобразователя предназначена для максимально возможного ускорения жидкости в пределах замкнутого контура, имеющего малое гидравлическое сопротивление. Преобразователь такого рода может быть использован, например, в системах интенсификации теплообмена электрическим полем между внутренней и внешней стенками канала.

Электродные системы циклического ЭГД–преобразователя разработаны на основе предшествующих материалов и представлены на фотографии (рис.4.23).

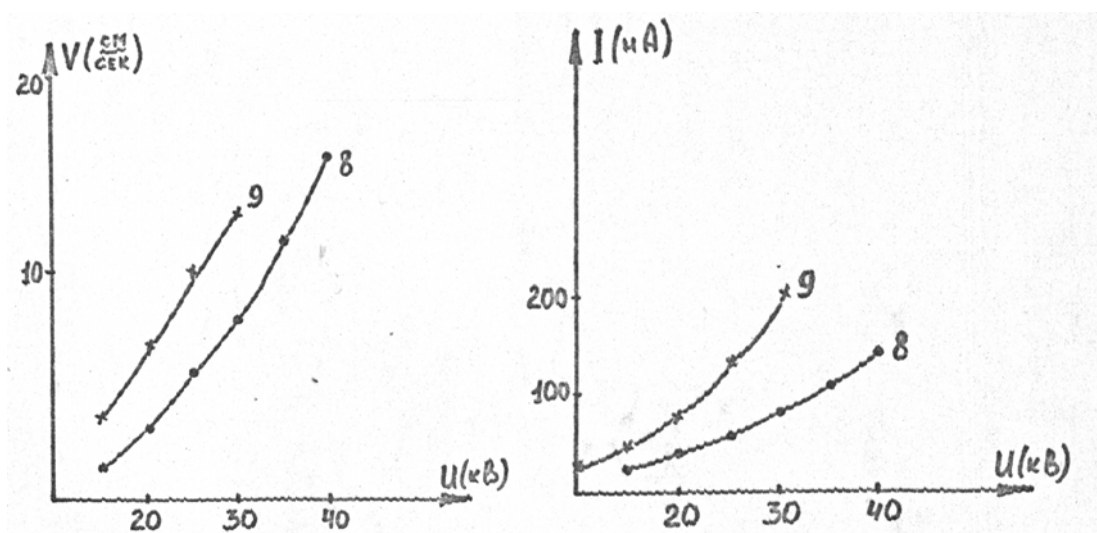


**Рисунок 4.23.** Фотографии циклического ЭГД–преобразователя: а – общий вид, б – элементы электродной системы.

Электрод–эмиттер (а, рис.4.23, б) состоит из трех линейных проводов (1), натянутых на рамку–держатель (2) из оргстекла. Электрод–коллектор (б, рис.4.23, б) состоит из пяти проволочных рамок, передняя часть которых покрыта ПВХ–изоляцией. Далее по ходу канала расположена система оголенных проводов коллектора. Для обеспечения более полной нейтрализации протекающей жидкости на рамочные держатели (5), дополнительно натянута медная проволочка (6). Представленная электродная система содержит дополнительный изолированный электрод (3), служащий для увеличения

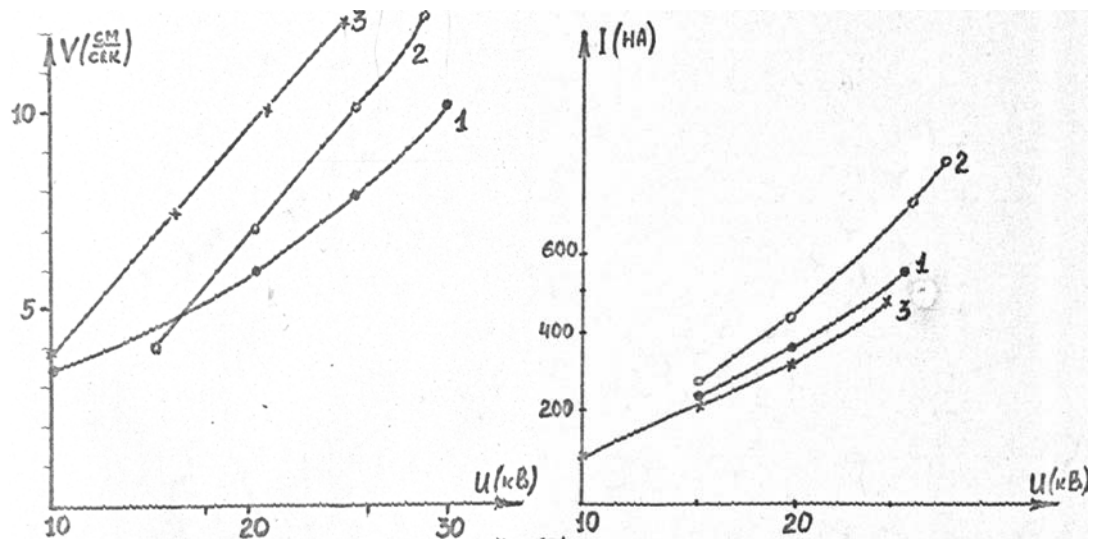
напряженности электрического поля в зоне разгона жидкости. Расстояние между параллельно включенными элементами активного электрода–эмиттера (активными алюминиевыми проволочками) выбрано оптимальным на основе предыдущих исследований и равно межэлектродному расстоянию ( $l_p = l$ ). Хвостовая часть электрода–коллектора (б) содержит дополнительную сеточку для более полного разряда протекающей жидкости.

На рис.4.24 представлены зависимости для пяти параллельно включенных секций с разными расстояниями между электродами: 8 – 8 мм, 9 – 4 мм. Зависимости  $v(U)$  близки к линейным, имеется весьма слабая зависимость скорости от размеров межэлектродного промежутка. Увеличение числа параллельно включенных секций приводит к незначительному снижению скорости прокачки. Скорости сквозной прокачки сравнительно невелики, менее 1 м/с.



**Рисунок 4.24.** Зависимость скорости и тока  $I$ -секционного ЭГД-насоса от расстояния между электродами (5-электродная сетка)

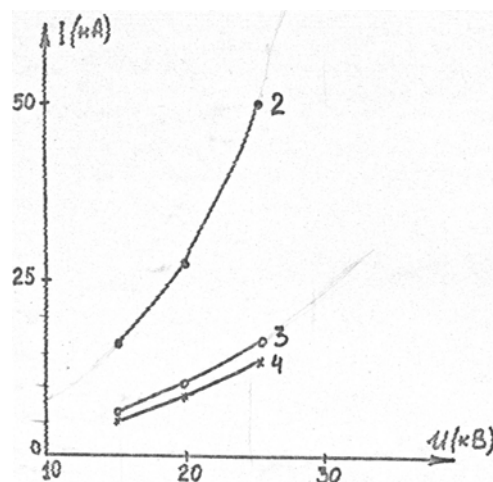
На рис.4.25 представлены зависимости скорости течения в канале, циклического ЭГД–преобразователя и тока от напряжения для одной (1), двух (2) и четырех (3) последовательно включенных секций. Видно, что увеличение числа секций приводит к некоторому увеличению скорости, однако это увеличение непропорционально числу включенных секций, а значительно меньше.



**Рисунок 4.25.** Зависимость скорости ЭГД-течения (слева) в циклическом ЭГД-насосе и ток (справа) и напряжения: 1 – 1 каскад, 2 – 2 каскада, 3 – 4 каскада.

Одной из причин неаддитивной работы ЭГД-преобразователя может являться существенный снос заряда по ходу течения. В этом случае электрический заряд жидкости, поступающий во вторую и последующие ступени ЭГД-преобразователя, может снижать ускорение жидкости в последовательно включённых ступенях.

Исследование сноса заряда проводилось в односекционной модели ЭГД-преобразователя, снос заряда определялся измерением тока на сетках, установленных по ходу течения на расстоянии 0,25; 0,5 и 0,75 периметра канала. На рис.4.26 приведена зависимость результата эксперимента, цифрами 2, 3 и 4 обозначены результаты измерений на второй, третьей и четвертой сетках. Видно, что ток на второй сетке более чем на порядок меньше тока на рабочей сетке ЭГД-преобразователя (рис.4.24, б) и уменьшается по ходу течения на третьей и четвертой сетках.



**Рисунок 4.26.** Зависимость тока сноса от напряжения на 2-й, 3-й и 4-й сетках по ходу течения.

Для оценки величины заряда, сносимого по ходу течения, можно использовать выражение для конвективного тока:

$$i = \int_S j ds = \int_S \rho V ds .$$

Считая распределение заряда по площади сечения канала однородным, рассчитаем его:

$$\bar{\rho} = \frac{i}{\int_S V ds} = \frac{i}{VS} .$$

Используя данные, представленные на рис.4.26:  $i = 50$  нА,  $\bar{V} = 0,1$  м/с,  $S = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, получим  $\bar{\rho} \approx 2 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая связь заряда с полем по формуле Остроградского-Гаусса:  $\rho = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{div} E$  получим для одномерного случая и однородного распределения  $\rho$ :

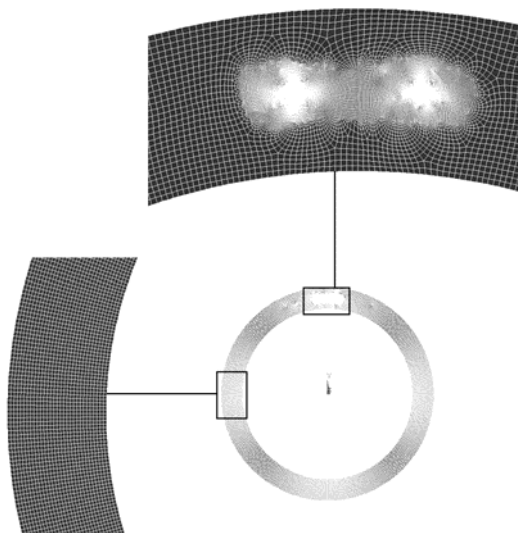
$$E = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \int_0^{l_0} \rho dx \approx \frac{\bar{\rho}}{\varepsilon_0 \varepsilon} l_0$$

При  $\bar{\rho} \approx 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon = 2,8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $l_0 = 10^{-12}$  м,  $E \approx 5 \cdot 10^5$  В/м. В условиях эксперимента, средняя напряженность внешнего поля  $25 \cdot 10^5$  В/м. Видно, что поле, создаваемое сносимым электрические зарядом, весьма ощутимо и может привести к снижению эффекта ускорения жидкости при последовательном включении двух ступеней.

### **Компьютерное моделирование работы циклического ЭГД насоса в симметричной системе электродов**

Для анализа работы ЭГД–преобразователей было проведено моделирование работы циклического ЭГД–насоса с симметричной системой электродов со следующими параметрами:

- Электроды – две параллельные проволоочки, расположены по центру кольцевого канала, стенки которого выполненного из диэлектрического материала. Радиус внутреннего цилиндра  $r_1 = 4$  см, внешнего –  $r_2 = 5$  см. Угол между электродами –  $10^\circ$ , расстояние  $\sim 0,78$  см. Диаметр электродов  $h = 0,5$  мм.
- Жидкость – трансформаторное масло. Диэлектрическая проницаемость 2,2, плотность –  $\rho = 851,7$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость –  $0,768$  Па·с. Данные значения параметров среды взяты для температуры  $t = 15^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 4.27.** Сетка модели в области расположения электродов и в канале (сетка  $S_0$ ).

Моделирование работы ЭГД–преобразователя проводилось в пакете программ ANSYS. На рисунке (рис.4.27) представлена сетка модели в области расположения электродов и в канале.

#### **Решение электростатической и гидродинамической части задачи, принятые приближения**

На рис.4.28 представлена геометрия межэлектродного промежутка, темной полосой выделена область приложения объемного заряда, заряд задается однородным во всей области приложения.



**Рисунок 4.28.** Геометрия межэлектродного промежутка, темной полосой выделена область приложения объемного заряда

В гидродинамической части задачи в пределах области локализации заряда задается плотность электрических сил, равная произведению электрического поля на плотность заряда.

На внешней и внутренней поверхностях системы задаются условие Неймана (равенство нулю нормальной составляющей электрического поля).

### Граничные условия. Задание нагрузок

Разность потенциалов на электродах – 20 кВ.

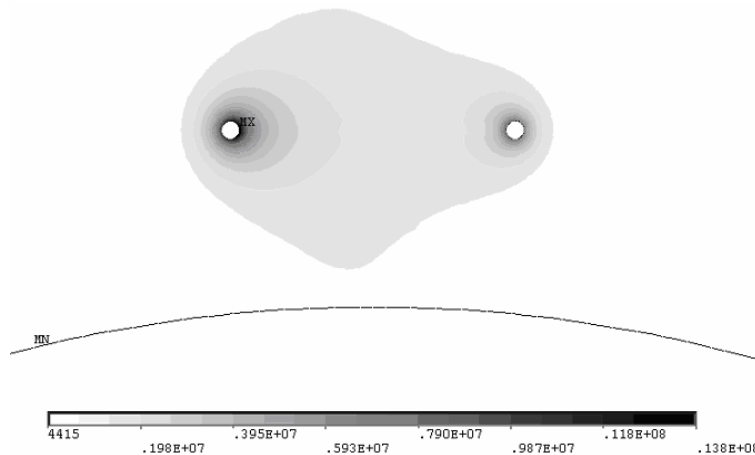
Рассматриваются три различных толщины области локализации заряда:

- $d = 1/3 \cdot h = 0.017$  см,
- $d = 1/2 \cdot h = 0.025$  см,
- $d = 4/5 \cdot h = 0.040$  см.

Задано прилипание жидкости на стенках канала и на электродах.

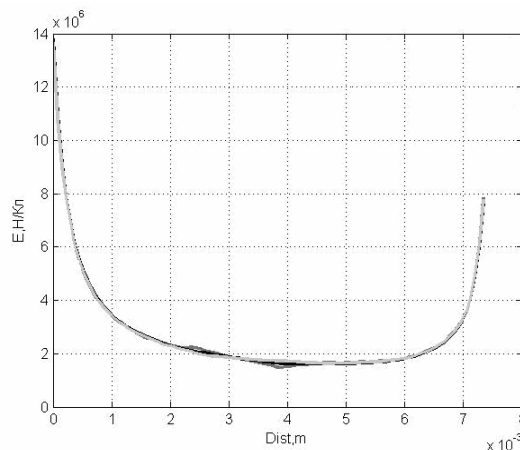
### Анализ решения электрической задачи

На рис.4.29 представлено распределение напряженности электрического поля в области локализации электродов. Видно, что распределение поля несимметрично, у левого электрода поле выше, чем у правого.



**Рисунок 4.29.** Распределение напряженности электрического поля у электродов

На рис.4.30 представлено распределение поля вдоль пути, соединяющем центры электродов. У каждого электрода наблюдаются всплески поля, однако у левого электрода максимум поля в два раза выше, чем у правого.

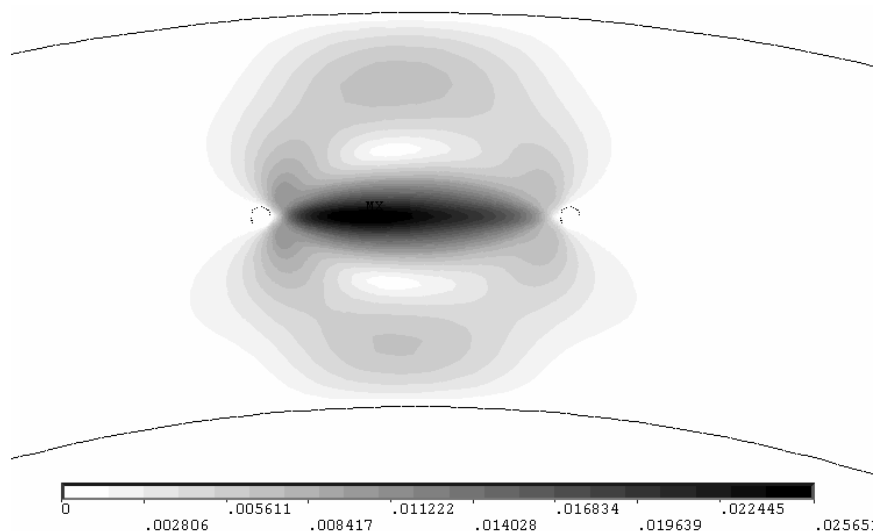


**Рисунок 4.30.** Распределение электрического поля вдоль пути, соединяющего центры электродов.



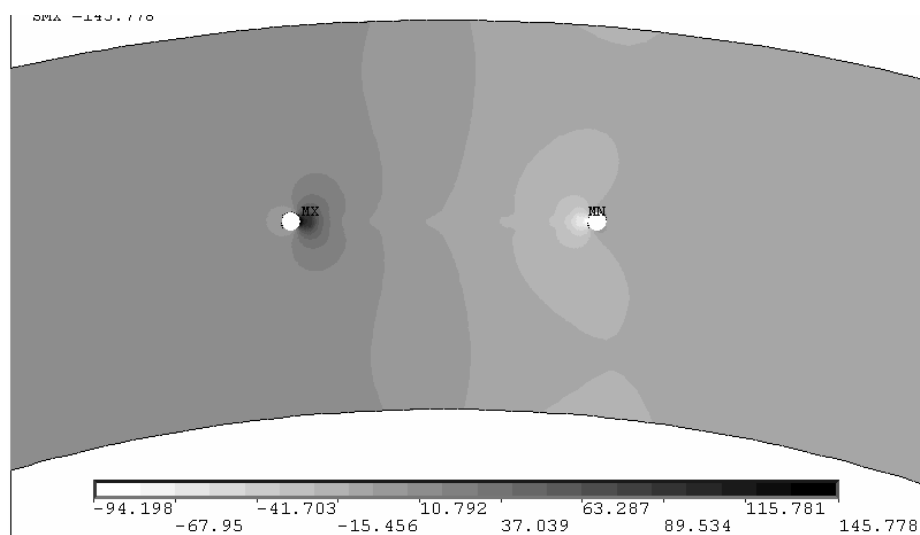
### Анализ решения гидродинамической задачи

На рис.4.31 представлено распределение скорости в межэлектродном промежутке. Течение направлено справа налево, от активного катода к аноду. Видна центральная струя жидкости, в пределах которой скорости повышены. Видны и возвратные течения.



*Рисунок 4.31. Распределение скорости в межэлектродном промежутке.*

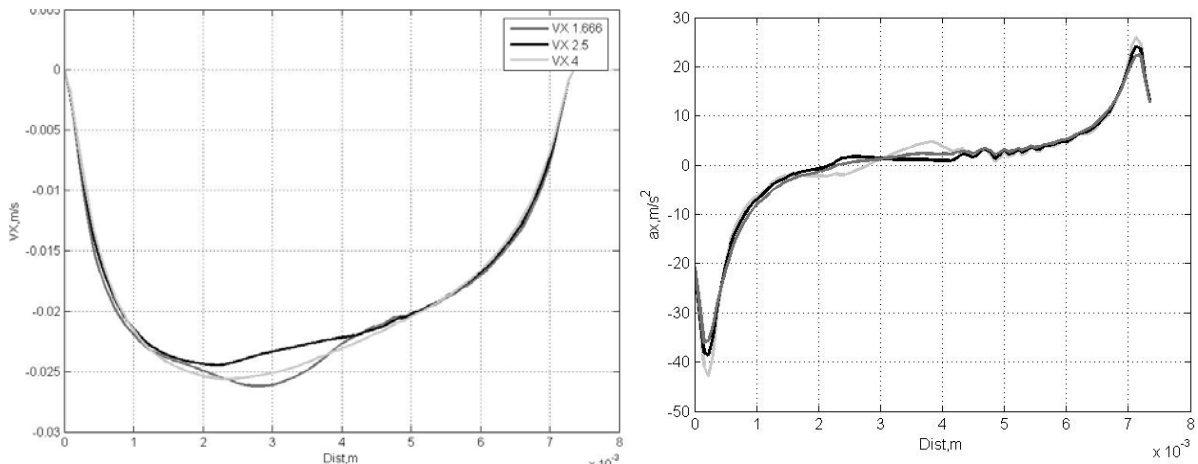
Давление (рис.4.32) понижено у активного электрода и повышено у пассивного.



*Рисунок 4.32. Распределение давления в межэлектродном промежутке.*

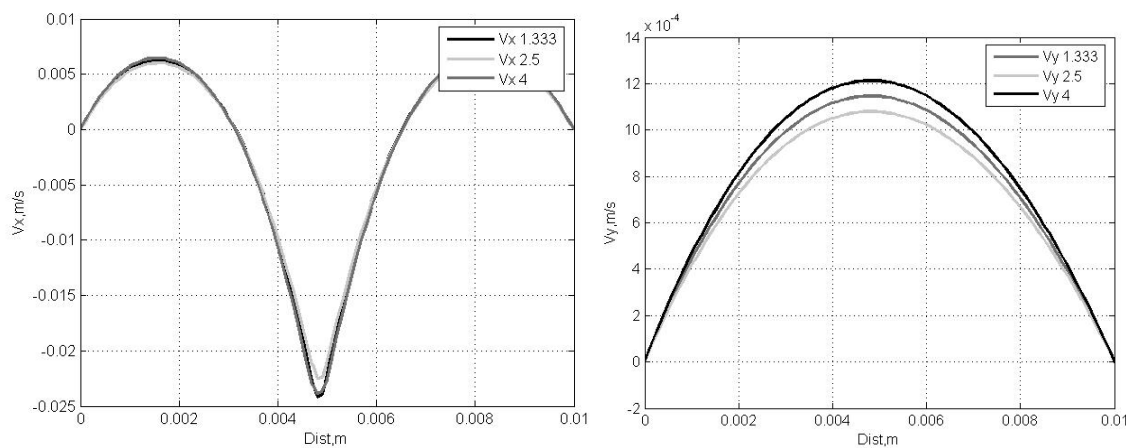
На рис.4.33 представлены линейные графики  $x$ -компоненты скорости вдоль пути, соединяющего центры электродов. Направление скорости противоположно направлению пути, поэтому скорость отрицательна. Несмотря на то, что в данном случае внешний канал замкнут, видно, что распределение

скорости имеет типичный характер, описанный ранее для течений в ограниченных объемах, и очень слабо зависит от заданной толщины заряженной струйки. У активного электрода имеется короткая зона ускорения, у пассивного – зона торможения, в центральной части течение слабо изменяется.



**Рисунок 4.33.** Распределение скорости (слева) и ускорения (справа) вдоль центральной оси течения для разных толщин заряженной струи.

На рис.4.34 представлены профили скорости течения в середине межэлектродного промежутка и в дальней части канала. Видно, что центральная заряженная струя имеет узкий профиль скорости, на периферии имеются возвратные вихри, направленные в обратную сторону. Профили практически не зависят от толщины заряженной струйки, а профили скорости в дальней части канала имеют параболический характер и слабо зависят от толщины заряженной струйки.



**Рисунок 4.34.** Профили скорости в середине межэлектродного промежутка (слева) и в дальней части канала (справа) при различных толщинах заряженной струи.

Интегрирование линейных графиков скорости даёт расход жидкости в центральной струе:

- $d = 1/3 \cdot h \rightarrow 0.765E-05$ ,
- $d = 1/2 \cdot h \rightarrow 0.721E-05$ ,
- $d = 4/5 \cdot h \rightarrow 0.810E-05$ .

Отношение расхода жидкости в дальней части канала к расходу в центральной части струи определяет относительный коэффициент прокачки:

$$d = 1/3 \cdot h \rightarrow 21.0 \%,$$

$$d = 1/2 \cdot h \rightarrow 20.6 \%,$$

$$d = 4/5 \cdot h \rightarrow 20.4 \%.$$

Как видно, коэффициент относительной прокачки составляет величину около 20 % и слабо зависит от заданной толщины заряженной струи.

### **Выводы**

Таким образом, возвратные вихри существуют даже в каналах малой протяженности и в отсутствии выноса объемного заряда за пределы межэлектродного промежутка. Основные характеристики ЭГД–течения слабо зависят от толщины заряженной струи.

## **Обратный ЭГД–эффект**

### **Физический механизм обратного ЭГД–эффекта**

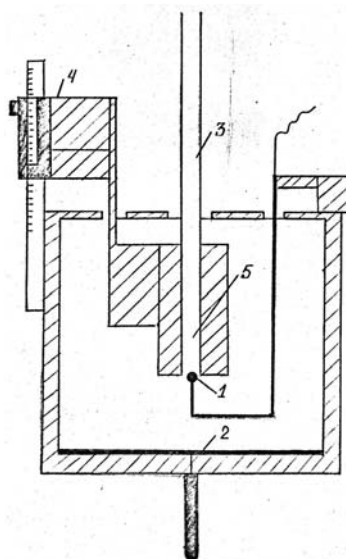
Как уже отмечалось, процессы высоковольтной электропроводности в жидких диэлектриках определяются ионизационно–рекомбинационным механизмом. Поверхностная ионизация, конвективная доставка заряда в объем и объемная рекомбинация определяют токопрохождение и ЭГД–течения в жидкости. Если оба электрода находятся в свободном пространстве, то при равной скорости поверхностного зарядообразования в жидкости наблюдаются встречные ЭГД–течения, доставляющие заряд в объём. Если скорость поверхностного зарядообразования у одного из электродов существенно выше, чем у другого, то встречные ЭГД–течения переходят в сквозное. При этом распределение электрического поля существенно отличается от рассчитанного в электростатическом приближении. Вместо возрастания напряженности электрического поля у поверхности электродов наблюдается область пониженной напряженности, обусловленная наличием объемного заряда, возникающего у поверхности каждого электрода в результате ионизации примесных молекул.

Если один из электродов разместить в узком канале из диэлектрика, то плотность объемного заряда, возникающего на поверхности данного электрода, существенно возрастет, так как механизм его отвода существенно затормозится, наличие канала исключает ЭГД–течения внутри канала. При достаточно высокой плотности заряда, одноименного с зарядом электрода, внутри канала, напряженность электрического поля в приэлектродной области может оказаться существенно ниже средней. Поэтому плотность кулоновских сил  $E$  в

приэлектродной области будет меньше, чем в свободном пространстве. В то же время приток заряда противоположного знака от поверхности противоэлектрода увеличится. В результате этих процессов направление результирующей электрической силы внутри канала может изменить знак на обратный и вместо сквозного течения от катода в канале наблюдается подъем жидкости, а направление течения в свободном пространстве изменяется на обратное. Это явление обнаружено при исследовании ЭГД–течений в узких каналах и получило название обратного ЭГД–эффекта. Ввиду повышенной концентрации электрических сил в канале, это явление можно использовать для создания ЭГД–преобразователей, развивающих высокие давления.

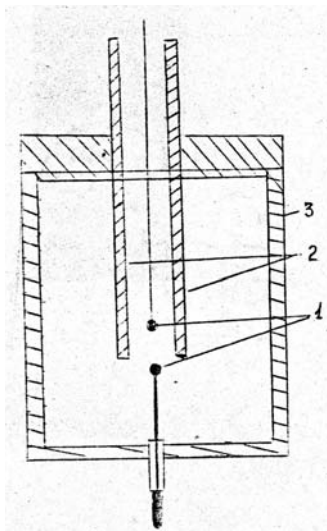
### **Основные свойства обратного ЭГД–эффекта**

Свойства обратного ЭГД–эффекта исследовались в изооктане и трансформаторном масле с примесями бутилового спирта. Исследования проводились в цилиндрическом и щелевом каналах. В первом случае в качестве электродов использовалась система «шар–плоскость», во втором – система двух параллельных проволочек из различных материалов. В ряде последних исследований, направленных на поиск оптимальных вариантов конструкции, использовался канал сложной конфигурации. На рис.4.35 представлена схема экспериментальной кюветы для исследования обратного ЭГД–эффекта. Электрод (1) шаровой формы укреплялся на держателе, изолированном полиэтиленовой трубкой. Электрод (2) – медная пластина, укреплен на дне кюветы. Цилиндрический канал (5), высверленный в пластинке из оргстекла мог перемещаться относительно неподвижно укрепленного электрода (1) при помощи координатного устройства. Продолжением канала служила трубка манометра (3), выполненная из полиэтилена, являющегося, также как и оргстекло, хорошим изолятором.



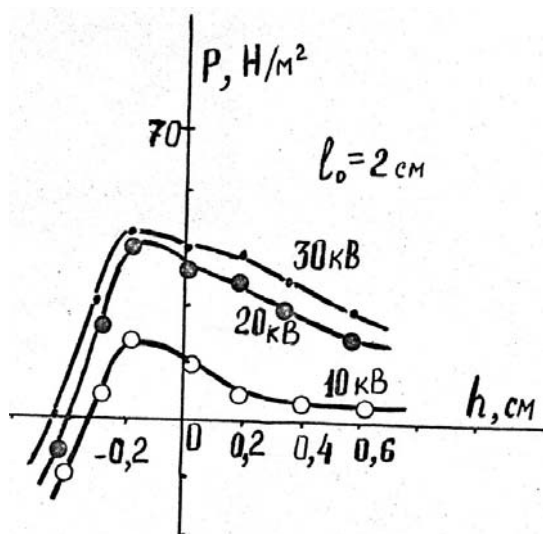
**Рисунок 4.35.** *Схема экспериментальной кюветы для измерения давления у электрода: 1 – шаровой электрод, 2 – плоский электрод, 3 – трубка манометра, 4 – координатное устройство, 5 – канал.*

В ряде экспериментов использовались кюветы, одна из которых представлена на рис.4.36. Основным отличием этих кювет являлась форма электродов – два взаимно параллельных цилиндра (проволочки) и форма канала – щель между двумя плоскими параллельными пластинами из органического стекла (рис.4.36) или прямоугольный канал более сложной формы.



**Рисунок 4.36.** Схема экспериментальной кюветы: 1 – электроды, перпендикулярные плоскости чертежа цилиндры, 2 – канал из изолирующего материала, 3 – сосуд из оргстекла.

Первая группа исследований свойств обратного ЭГД-эффекта была проведена в кювете (рис.4.35) для системы электродов «игла – плоскость» (сталь–медь) и «шар – плоскость» (сталь, алюминий – медь).

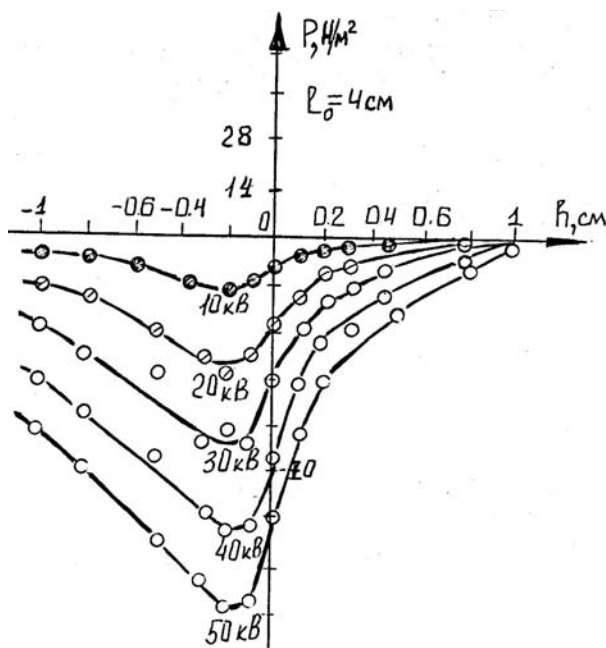


**Рисунок 4.37.** Зависимость давления у электрода от глубины его погружения в канал. Электроды медная игла – плоскость. Жидкость – ЛЗТК-2. Поднятие жидкости на иглу.

В чистой жидкости (ЛЗТК–2) без примесей наблюдались зависимости избыточного давления  $P$  от глубины погружения электрода в канал, представленные на рис.4.37. Длина игольчатого электрода, контактирующего с жидкостью, составляла 5 мм, расстояние  $l$  измерялось от кромки канала до кончика иглы; значения  $l > 0$  соответствуют случаю, когда игла выступает из канала,  $l < 0$  – когда кончик иглы находится внутри канала. Зависимости имеют экстремум при  $l = -0,2$  см.

Аналогичные зависимости наблюдались в чистом трансформаторном масле.

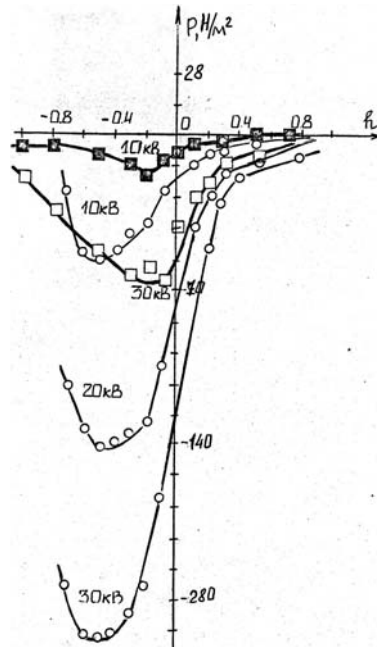
При введении в жидкость примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами, например, бутилового спирта, вид зависимостей изменяется на обратный (рис.4.38). Процентное содержание бутилового спирта в изооктане составляет 10 %, межэлектродное расстояние  $l_0 = 4$  см.



**Рисунок 4.38.** Зависимость давления у шарового электрода от глубины погружения этого электрода в канал при разных напряжениях; шар стальной;  $l_0 = 4$  см,  $\sigma_0 = 1,4 \cdot 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ .

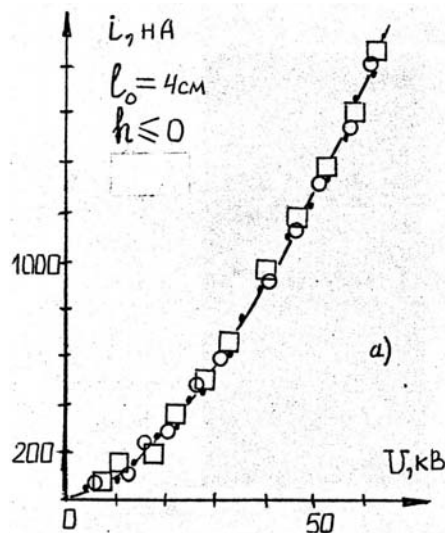
На рис.4.39 представлены зависимости  $P(h)$ , снятые при напряжениях 10, 20 и 30 кВ, в той же жидкости (смесь ЛЗТК–2 с бутиловым спиртом) при  $l = 1$  см и 4 см. Зависимость имеет экстремум в области  $l = 15$  мм.

Зависимости  $P(h)$  (рис.4.39) получены для шарового электрода из алюминия, активированного очисткой. Методика очистки поверхности электродов описана ниже.



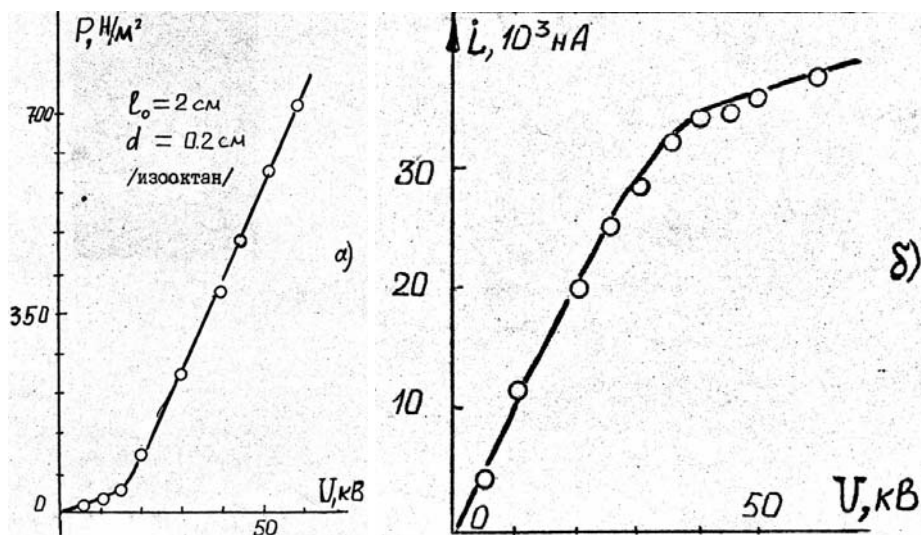
**Рисунок 4.39.** Зависимость давления у шарового электрода от глубины погружения электрода в канал при разных напряжениях,  $l_0 = 1$  см,  $\sigma_0 = 1,4 \cdot 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ . ■, □ – зависимости  $P(h)$  при  $l_0 = 4$  см, нанесены для сравнения

На рис.4.40 и 1.41 представлены вольтамперные характеристики ячейки при различных глубинах погружения электрода в канал. Рисунки различаются величиной  $h$ . Видно, что ток через жидкость практически не зависит от расположения электрода в канале или вне канала.



**Рисунок 4.40.** Вольтамперные зависимости ячейки со слабопроводящей жидкостью – изооктан и бутанол (10%), электроды – стальной шар – плоскость,  $l_0 = 4$  см при разном погружении шара в канал: а – ○ – электрод в канале, б – □ – электрод вне канала.

Видно (рис.4.41), что зависимости имеют иной вид, экстремума не наблюдается, замечен монотонный рост давления  $P$  по мере погружения электрода в канал. Избыточное давление, развиваемое парой электродов на межэлектродном промежутке 2 см при предпробойных напряжениях, весьма существенно и достигает 700 Н/м.



**Рисунок 4.41.** Зависимость давления (а) и тока (б) от напряжения при ширине канала 0,2 см в изооктане.

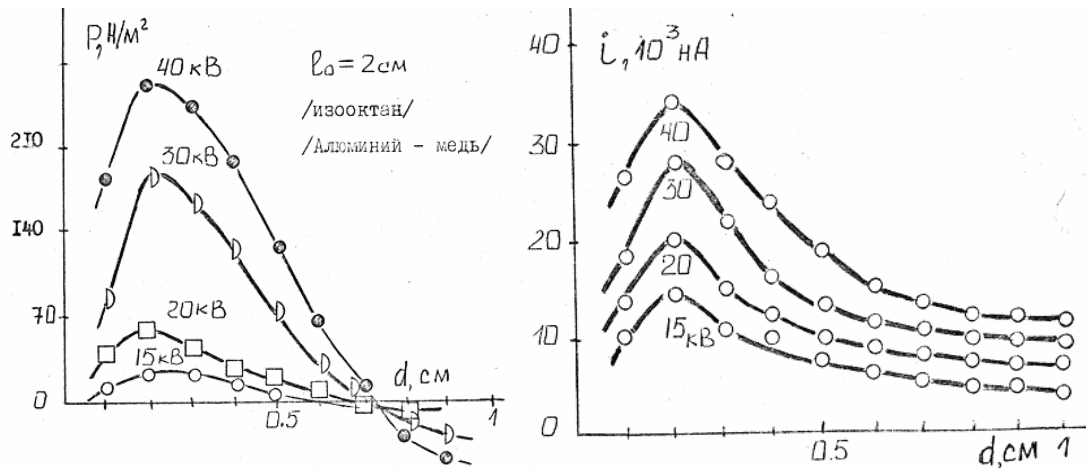
Итак, анализируя результаты исследований, проведенные для электродов «шар–плоскость» и «игла–плоскость», можно утверждать, что характер и величина обратного ЭГД–эффекта определяются границей электрод–жидкость и существенно образом зависят как от материала электрода, находящегося в диэлектрическом канале, так и от примесных добавок, введенных в жидкость.

Вторая группа исследований обратного ЭГД–эффекта была проведена в щелевом канале (рис.4.36), либо каналах более сложной формы, для электродов «провод–провод». Диаметр исследованных проводов одинаков, жидкость ЛЗТК–2 без примесей.

На рис.4.42 представлены зависимости давления  $P$  от расстояния  $d$  между стенками щелевого канала, снятые при различных напряжениях. Оба электрода находятся внутри канала, как это показано на рис.4.36, катод выполнен из алюминия, анод – из меди,  $l_0 = 2$  см.

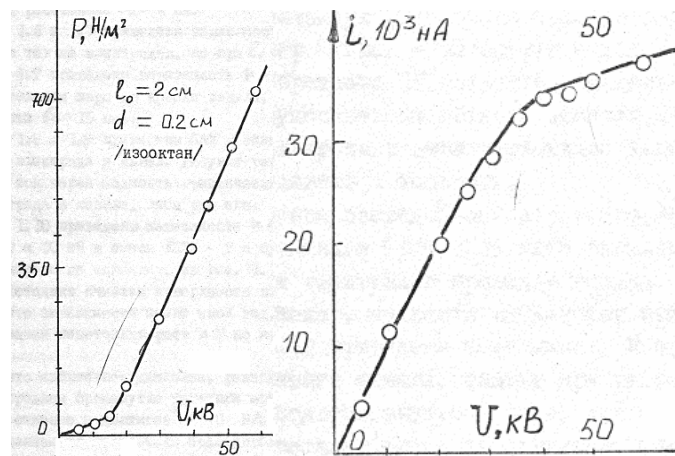
Зависимости  $P(h)$  так же, как и для электродов шар–плоскость имеют экстремум при  $d = 2$  мм. Если ширина канала велика, более 7 мм, эффект пропадает, а затем меняет знак, т.е. в канале возникают обычные ЭГД–течения. Вольтамперные зависимости (рис.4.42) при различных напряжениях имеют экстремум, причем максимум тока соответствует ширине щели  $d = 2$  мм.





**Рисунок 4.42.** Зависимость давления в канале от ширины канала (а) и вольтамперная характеристика (б) при разных напряжениях.

На рис.4.43 представлена зависимости давления в канале и тока от напряжения при  $l_0 = 2 \text{ см}$  и  $d = 0,2 \text{ см}$ .



**Рисунок 4.43.** Зависимость давления (а) и тока (б) от напряжения при ширине канала 0,2 см в изооктане.

Вид зависимости  $P(U)$  монотонно-возрастающий, близкий к линейному, в то время как зависимость  $i(U)$  имеет тенденцию к насыщению. Величины максимальных давлений достигают 700 Н/м, что соответствует напряженности электрического поля в канале  $\sim 60 \text{ кВ}/\text{см}$ .

Однако, представленные на рис.4.43 кривые, имеют место только для свежеприготовленных электродов, в течение нескольких часов эффект значительно снижался. В связи с этим были предприняты исследования электродов, выполненных из других металлов Au, Mg, Zn, Ta, Ti, Cu, а также металлов, поверхность которых консервировалась защитной пленкой.

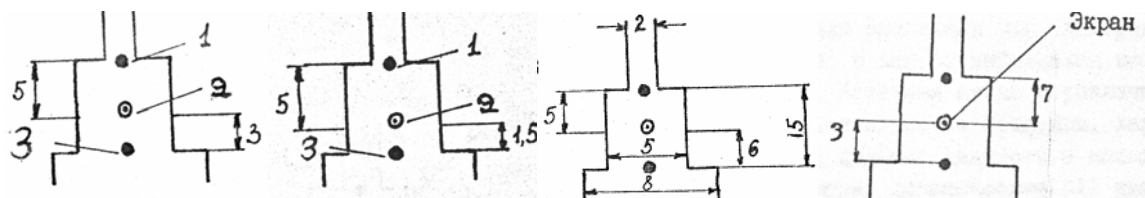
Исследования проводились для системы электродов, содержащих наряду с анодом и катодом, дополнительный третий электрод (экран), изолированный от жидкости полиэтиленовой трубкой и размещенный в непосредственной близости от катода и электрически соединенный с анодом. Такая

трехэлектродная система позволяла существенно повысить напряженность электрического поля у поверхности катода и усилить перепад давлений в канале.

Исследование обратного ЭГД-эффекта в щелевых каналах сложной формы проводилось с целью получения максимально-возможного перепада давлений на одиночной ступени ЭГД-преобразователя. Предварительные исследования показали, что анод и катод, изготовленные из различных материалов следует размещать в щелевых каналах различной ширины. Наиболее оптимальной оказалась трехступенчатая форма канала, в которой катод размещался у входа в щелевой канал размером 2 мм, а промежуточный электрод и анод размещались в щелевом канале размером 5 мм, третья ступень канала была шириной 8 мм.

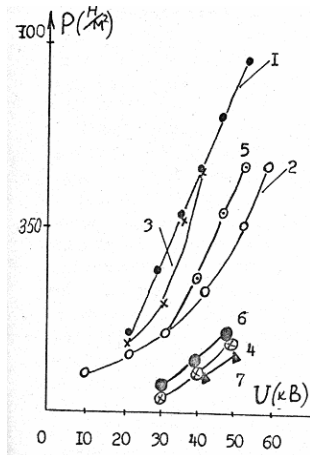
Исследования проводились на установке, содержащей управляемый внешним генератором источник высокого напряжения и систему автоматической регистрации токов. Динамические вольтамперные характеристики автоматически регистрировались двухкоординатным самописцем ПДП-002, на ось  $x$  которого подавалось напряжение, а на ось  $y$  ток. Запись проводилась при двух скоростях роста напряжения, при которых напряжение повышалось от нуля до максимального за 100 или за 10 секунд.

На рис.4.44 представлены формы каналов ЭГД-преобразователя, для которых проводились исследования высоты подъема жидкости в канале (рис.4.45), а также динамических вольтамперных характеристик (рис.4.46).



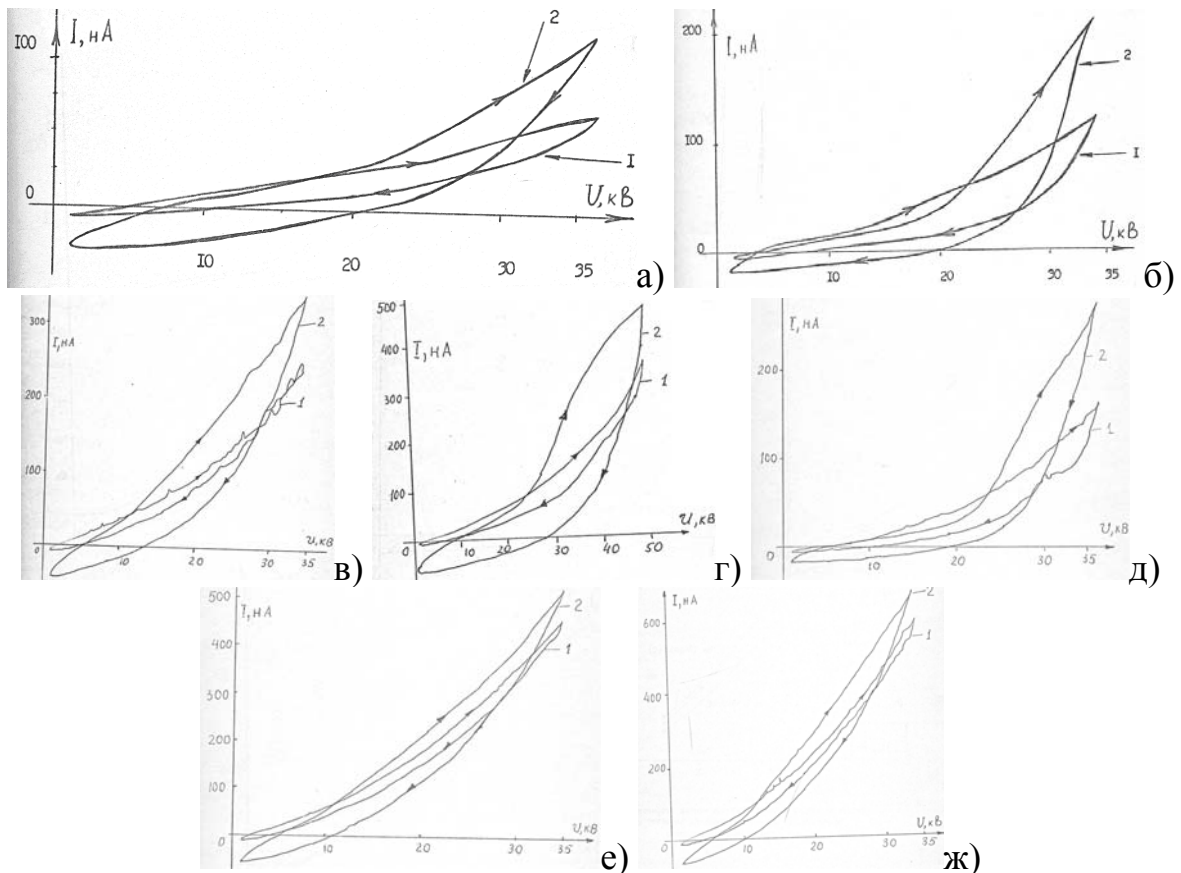
*Рисунок 4.44. Каналы переменного сечения ЭГД-преобразователей*

Подъем жидкости, в данном случае ЛЗТК-2 без примесей, в канале наблюдался по направлению от катода к аноду. Материал анода в экспериментах выбирался различный. Как видно на представленных графиках, характер динамических вольтамперных характеристик, а также высота подъема жидкости в канале существенно зависит от материала анода. Динамические вольтамперные характеристики имеют выраженный гистерезис – величина тока соответствующего росту напряжения значительно выше, чем при его спаде, проявляющийся более ярко при высоких скоростях роста и спада напряжения. Гистерезис тока для анода из алюминия, титана и тантала практически вырождается при малых скоростях роста и спада напряжения, ход динамических вольтамперных характеристик имел наиболее плавный характер и наименьшие отклонения от линейной зависимости.



**Рисунок 4.45.** Зависимость давления в канале от напряжения для электродов: 1 – Au-Ta, 2 – Au-Mg, 3 – Au-Ti, 4 – Au-W20, 5 – Au-Al, 6 – Au-Al(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 7 – Au-Au.

Максимальные значения токов и давлений у этой группы катодов существенно выше, чем у катодов второй группы (Au, W20, Al(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)). Для этих электродов наблюдался также наиболее сильный гистерезис и низкие значения токов.



**Рисунок 4.46.** Вольтамперные характеристики для систем электродов: а – Au-Au, б – Au-Al(неочищенный), в – Au-Al, г – Au-Mg, д – Au-W20, е – Au-Ta, ж – Au-Ti. 1 – быстрое изменение напряжения, 2 – медленное.

Как уже отмечалось ранее, электроды, электролитически очищенные в растворе NaOH, с течением времени значительно старели. Не подвергались заметному старению только электроды из золота. Для стабилизации свойств поверхности электродов была разработана методика консервации очищенной поверхности электродов лаковыми плёнками. Данные, представленные на рис.4.45, получены для очищенных электродов, консервированных лаковыми пленками.

Анализ результатов исследования обратного ЭГД–эффекта выявляет оптимальную конструкцию канала ЭГД–преобразователя и позволяет подобрать пары анод–катод, дающие наиболее высокие результаты. К таким парам следует отнести Au–Ta; Au–Ti; Au–Al.

## **Исследование процессов старения активированных электродов**

### **Старение активированных электродов, в изооктане, находящемся в контакте с атмосферным воздухом**

Ранее было показано, что электроды из электрохимически очищенные металлов с малой работой выхода электрона показывали значительное усиление скорости ЭГД–течений и тока, протекающего через жидкость. Однако со временем этот эффект пропадал, электроды старели. Старение электрода может происходить за счет покрытия его поверхности окисной пленкой в результате взаимодействия металла с растворенным в жидкости кислородом, либо за счет взаимодействия металла с примесными добавками. Для разделения этих процессов следует дегазировать жидкость, а затем вместо атмосферного воздуха растворить в жидкости инертный газ.

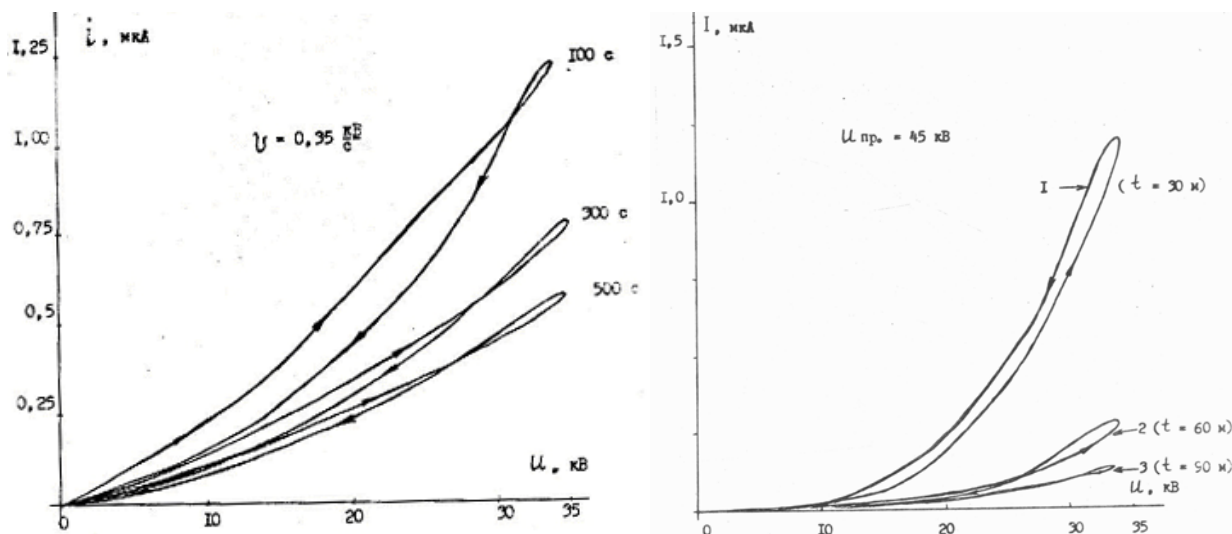
Исследования динамических вольтамперных характеристик проводились в специальной герметизированной кювете, позволяющей вакуумировать пространство над исследуемым объемом жидкости, а также заполнить его инертным газом. В качестве жидкости использован изооктан, проводимостью  $\sigma_0 = 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  и очищенное трансформаторное масло ( $\sigma_0 = 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ).

Изучение процессов старения активных электродов проводилось путем автоматической регистрации динамических вольт амперных характеристик, либо записи зависимостей тока через жидкость от времени в различных условиях:

- при заполнении свободного пространства кюветы атмосферным воздухом;
- при вакуумировании свободного пространства над поверхностью жидкости;
- при заполнении свободного пространства аргоном или фреоном.

На рис.4.47, слева, представлены динамические вольтамперные характеристики системы активированных  $\text{Al}^+ - \text{Au}^-$  полученные сразу после очистки алюминиевого электрода. Открытая поверхность жидкости контактирует с атмосферным воздухом. Записано несколько периодов подъем–спад напряжения. Запись демонстрирует старение в процессе эксперимента. Время, соответствующее максимуму напряжения в конце каждого периода,

указано на графике. Видно, что старение электрода за десять минут эксперимента весьма существенно.



**Рисунок 4.47.** Старение системы Al–Au в изооктане с воздухом (слева) и с фреоном (справа)

### Старение электродов в обезгаженной жидкости

На рис.4.47, справа, представлены динамические вольтамперные характеристики, полученные для системы активированный  $Al^+ - Au^-$  в ЛЗТК-2. Эксперимент проведен в кювете, которая до эксперимента вакуумировалась, затем пространство над жидкостью заполнялось фреоном.

В процессе заполнения, часть фреона растворялась в изооктане, вольтамперная характеристика записывалась после установления равновесия газообразный фреон-изооктан, давление фреона 1 атм.

Динамические вольтамперные характеристики были получены через 30, 60 и 90 мин после подачи напряжения. Видно, что вид вольтамперных характеристик изменился (рис.4.47, слева), направление обхода гистерезисной кривой изменилось на обратное. Однако процесс старения не замедлился.

Таким образом, эксперименты с жидкостью ЛЗТК-2 и активированными электродами показывают, что процесс старения поверхности электродов обусловлен не взаимодействием с растворенным в жидкости кислородом, а взаимодействием с самой жидкостью. Поэтому для консервации поверхности электродов необходимо найти покрытие с одной стороны защищающее электрод от взаимодействия с жидкостью, а с другой стороны не ухудшающее зарядообразующих свойств поверхности электродов.

### Консервация поверхности электродов

Одной из основных задач при получении стабильных во времени ЭГД-эффектов, будет задача консервации активированного электрода. С одной стороны, надо сохранить его высокие ионогенные свойства, с другой – оградить, или существенно уменьшить, от образования окисных пленок на его

поверхности. Если представить себе пленку, покрывающую этот электрод и имеющую указанные свойства, то одним из ее свойств будет способность постоянно разрушать пленку окислов. Окисление и восстановление связаны с передачей и получением электронов; это также условие токопрохождения через кювету. Следовательно, надо на активированный электрод нанести такую пленку, которая бы проводила электроны от электрода, проводила поле к электроду и разрушала окисные образования, или не давала бы им возникать. В ряде экспериментов удалось выяснить, что вероятным объектом может быть покрытие лаковыми пленками. Нанесение покрытия на активированный электрод, в нашем случае – алюминиевый, происходит сразу же после активации. Просушка образца проводилась в термокамере в течение 5÷10 часов без обдувания электрода теплым воздухом, чтобы покрытие было более однородным по толщине. Затем электрод помещался в кювету с жидкостью (трансформаторное масло) и регистрировались вольтамперные и вольтвременные зависимости (рис.4.48), как при откачке воздуха и закачке аргона, так и без откачки.

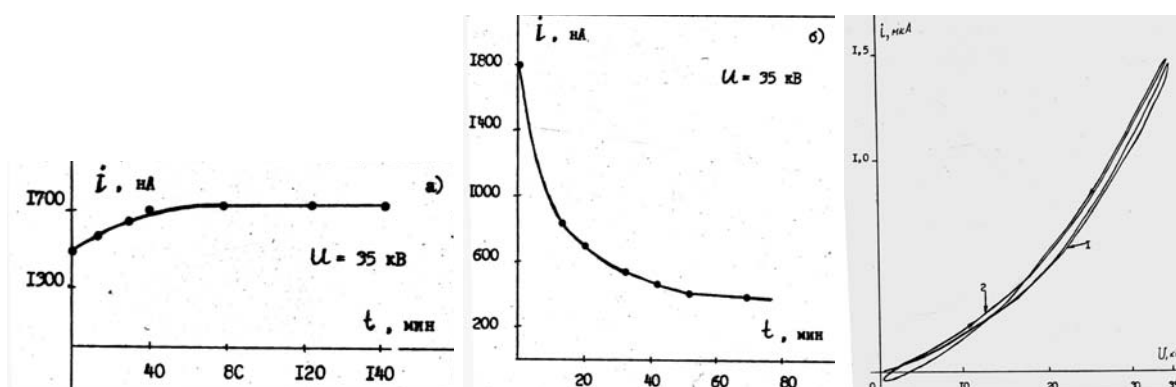


Рисунок 4.48. Старение электродов Au-Al: а, в – после консервации, б – без консервации

Перед экспериментом с покрытием, использовали электрод сравнения, идентичный испытываемому электроду из активированного алюминия, но без нанесения покрытия, для определения наибольшего тока после активации. Эксперимент показал, что для электрода сравнения и электрода, покрытого пленкой, получались близкие по величине токи, при напряжении 20 кВ, ток получался 200 нА, т.е. свойства активированного электрода сохранялись. Повторение эксперимента через сутки показало, что вольтамперные характеристики остались практически неизменными.

### Исследование работы ЭГД–насоса типа игла–конфузор [4,11-15,38]

Наряду с симметричной системой электродов типа провод-провод в лаборатории электрогидродинамики был проведен цикл исследований по изучению влияния материала электродов на рабочие характеристики

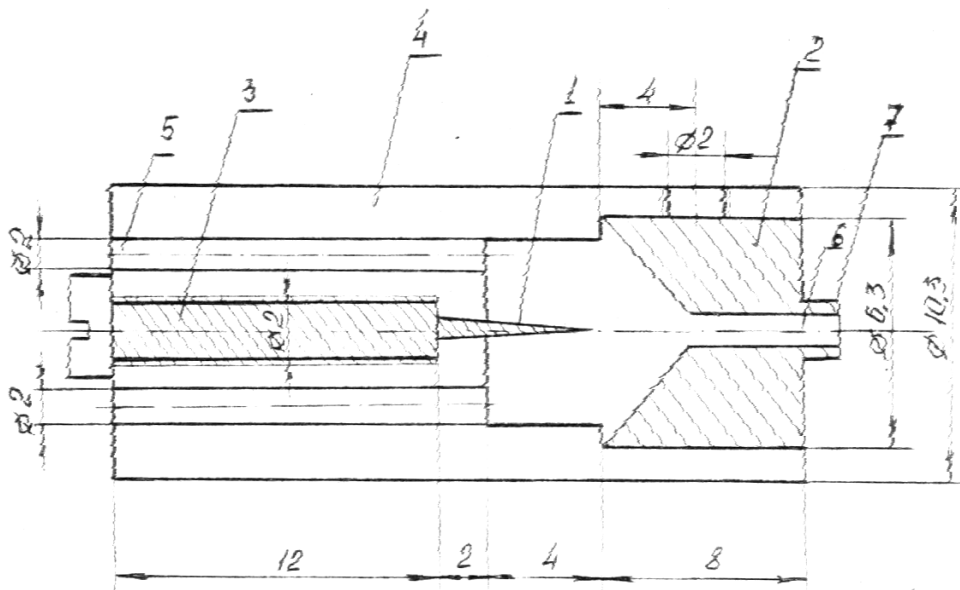
ЭГД–насоса с несимметричной системой электродов типа «игла в головке с коническим сверлением». Исследования проводились в статическом режиме – измерялось давление, развиваемое одиночной ступенью преобразователя.

Использовалась типовая экспериментальная установка, изготовленная на базе источника высокого напряжения специальной формы с использованием специальной кюветы и оригинального автоматизированного измерителя давлений типа ММ-1, разработанного в лаборатории Электродинамики. Измеритель давления измеряет и записывает на ленту самописца, либо в ЭВМ, давление, развиваемое одиночной ступенью ЭГД–преобразователя при одновременной записи вольтамперных характеристик. Экспериментальная установка представляет собой стенд, состоящий из высоковольтного блока, управляемого генератором, который задаёт линейно спадающее–растущее напряжение, блока регистрации тока через кювету и блока видеоконтроля, который обеспечивает контроль за центровкой электрода–иглы и за наличие пузырьков воздуха в межэлектродном пространстве. Блок регистрации включает в себя самописец, либо ЭВМ, позволяющий фиксировать динамические вольтамперные характеристики и данные о давлении, развиваемом преобразователем. Высокоточный вольтметр В7-16А, фиксирует напряжение, поданное на электрод, через делитель  $R_1R_2$ . В высоковольтном блоке используется ограничительное сопротивление  $R \sim 0.1$  ГОм.

Экспериментальная кювета представляет собой стакан, внутрь которого помещена одиночная ступень ЭГД–преобразователя (рис.4.49). Насос состоит из корпуса (4), сделанного из оргстекла, с отверстиями (5) для протока жидкости и двух электродов: игольчатого (1), закрепленного в винте-держателе (3) и цилиндрического с конусообразным сверлением (2), именуемого в дальнейшем «коническим». В коническом электроде высверлено отверстие (6) для протока жидкости и имеется выступ (7) для подсоединения трубки манометра типа ММ-1. Точность измерения давления составляет  $\pm 4$  мм Нг.

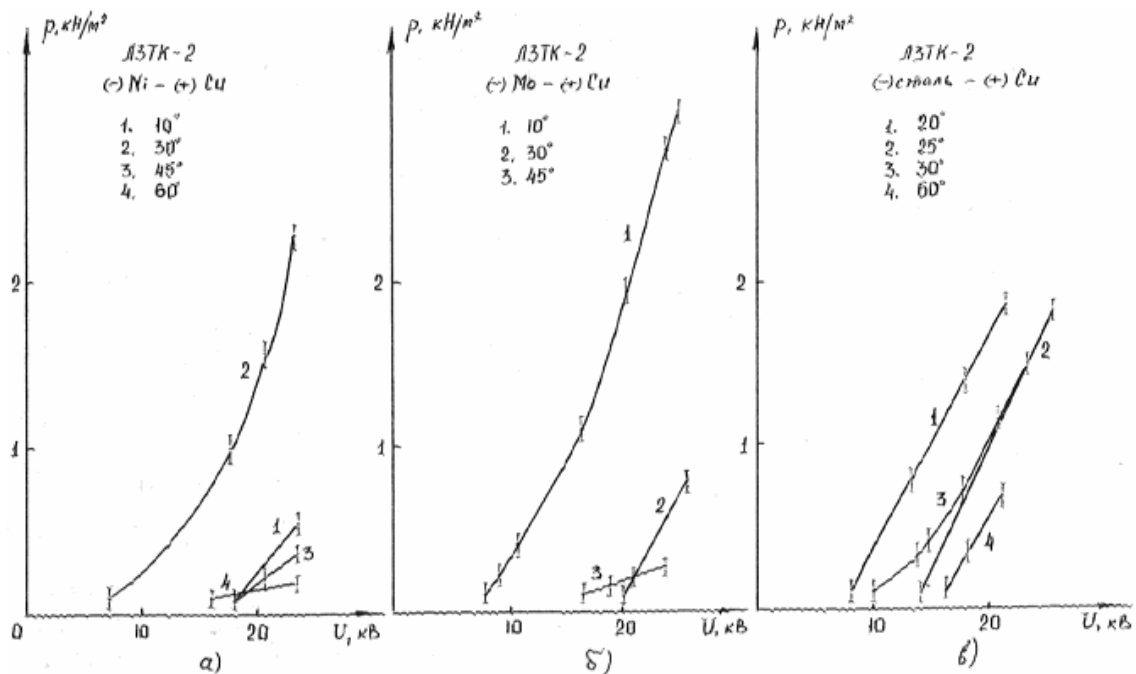
Предложенная конструкция позволяет при помощи винта (3) изменять и регистрировать межэлектродное расстояние с точностью не хуже 0,1 мм. Кроме того, игла проходит через отверстие, высверленное в корпусе ЭГД–преобразователя, что позволяет осуществить точную центровку кончика иглы относительно центра противоиэлектрода. Головка винта (3) служит высоковольтным контактом. (На эскизе размеры ЭГД-насоса представлены в миллиметрах).

Как оказалось, на работу ЭГД–преобразователя оказывает существенное влияние ряд факторов.



**Рисунок 4.49.** *Одиночная ступень ЭД-насоса. Размеры представлены в миллиметрах.*

Величина давления и пробивная прочность во многом зависят от степени заточки иглы, точнее от угла заточки (рис.4.50). На разных графиках (рис.4.50) представлены зависимости давления от подаваемого напряжения  $P(U)$  для разных материалов игл-электродов с разными углами заточки.



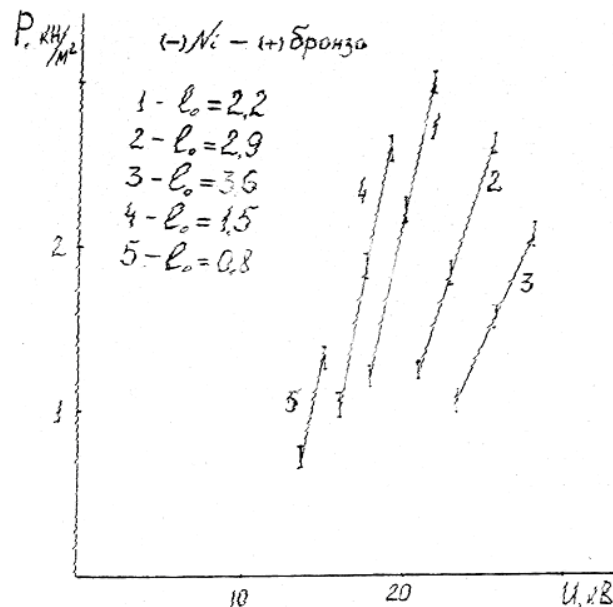
**Рисунок 4.50.** *Зависимости давления от напряжения на электроде-игле для игл из различных материалов и разных углов заточки.*

Кривая (2) для иглы из молибдена (рис.4.50, б) заметно отличается от кривых (1) и (3). Наибольшее значение давления развиваемого ступенью



соответствует углу заточки иглы  $10^\circ$ . При увеличении угла заточки эффект значительно уменьшается. Так, при напряжении  $U = 22$  кВ значения давления  $P$  для углов заточки  $30^\circ$  и  $45^\circ$  совпадают, а при угле заточки  $10^\circ$  значение давления  $P$  возрастает в 15 (пятнадцать) раз. Если изменить материал иглы, например, сталь (рис.4.50, в), то наибольшего эффекта можно достигнуть даже при уменьшении угла заточки. Кривая (1) соответствует углу заточки  $20^\circ$ , все остальные кривые соответствуют большим углам заточки. Однако, для никелевого электрода–иглы (рис.4.50, а), кривая (2), соответствующая углу заточки  $30^\circ$  демонстрирует в 5÷6 раз больший эффект, чем игла с углом заточки в  $10^\circ$ . Это говорит о том, что существует оптимальная (по получаемому давлению) величина угла заточки иглы для каждого конкретного материала иглы–электрода.

Эффективность работы преобразователя существенно зависит от величины межэлектродного расстояния, точнее, от расположения кончика иглы относительно переднего края противоэлектрода. Действительно, уменьшение межэлектродного расстояния при поддержании одного и того же напряжения приводит, при прочих равных условиях, к уменьшению пробивной прочности системы. Увеличение межэлектродного расстояния, хоть и повышает пробивную прочность, однако напряженность у игольчатого электрода падает, что снижает эффект. Поэтому следует ожидать существования оптимального межэлектродного расстояния.



**Рисунок 4.51.** Зависимости давления от напряжения при разных межэлектродных расстояниях  $l_0$

На рис.4.51 представлены зависимости давления от напряжения при разных межэлектродных расстояниях  $l_0$ . Видно, что при малых межэлектродных расстояниях, кривая (5) для  $l_0 = 0,8$  мм, пробой наступает при сравнительно малом напряжении  $U \sim 15$  кВ, при больших расстояниях,

например кривая (3) для  $l_0 = 3,6$  мм, пробой наступает при напряжении  $U \sim 36$  кВ, а эффект увеличения давления понижен. В то же время при  $l_0 = 2,2$  мм (кривая (1)) пробивное напряжение составляет  $U \sim 23$  кВ, а давление, развиваемое при таком напряжении в 2 раза выше, чем при  $l_0 = 0,8$  мм и на 30 % выше, чем при  $l_0 = 2,2$  мм. Т.е. наблюдается оптимальное расстояние для указанной системы электродов.

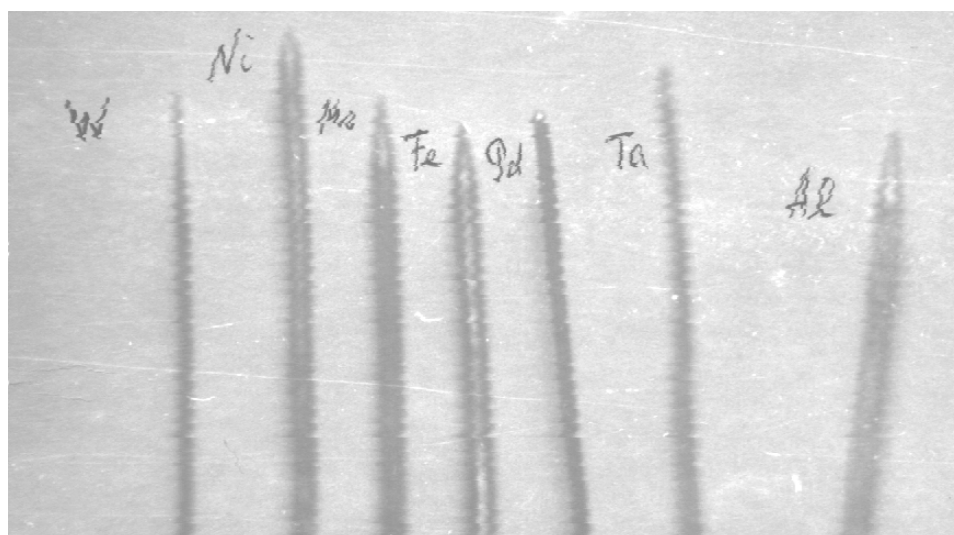
Отметим, что все эксперименты по изучению влияния материала электродов проведены при  $l_0 = 1,4$  мм.

Для изготовления игольчатых электродов использовались различные материалы с различными эмиссионными свойствами, в частности с различной энергией выхода электрона с поверхности в вакуум (табл.4.1).

Таблица 4.1.

Материал электрода	Ti	Nb	Ta	Al	Mo	Fe	Cu	Ni	W	Pd
Энергия выхода электрона в вакуум, эВ	3,95	3,99	4,12	4,25	4,3	4,31	4,4	4,5	4,54	4,8

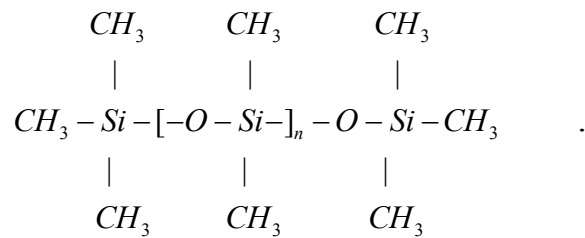
Для противозэлектрода–конуса использовались материалы Ti, Zn, Al, Fe, Cu, Cr. Чтобы избежать образования окисных пленок и загрязнения, электроды перед экспериментом очищались электрохимическим способом и хранились в изолированных от воздуха ёмкостях. На рис.4.52 представлена фотография электродов–игл, выполненных из различных материалов. Исследования проводились попарно – с каждым "коническим" противозэлектродом, выполненным из каждого упомянутого материала, испытывалась каждая из упомянутых игл.



**Рисунок 4.52.** Фотография электродов–игл.

В качестве рабочей среды использовалась жидкость ПМС-1,5 с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,4$  и удельной электропроводностью

$\sigma_0 = 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ , представляющая собой сложное кремнийорганическое вещество типа:



Это слабополярная жидкость плотностью  $\rho = 0,865 \text{ г/см}^3$ . Надо отметить, что хотя воздух слабо растворяется в этой жидкости, однако то его количество, которое в ней растворено, при подаче напряжения может приводить к образованию пузырьков и, соответственно, к пробоев межэлектродного промежутка. К понижению пробивного напряжения часто приводят частички пыли, осевшие на поверхности жидкости и внедренные затем в объём. Чтобы избавиться от них, в экспериментах, использовался специальный фторопластовый фильтр с диаметром пор не выше  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Жидкость, предварительно отфильтрованную фильтром Шотки с диаметром пор не выше  $10 \text{ мкм}$ , прокачивали через фторопластовый фильтр с помощью форвакуумного насоса. Контроль чистоты жидкости после фильтрования проводился с помощью микроскопа, дающего увеличение в  $200$  раз путем отбора проб жидкости. В качестве подсветки использовался лазер ЛГ-15. Число частичек подсчитывалось в зоне оптического поля микроскопа. Проверка показала, что после разовой фильтрации ПМС-1,5 концентрация загрязнения существенно падает; в жидкости не остаётся частичек загрязнения размером больше  $1 \text{ мкм}$ . В исследованиях использовалась жидкость, удовлетворяющая описанным нормам.

В качестве второй рабочей жидкости использовали изоктан  $\sigma_0 = 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 1,6$ , который подвергался такой же процедуре фильтрации.

На рис.4.53 представлена зависимость концентрации частиц загрязнения от количества фильтраций. Видно, что после первой фильтрации концентрация примесных частичек резко уменьшается: в ПМС-1,5 – в  $\sim 5$  раз, а в изоктане – в  $\sim 3$  раза. При последующих повторных циклах фильтрации концентрация частиц уменьшается слабо и кривая почти выходит в насыщение.

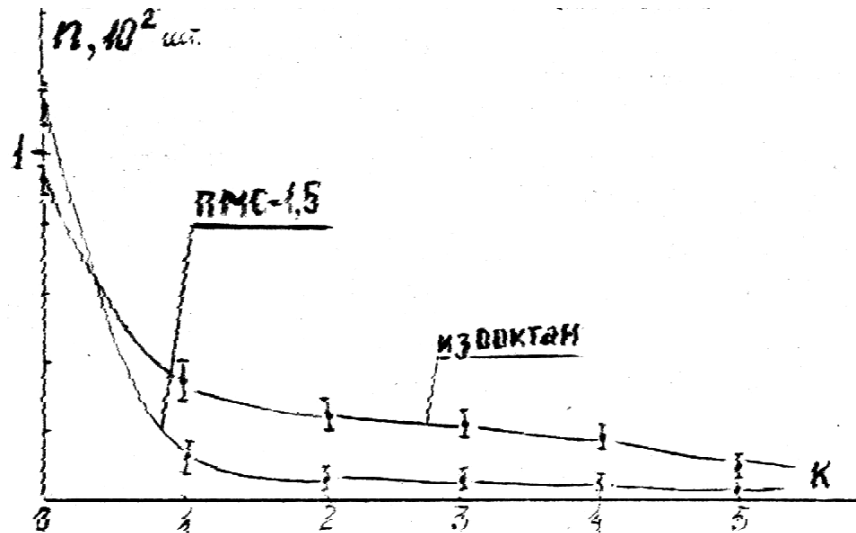


Рисунок 4.53. Зависимость концентрации частиц загрязнения в рабочей жидкости от количества фильтраций

На рис.4.54 представлены динамические характеристики давления и тока для электродов  $\text{Mo}^- - \text{Ni}^+$  в различных жидкостях. Все данные приведены для отрицательной иглы и положительного конфузора.

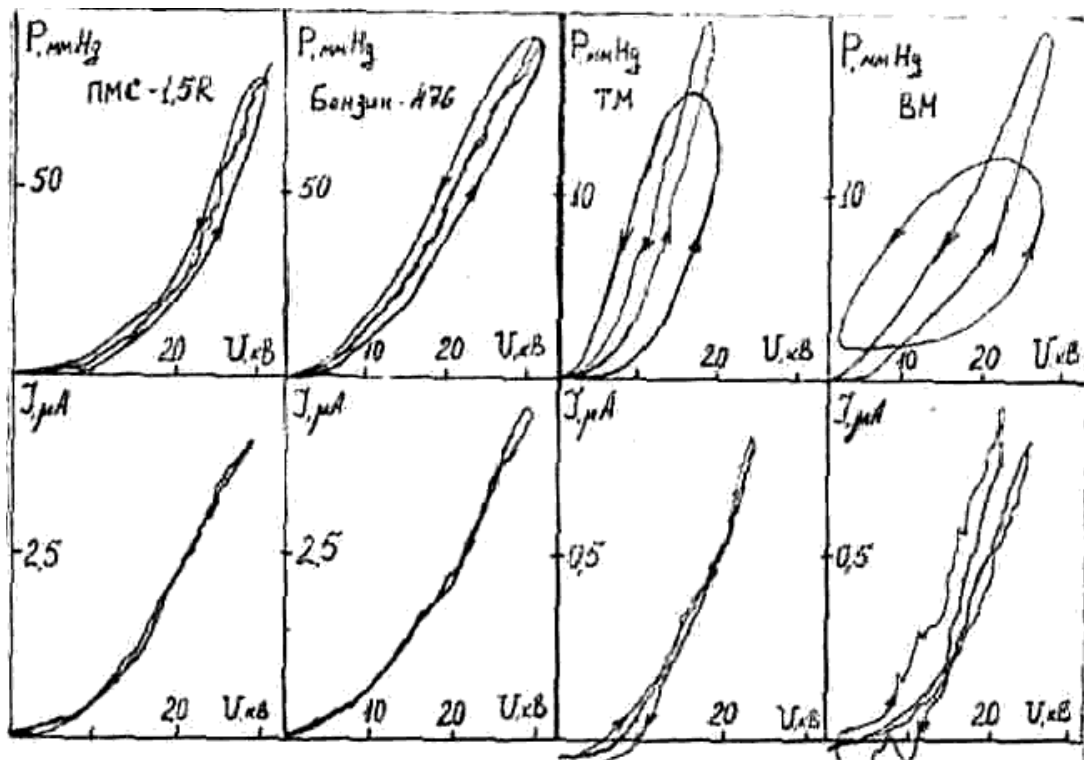


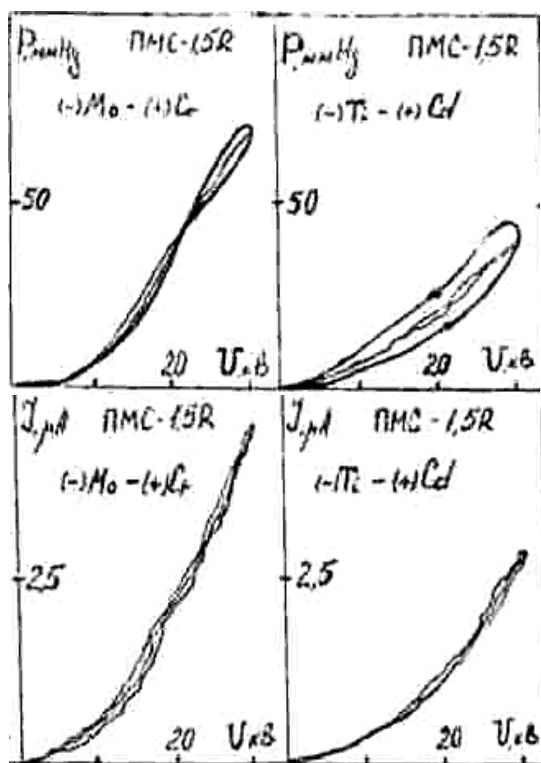
Рисунок 4.54. Динамические характеристики давления (сверху) и тока (снизу) для электродов  $\text{Mo}^- - \text{Ni}^+$  в различных жидкостях.

Динамические характеристики записаны при быстрой (5 кВ/сек) и медленной (0,5 кВ/сек) скоростях изменения напряжения. Стрелками обозначены направления изменения напряжения (рост и спад). Зависимости

имеют, как правило, гистерезисный характер, особенно хорошо выраженный при высоких скоростях изменения напряжения. Зависимости давления от напряжения  $P(U)$  имеет пороговый характер. Величина порогового напряжения зависит от параметров системы.

Вольтамперные характеристики (рис.4.54, нижний ряд)  $J(U)$  порога не имеют. Общая площадь петли гистерезиса зависимости  $J(U)$  несколько ниже, чем для зависимостей  $P(U)$ . Сопоставление зависимостей полученных в различных жидкостях выявляет их существенные различия, касающиеся как характера кривых  $P(U)$  и  $J(U)$ , так и величины гистерезиса, а также величин давления и токов. Последние существенно ниже в более вязких жидкостях, таких как трансформаторное и вазелиновое масла.

Большая серия исследований проведена для систем электродов одинаковой геометрии, идентичной рис.4.49, в которой анод и катод изготовлены из различных материалов. В каждой жидкости исследовано 60 различных металлических пар. Исследования выявили значительное влияние материала обоих электродов на динамические характеристики системы и на пробивную прочность, которая изменялась более чем в два раза.



**Рисунок 4.55.** Динамические характеристики  $P(U)$ (сверху) и  $J(U)$  (снизу) системы электродов «игла-конфузор» в ПМС-1,5R для пар электродов  $Mo^- - Cr^+$  (слева) и  $Ti^- - Cd^+$  (справа).

На рис.4.55 в качестве примера представлены динамические характеристики системы электродов «игла-конфузор» в ПМС-1,5R для различных пар электродов. Этот пример наглядно демонстрирует

количественные и качественные различия интегральных характеристик системы «электроды – жидкий диэлектрик» при изменении свойств межфазной границы, а именно материала электродов, при одинаковых прочих параметрах системы. Влияние поверхностных эффектов распространяется также и на гистерезисные свойства среда.

Таким образом, эти серии экспериментов, поставленные в сильнонеоднородных полях, свидетельствуют об определяющей роли в электрогидродинамических явлениях именно поверхностных процессов рождения и гибели ионов, а не объемных .

### **Влияние объемного заряда на процесс диспергирования жидкости в электрическом поле [15,39-42]**

Влияние объемного заряда на процессы диспергирования жидкости используется в ряде технологических процессов и устройств, среди которых, прежде всего, следует назвать электроокраску, электрокаплеструйные технологии и др. В основе всех названных процессов лежит изменение эффективного поверхностного натяжения заряженной капли.

В электрокаплеструйных компьютерных технологиях управляемая капля рабочей жидкости является одновременно и *исполнительным элементом* автоматических систем, что существенно увеличивает их быстродействие и позволяет максимально использовать преимущества микропроцессорного управления [42].

Электрокаплеструйные компьютерные технологии базируются на создании с их помощью электрокаплеструйных устройств (ЭКСУ), управляемых от микроЭВМ, линейной последовательностью потока монодисперсных капель технологической жидкости (до ста тысяч капель в секунду) одинакового диаметра (десятки, сотни микрометров), находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга; сообщении (при необходимости) *любой выбранной капле* заданного электрического заряда того или иного знака и отклонении в электрическом поле данной капли в заданную точку объекта управления.

Проведенный анализ показал, что с позиций обеспечения максимальной частоты каплеобразования в основу электрокаплеструйных технологий следует положить метод получения монодисперсного потока капель с использованием высокого давления, что обеспечивает производство до ста тысяч капель в секунду.

Под действием электрического напряжения  $U_n$ , поступающего на вход пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), входящего в состав электрокаплеструйной головки (ЭКСГ), ПЭП, меняя свои размеры, вызывает возмущение поля давлений в камере ЭКСГ и, как следствие, возникают возмущения поля скоростей в ламинарной струе технологической жидкости на выходе из сопла. Ламинарная струя технологической жидкости теряет

устойчивость под действием вынужденных возмущений диаметра струи от ПЭП в момент времени выхода ее из сопла. Эти возмущения за счет гидродинамической энергии самой струи технологической жидкости усиливаются по течению струи, возрастая во времени, и когда амплитуда возмущений становится равной радиусу струи на расстоянии  $L$  от среза сопла отрывается капля. При этом частота каплеобразования равна частоте  $f$  напряжения на входе ПЭП, а расстояние между каплями равно длине волны возмущения

$$\lambda = V_{cm} / f,$$

здесь  $V_{cm}$  – средняя скорость истечения ламинарной струи технологической жидкости.

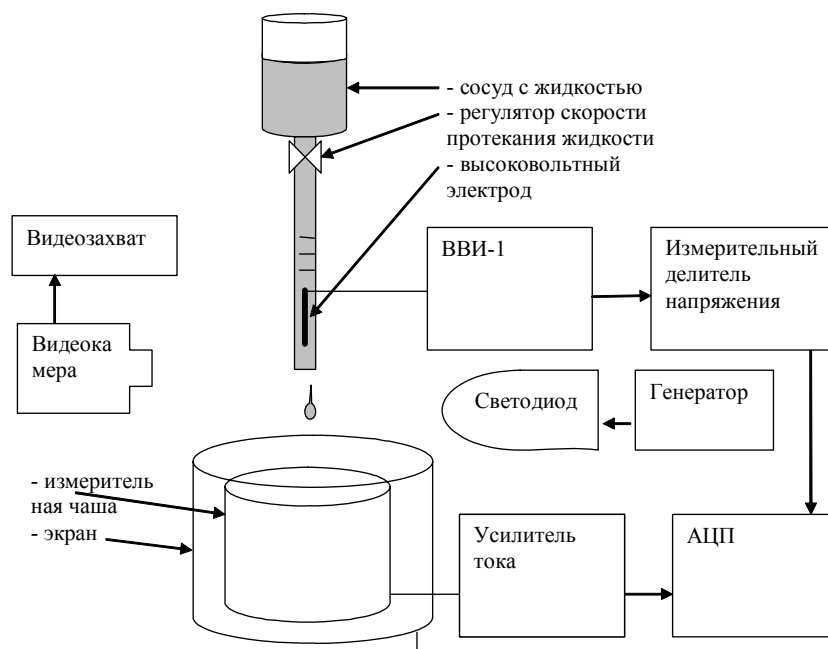
В точке отрыва капли от струи, на расстоянии  $L$  от сопла, размещается зарядный электрод той или другой формы, с помощью которого капле технологической жидкости сообщается электрический заряд того или иного знака и требуемой величины. Далее эта капля отклоняется в электрическом поле отклоняющих электродов и попадает в заданную точку объекта управления.

В основу построения электрокаплеструйной системы для реализации электрокаплеструйных технологий положены разработанные математические модели процессов индукционного сообщения электрического заряда  $q_k$  каплям технологической жидкости и их отклонения  $y$  в электрическом поле отклоняющих электродов с учетом электрофизических параметров технологической жидкости, физики исследуемых явлений, особенностей их нанесения на изделия в электрокаплеструйных технологиях, аэродинамического сопротивления движению капель, форму капель, влияния заряженных капель друг на друга при изменении электрических, гидродинамических и конструктивных параметров электрокаплеструйных устройств.

Электропрядение – это процесс получения волокон из струй растворов (расплавов) полимеров под действием электрического поля. Истекающая жидкость из капилляра диаметром  $\sim 1$  мм заряжается на эмитирующем электроде. Течение ускоряется электрическими силами и приобретает вид тонкой струйки. После испарения растворителя струя фиксирует свою форму в виде волокна и в зависимости от условий процесса его диаметр варьируется в диапазоне  $10\text{--}0,01$  мкм [43]. Нижний предел экспериментально полученных волокон составляет  $7$  нм [41,42].

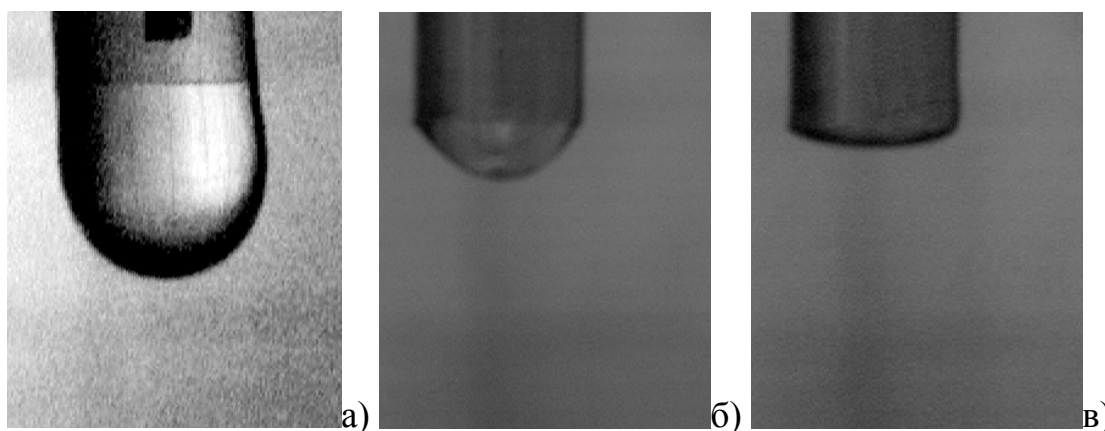
Процессы зарядки капли занимают особое место и их можно проводить различными методами. На рис.4.56 представлена схема установки по изучению процесса зарядки капель диэлектрической жидкости в сильных электрических полях. Установка позволяет измерять заряд отдельной капли при помощи чувствительного электрометрического усилителя. Установка оснащена

видеокамерой, регистрирующей процессы каплеобразования в зависимости от плотности объемного заряда капли.



**Рисунок 4.56.** Блок-схема экспериментальной установки по исследованию процесса зарядообразования диэлектрической жидкости

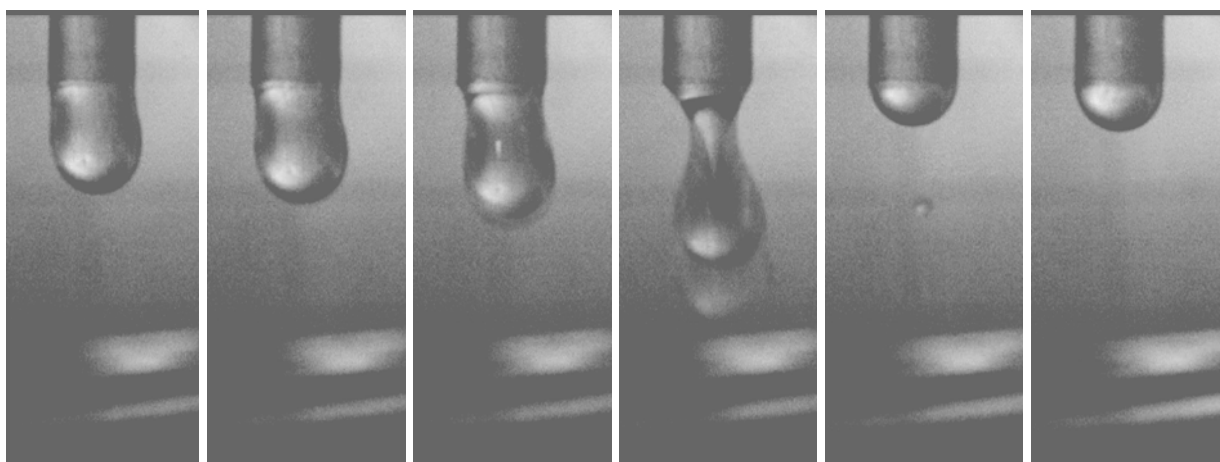
Проиллюстрируем стационарный режим (рис.4.57). Видно, что без напряжения на электроде (рис.4.57, а) могут образовываться большие висящие капли размером (диаметром) 3 мм, что соответствует большому поверхностному натяжению. На среднем кадре (рис.4.57, б) эффективное поверхностное натяжение ослаблено – капля значительно уменьшилась в размерах, ну а при высоком напряжении (рис.4.57, в), капля практически отсутствует, это соответствует значительному ослаблению эффективного поверхностного натяжения.



**Рисунок 4.57.** Стационарный режим образования капель на краю капилляра, а – без подачи напряжения на электрод, б – напряжение на электроде 6 кВ, в – напряжение 12 кВ.

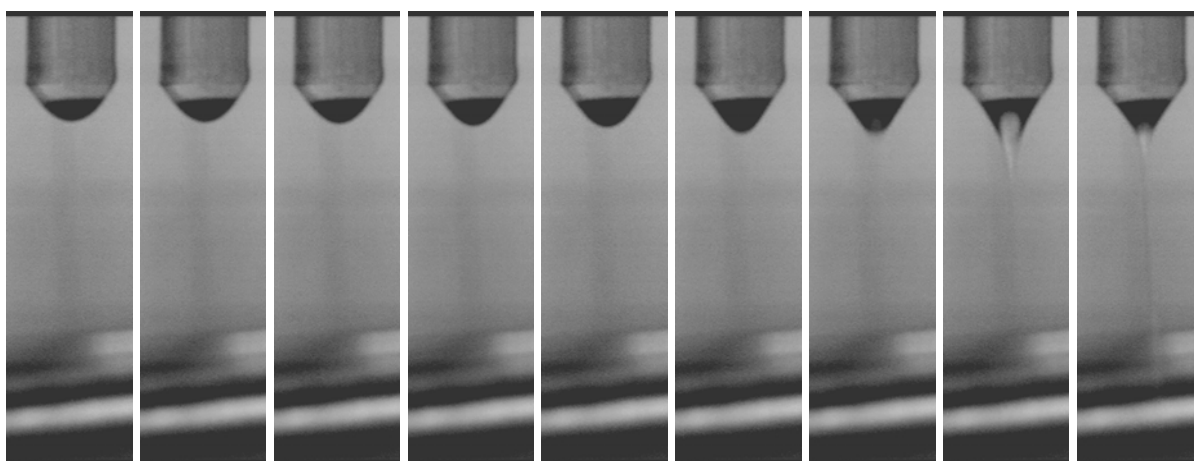


Видеокадры (рис.4.58) иллюстрируют процесс истечения капель через капилляр с электродом, на который подаётся высокое напряжение. При повышении напряжения наблюдается уменьшение радиуса кривизны капли, а частота падения капель увеличивается, удалось достичь четырехкратного увеличения частоты падения капель. При этом увеличивается плотность объемного заряда в жидкости.



*Рисунок 4.58. Истечение капель из капилляра с электродом, на который подаётся высокое напряжение.*

При достижении некоторой критической плотности заряда жидкости наблюдается переход от капельного режима истечения жидкости из капилляра в струйный режим, причем у кончика капилляра наблюдается очень тонкая струйка заряженной жидкости (рис.4.59). Заряженные капли и струйки жидкости широко используются в электрокаплеструйных технологиях.



*Рисунок 4.59. Переход к струйному режиму истечения жидкости из капилляра при подаче высокого напряжения на электрод.*

Критическую плотность объемного заряда  $\rho_{кр}$  можно оценить путем приравнивания сил поверхностного натяжения электрическим силам, разрывающим заряженную каплю жидкости:

$$2 \alpha/R = q^2/(4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^4) = 4 \cdot R^2 \rho^2 / (9 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0),$$

$$\rho_{кр} = [9 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha / (2 \cdot R^3)]^{1/2}. \quad (4.2)$$

Для изооктана при  $R = 10^{-3}$  м критическая плотность объёмного заряда равна  $\rho_{кр} = 5 \cdot 10^{-2}$  К/м<sup>3</sup>, что близко к значению, регистрируемому в эксперименте.

Совсем недавно, в 70-х – 90-х годах прошлого века, разработаны принципиально новые эффективные, так называемые [41], электрокаплеструйные технологии для различных областей науки и отраслей промышленности. Их характерной особенностью является то, что управляемая капля (органической или неорганической жидкости или раствора, расплава металла или полимера, капля эмульсии или суспензии биологических продуктов, фармацевтических препаратов, химических реактивов) является исполнительным элементом, причем ею управляют с использованием микропроцессоров или микро-ЭВМ по каким угодно законам (алгоритмам), целенаправленно изменяя ее параметры и обеспечивая то, что называется «гибкостью» управления.

Таким образом, может осуществляться, например, точное микрокапельное дозирование жидкостей в биологии и медицине, при биомедицинских исследованиях, и появилась прекрасная возможность на одном и том же техническом устройстве реализовать с передачей полутонов в черно-белом или цветном исполнении бесконтактным образом регистрацию знаковой, буквенно-цифровой, графической информации на носителях не только с плоскими, но и с криволинейными поверхностями из различных материалов (бумага, металл, пластмасса, стекло, кожи, ткани и т.д.).

Можно назвать и другие области применения управляемых капель, каждая из которых требует детальных научных исследований. Это, прежде всего, новые управляемые электрокаплеструйные технологии:

- производство химических нитей,
- точного нанесения жидких веществ на химические нити в процессе их производства, позволяющие улучшить качество нитей;
- эффективной промывки химических нитей, улучшающие экологические показатели при производстве нитей;
- дозированного сообщения электрического заряда при научных исследованиях и снятия электрического заряда с различных изделий;
- получения металлических и полимерных порошков с заданными параметрами, позволяющие существенно улучшить показатели изделий, изготавливаемые методами порошковой металлургии из этих порошков;

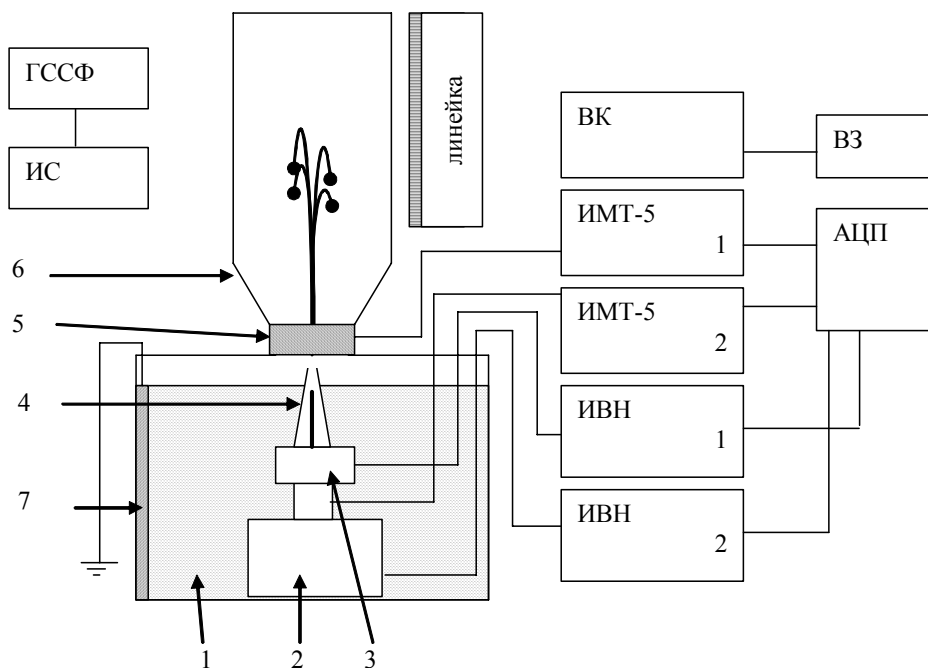
- сепарации (разделения) микрочастиц и живых клеток в биохимических препаратах по предварительно измеренным физическим и биохимическим параметрам;
- получения топливных смесей с требуемыми параметрами в двигателях внутреннего сгорания, ракетных двигателях, улучшающие энергетические и экологические показатели;
- получения из расплавов полых сферических микрогранул, позволяющие создать принципиально новые эффективные способы хранения и транспортировки сжатых газов, например, используемого в качестве горючего водорода, или в качестве окислителя – кислорода;
- маркировки полупроводниковых приборов, интегральных схем, жгутов, яиц, стальных листов и других изделий с различными физическими и геометрическими параметрами поверхностей;
- капельного формирования резисторов интегральных схем, отдельных деталей машиностроительного производства из металло-полимерных композиций;
- цветные полутеневые методы диагностики в медицине;
- печатание адресов, и другой информации на поверхностях различных физической структуры и форм;
- картография;
- цветное нанесение рисунков на ткани и другие текстильные изделия;

Кроме того, управляемые капли являются основным рабочим инструментом в выводных регистрирующих устройствах персональных компьютеров (так неточно называемые, «струйные принтеры» – на самом деле это электрокапельструйные принтеры), гибких автоматизированных производств, систем коллективного пользования, систем автоматизированного проектирования.

### **ЭГД–распыление диэлектрической жидкости [15]**

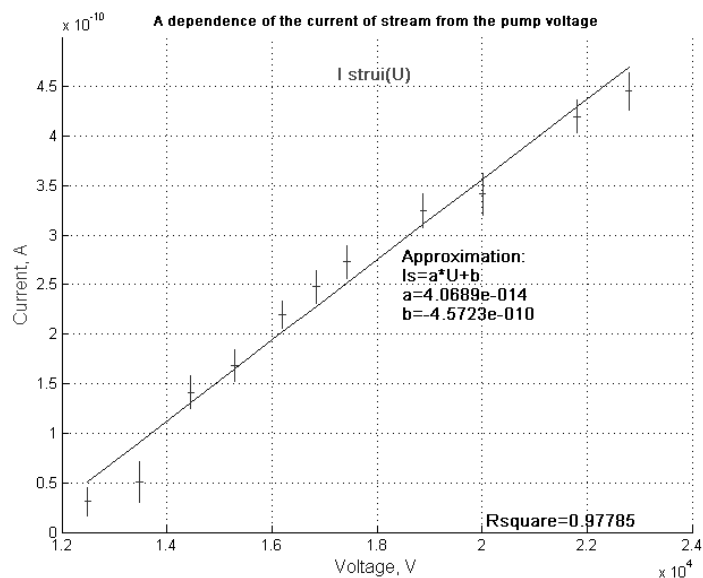
Эффект влияния объемного заряда капли на эффективность процесса диспергирования [38,39] рассмотрим на примере лабораторной установки, работающей в высоковольтной лаборатории НОЦ «Электрофизика». Исследование электрического диспергирования жидкости проводится в высоковольтной лаборатории НОЦ «Электрофизика» на оригинальной модели ЭГД–распылителя работающего на основе ЭГД-насоса типа игла-конфузор. При этом студентам предлагается исследовать зависимость диспергирования капель диэлектрической жидкости от плотности объемного заряда вводимого в диспергируемую струю.

Оригинальная установка для исследования электрического диспергирования слабопроводящей жидкости (рис.4.60), позволяет производить видеозапись процесса диспергирования одновременно с измерением тока через жидкость и плотностью заряда, вводимого в нее.



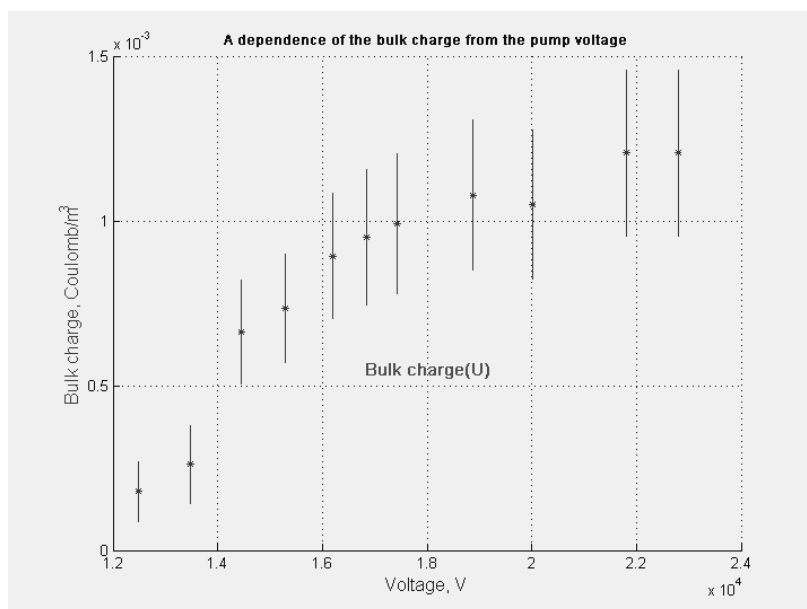
**Рисунок 4.60.** Блок-схема экспериментальной установки для исследования электрического диспергирования слабопроводящей жидкости. 1 – кювета с жидкостью; 2 – ЭГД-насос; 3 – зарядное устройство; 4 – капилляр распылителя; 5 – металлическое кольцо для измерения тока переноса заряженной жидкости; 6 – колба; 7 – заземленная пластина; ИВН – источник высокого напряжения ЭГД-насоса (2) и распылителя (1); ИМТ-5 – измерители малых токов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВК – видеокамера; ВЗ – видеозахват; ИС – осветительный фонарь; ГССФ – генератор сигналов специальной формы;

На этой установке можно получить зависимость силы тока, вызванного объёмным зарядом, переносимым диспергируемой жидкостью, от напряжения на ЭГД-насосе (рис.4.61). С достаточной степенью достоверности ( $R\text{-square} = 0,98$ ) полученный график можно аппроксимировать прямой. Значения силы тока, вызванного объёмным зарядом, переносимым диспергируемой струёй жидкости, на 4 порядка ниже, чем значения силы тока, протекающего через конус ЭГД-насоса.



**Рисунок 4.61.** Зависимость силы тока, вызванного переносимым объёмным зарядом диспергируемой жидкости, от напряжения на ЭГД-насосе.

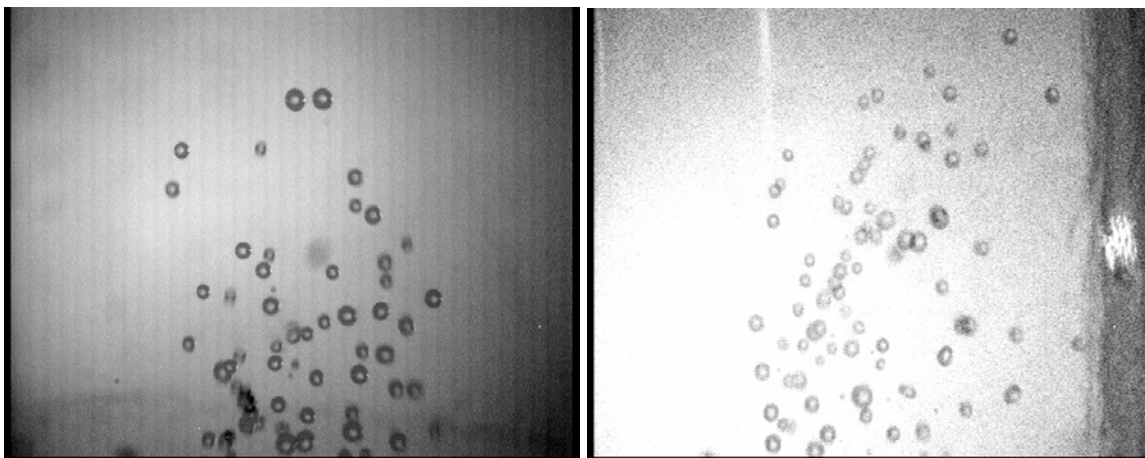
Используя полученные значения для тока (рис.4.61) можно оценить объёмную плотность заряда струи на выходе в фонтан. При напряжении больше 20 кВ значение объёмной плотности заряда выходит на стационар, и оценка объёмной плотности заряда показывает, что эта величина составляет  $\rho = (1,2 \pm 0,2)$  мКл/м<sup>3</sup> (рис.4.62).



**Рисунок 4.62.** Зависимость плотности объёмного заряда струи жидкости от напряжения на ЭГД-насосе.

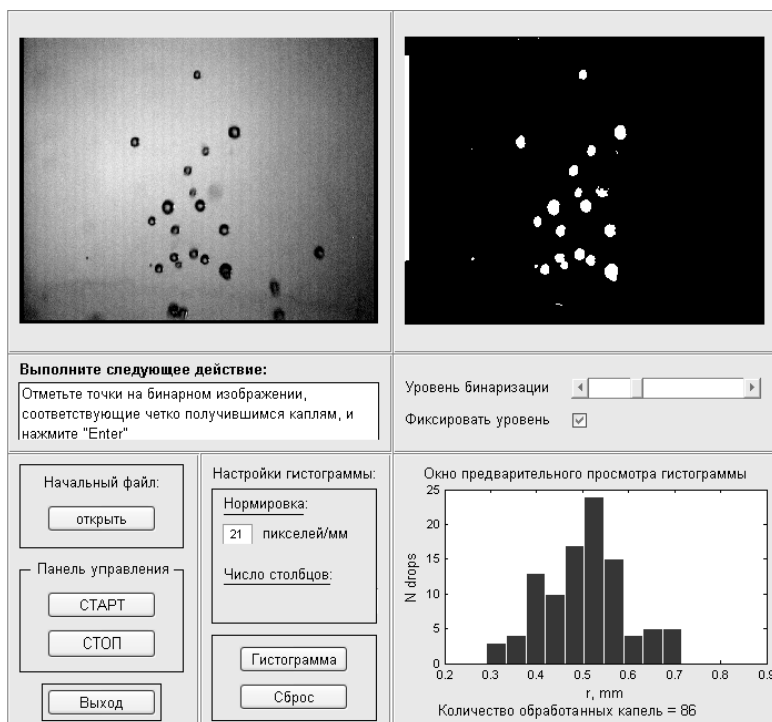
Для определения распределения капель по радиусам производится видеосъемка работы ЭГД-фонтана. Полученное видеоизображение

раскладывается в серию отдельных кадров (рис.4.63) для их последующей обработки.



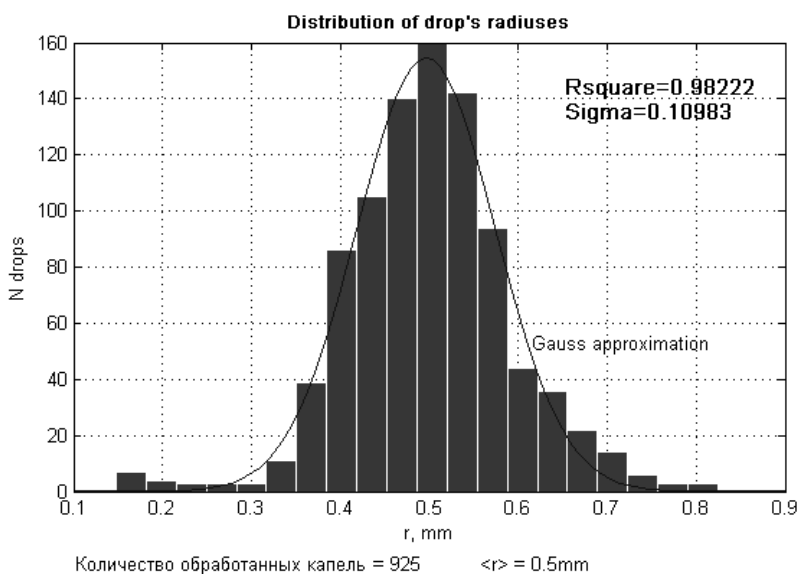
*Рисунок 4.63. отдельные кадры видеозаписи работы ЭГД-фонтана.*

Далее производится обработка полученных кадров при помощи специальной программы, написанной на языке *MatLab*. Внешний вид интерфейса этой программы представлен ниже (рис.4.64). В процессе работы программы производилось разложение изображений на полукадры, выполняется фильтрация (растяжение гистограммы, компенсация фона, морфологические операции эрозии и наращивания) и, затем, операция бинаризации. Далее на полученных чёрно-белых кадрах вручную выбираются четко очерченные капли, и программа автоматически определяет их радиус.



*Рисунок 4.64. Интерфейс программы для определения размеров капель, получаемых при работе ЭГД-насоса.*

Для получения распределения капель по размерам необходимо использовать видеоряд длительностью не менее 6 секунд, что соответствует 150 кадрам, или 300 полукадрам, т.к. съёмка производится в системе PAL, которая передаёт видеоизображение с частотой 25 кадров в секунду и имеет чересстрочную развёртку. При этом обрабатывается выборка примерно из 1000 капель. Результат обработки выборочной серии кадров представлен на рис.4.65. Для повышения достоверности вычислений использовались только самые четкие капли, размеры которых слабо зависят от порога бинаризации изображения.



**Рисунок 4.65.** Распределение капель по размеру.

Чтобы одни и те же капли не учитывались несколько раз, целесообразно производить обработку только одного полукадра из 3÷6; наиболее достоверный вариант, который следует из оценки времени полета капли  $t_{\uparrow\downarrow}$  в поле зрения видеокамеры – это обработка 1 полукадра из 6.

$$t_{\uparrow\downarrow} = 2 \cdot \frac{V_{\max}}{g} = 2 \sqrt{\frac{2h}{g}},$$

где  $V_{\max}$  – скорость капли при вылете из распылителя;  $g$  – ускорение свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ),  $h$  – высота части фонтана, попадающей в область захвата камеры. Таким образом, при  $h = 2 \text{ см}$  (та часть фонтана, которая попадает в поле зрения видеокамеры) время полёта капли составляет  $t_{\uparrow\downarrow} = 0,12 \text{ сек.}$ , что соответствует длительности 6 полукадров.

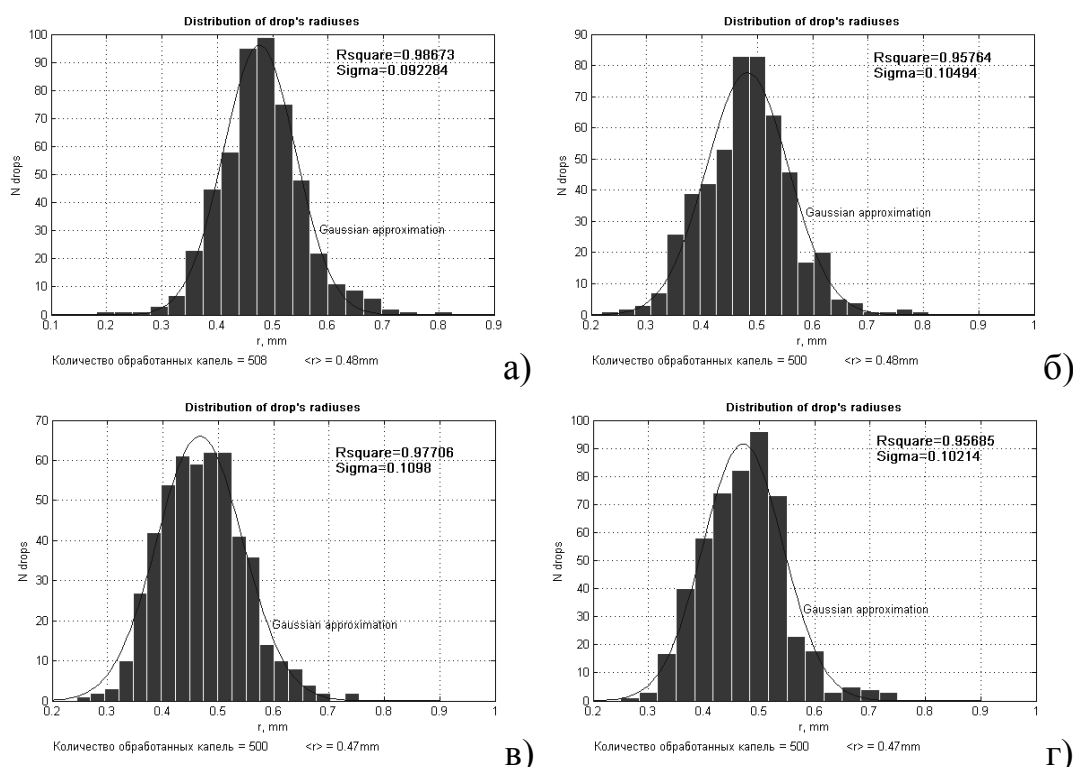
Полученное распределение количества капель по их размерам (рис.4.65) обычно хорошо аппроксимируется функцией Гаусса, коэффициент

соответствия  $R\ square = 0,98$ . Причем при аппроксимации полученных данных гауссовым распределением:

$$Gauss = a \cdot \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{\sigma^2}\right),$$

параметр  $\sigma$  имеет значение стандартного (среднеквадратичного) отклонения или корня из дисперсии. Следовательно, можно оценить погрешность полученного значения среднего радиуса капель, которая в приведенном примере составляла:  $\langle r \rangle = (0,5 \pm 0,1)$  мм.

Таким образом, полученное распределение является нормальным со средним значением радиуса, вычисленным по аппроксимационной гауссовой кривой.



**Рисунок 4.66.** Распределение капель по радиусам: а –  $U_{add} = 10$  кВ, б –  $U_{add} = 16$  кВ, в –  $U_{add} = 24$  кВ, г –  $U_{add} = 30$  кВ.

Используемая в экспериментах установка (рис.4.60) позволяет вводить дополнительный заряд в жидкость с помощью вспомогательного электрода, на который подавалось высокое напряжение от независимого источника высокого напряжения  $U_{add}$ . При этом также производится видеозапись работы ЭГД-фонтана и электрических параметров.

Эксперименты по влиянию на процесс распыления жидкости введения в неё дополнительного заряда целесообразно производить при высоком значении напряжения на ЭГД-насосе, например  $U = 22$  кВ, что соответствует высоте фонтана  $h \approx 20$  см. При этом в тестовом эксперименте получены распределения



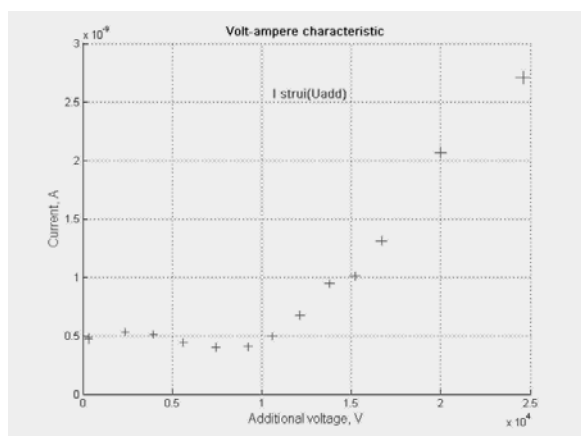
размеров (радиусов) полученных капель распыляемой струи для значений дополнительного напряжения:  $U_{add} = 10$  кВ; 16 кВ, 24 кВ, 30 кВ (рис.4.66).

Анализируя графики, можно сказать, что по мере увеличения объемного заряда жидкости полученные распределения все хуже аппроксимируются гауссовой функцией. На графике, соответствующем дополнительному напряжению  $U_{add} = 30$  кВ, хорошо прослеживается резкое уменьшение числа капель большого размера и почти линейная зависимость количества капель от их радиуса. Средний радиус капель после повышения дополнительного напряжения имеет тенденцию к уменьшению, изменение радиуса составило примерно 5%. (табл.4.2).

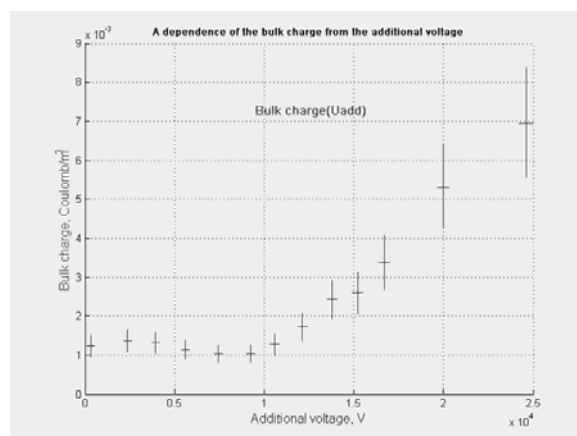
Таблица 4.2.

$U_{add}$ , кВ	$\langle r \rangle$ , мм	$\delta(\langle r \rangle)$ , мм
10	0,48	0,10
16	0,48	0,10
24	0,47	0,10
30	0,47	0,10

Для определения плотности заряда жидкости на выходе из капилляра исследуется зависимость тока струи от дополнительного источника напряжения в интервале напряжений от 0 до 25 кВ. Вольтамперная характеристика снималась по точкам: производилась запись данных с помощью АЦП (*L-Card*) в течение секунды с последующим усреднением. По полученным значениям тока струи (рис.4.67, а) проводится оценка объемной плотности заряда в струе (рис.4.67, б).



а)



б)

**Рисунок 4.67.** Зависимость тока струи (а) и объёмной плотности заряда (б) от величины дополнительного напряжения.

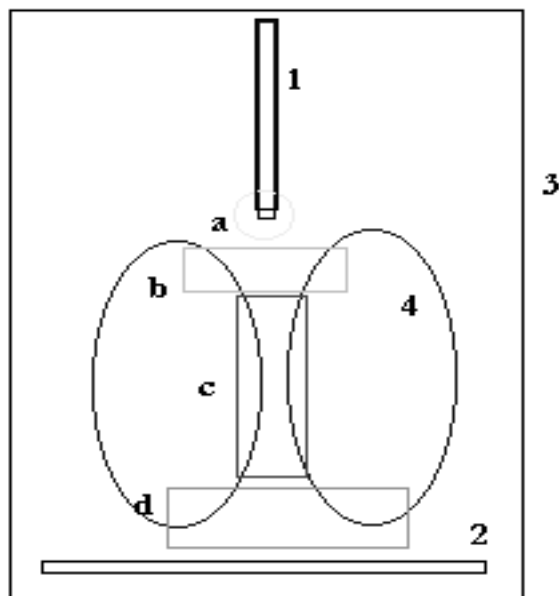
Оценка критической плотности объёмного заряда жидкости, приведенная выше (4.2), показывает, что она в пять раз выше вводимой в жидкость в нашем эксперименте, поэтому степень влияния на размеры капель невысока. Однако характер распределения капель по размерам изменяется существенно (рис.4.66).

Наряду с описанным механизмом, когда зарядка жидкости осуществляется непосредственным контактом с электродом, в ряде технических устройств, например электропокрасочных установках, капли жидкости приобретают электрический заряд при движении во внешней зоне коронного разряда. Этот способ введения заряда более эффективен.

### ЭГД–фильтрация

Частицы загрязнений размером  $1\div 100$  мкм, присутствующие в жидком топливе приводят к уменьшению ресурса и надежности топливной аппаратуры.

Для решения проблемы глубокой очистки жидкого топлива от твердых частиц предложен метод, основанный на зональной структуре электрогидродинамических течений в слабопроводящих жидкостях. Суть этого метода состоит в следующем. Жидкие углеводородные топлива относятся к классу жидких диэлектриков. Как известно жидкие диэлектрики при воздействии электрических полей высокой напряженности приходят в интенсивное движение, называемое электрогидродинамическим течением (ЭГД–течение). Структура ЭГД–течения представлена на рис.4.68. Здесь (1) и (2) – электроды, (3) – кювета с диэлектрической жидкостью, (4) – линии тока ЭГД–течения. Электрогидродинамическое течение в сосуде имеет ячеистый характер, линии тока течения имеют форму эллипса. Течение жидкости возникает в результате инъекции электрического заряда в жидкость с поверхности электрода (1).

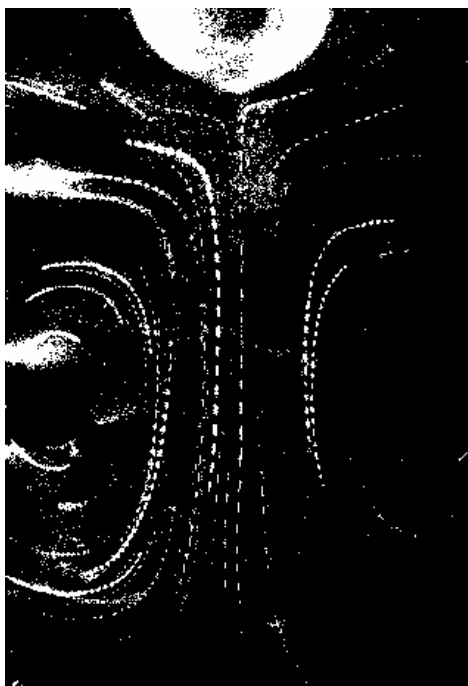


*Рисунок 4.68. Структура ЭГД–течения.*

Изучение внутренней структуры электрогидродинамических течений показало [3], что течение локализовано внутри межэлектродного промежутка, в пределах которого можно выделить четыре характерные зоны, выделенные

(рис.4.68) цветными прямоугольниками: зона неподвижной жидкости (а), в пределах которой происходит интенсивная инжекция электрического заряда в жидкость, зона ускорения жидкости (b) электрическим полем, зона центральной струи (с), в пределах которой жидкость движется без ускорения, зона торможения (d), в пределах которой жидкость замедляется, меняет направление движения и отдает электрический заряд противозлектроду (2).

В заявке для осуществления выведения твердых включений из объема жидкости предлагается использовать особенности зональной структуры электрогидродинамических течений. Для этого необходимо в нефльтрованной жидкости создать электрогидродинамическое течение при помощи подачи на электроды высокого напряжения 10÷20 кВ. Твердые включения, имеющиеся в объеме жидкости, придут в движение вместе с жидкостью (рис.4.69). Концентрация частиц твердой фазы в различных зонах ЭГД–течения будет различной. В зоне (а) (рис.4.68), у поверхности электрода (1) концентрация частиц твердой фазы значительно меньше, чем в объеме жидкости. Это хорошо видно на фотографии (рис1.69). Причиной этого является наличие объемного заряда в зоне (а) (рис.4.68). Частицы, случайно попавшие в зону (а) (рис.4.68) получают заряд от электрода или от окружающей электрод жидкости и под действием электрического поля выводятся из этой зоны. Новые частицы из объема не проникают в зону (а), т.к. она заряжена и частицы получают заряд, одноименный с потенциалом электрода (1) не подходя к его поверхности. Процесс разделения, или фильтрации, можно организовать, извлекая жидкость из зоны (а), например, при помощи трубки, надетой на электрод (1, рис.4.68).



*Рисунок 4.69. ЭГД–течения в диэлектрической жидкости с примесью твердых включений [3].*

Зональная структура электрогидродинамических течений прекрасно прослеживается на фотографии ЭГД-течения в диэлектрической жидкости с примесью твердых включений (рис.4.69).

Следует отметить, что размер выводимых частиц в описываемой системе может повлиять лишь на скорость их выведения из зоны (а) (рис.4.68). Поэтому данный способ позволяет выводить из жидкости частицы субмикронных размеров.

Для реализации процесса непрерывной фильтрации необходимо организовать вывод частиц также из основного объема жидкости, чтобы не допустить их накопления. Для этого можно поставить пористую прослойку между объемом жидкости и электродом (2, рис.4.68).

В зоне (d) (рис.4.68) на частицу действуют следующие силы: центробежная, электрическая и стоксовская, обозначенные индексами 1, 2 и 3, соответственно, которые выводят ее из жидкости внутрь пористой перегородки:

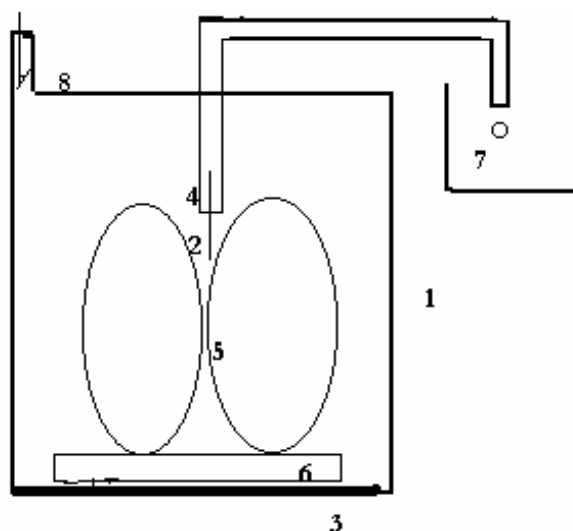
$$m \frac{\partial V}{\partial t} = F_1 + F_2 + F_3,$$

где  $F_1 = m \frac{V}{r}$ ;  $F_2 = qE$ ;  $F_3 = 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$ . Эти выражения векторные.

Здесь обозначено:  $V$  – скорость течения жидкости на линии тока,  $r$  – радиус кривизны линии тока,  $m$  – избыточная, по сравнению с массой вытесненной жидкости, масса частицы,  $q$  – избыточный, по сравнению с окружающей вытесненной жидкостью, заряд частицы,  $E$  – напряженность электрического поля,  $v$  – скорость частицы относительно жидкости,  $R$  – радиус частицы.

Далее внутри перегородки частица движется под действием электрической силы до соприкосновения с поверхностью электрода, которому она отдает электрический заряд. Поскольку внутри пористой перегородки течений нет, частицы, осевшие на поверхности электрода, обратно в жидкость не вымываются. Ёмкость пористой перегородки зависит от размера пор и при надлежащем выборе материала перегородки может быть весьма существенна.

Принципиальная схема одиночной ступени фильтра представлена на рис.4.70, где цифрами обозначено: 1 – корпус фильтра, 2 – электрод, 3 – электрод, 4 – трубка для отвода жидкости, 5 – ЭГД-течение, 6 – пористый осадитель, 7 – резервуар для очищенной жидкости.



*Рисунок 4.70. Принципиальная схема одиночной ступени фильтра.*

Скорость осаждения частиц в пористый электрод зависит от скорости возникающих в жидкости ЭГД–течений. Как было показано в работах лаборатории электрогидродинамики жидкостей, эти параметры существенно зависят от материала и покрытия обоих электродов и от ионного состава рабочей жидкости. Поэтому эффективную работу фильтра можно обеспечить только при рациональном выборе материала и конфигурации системы электродов для реализации достаточно высоких скоростей ЭГД–течений. Кроме этого необходимо обеспечить рациональный выбор материала и формы трубки для откачки очищенной жидкости, выбор материала и структуры пористой перегородки.

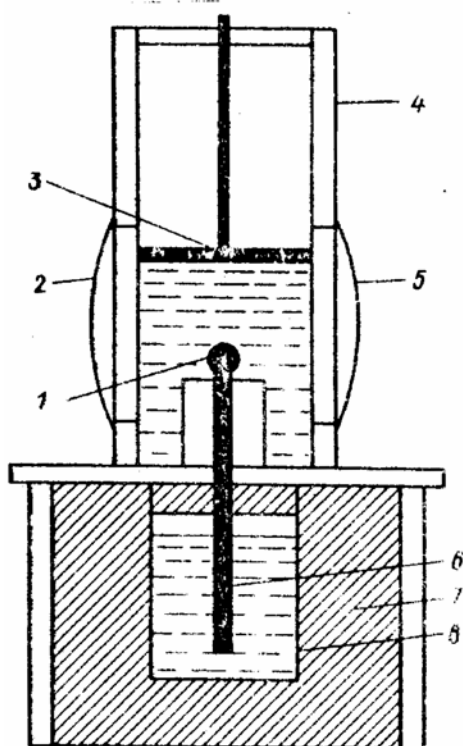
### **Влияние ЭГД–течений на теплообмен в жидкости**

#### **Влияние нагревания или глубокого охлаждения активного электрода на кинематику ЭГД–течений**

Практическому использованию интенсификации теплообмена в электрическом поле посвящено много работ, среди которых, прежде всего, следует отметить [16,21-24]. Основное внимание авторов этих работ направлено на исследование термоэлектрокондуктивной конвекции, т.е. ЭГД–процессов, индуцированных внешним нагреванием среды. Эта концепция основана на зависимости проводимости среды от температуры:  $\sigma = \sigma_0 \exp(-T_0/T)$ . Вследствие термоионизации среды, более нагретые слои жидкости являются областями повышенной проводимости, а охлажденные – областями пониженной проводимости. При нагревании или охлаждении одного из электродов в среде устанавливается неоднородное распределение температуры, а значит и проводимости. Плотность индуцированного объемного заряда связана с градиентом следующим образом:

$$\rho = \sigma \cdot \varepsilon_0 \cdot T(\varepsilon \cdot \text{grad}T) / T^2. \quad (4.3)$$

Как следует из (4.3), в случае нагревания электрода в приэлектродной области образуется одноименный с электродом заряд. Следовательно, кулоновские силы в данном случае всегда направлены от электрода в жидкость. Такое распределение заряда механически неустойчиво и приводит к электрической конвекции под действием термоэлектрокондуктивных сил. Если же один из электродов охлаждается, то в приэлектродной области образуется противозаряд, который прижимает жидкость к электроду. Это состояние соответствует повышенной механической устойчивости жидкости по отношению к внешним возмущениям [3,16]. Поэтому путем изменения направления градиента температур можно получить ускорение или замедление, и даже полную остановку термоэлектрогидродинамических процессов. Это обстоятельство позволяет сопоставить процессы поверхностного и объемного зарядообразования, обусловленного неизотермичностью среды.



**Рисунок 4.71.** Схема экспериментальной ячейки для исследования влияния охлаждения и нагревания активного электрода на кинематику ЭГД-течений.

Для исследования ЭГД-течений от охлаждаемого и нагреваемого электродов [3] была использована полутеневая методика регистрации. Теневая установка состоит из источника света, конденсатора, щели или диафрагмы, основных объективов, решетки, фотокамеры. Отличие описанной установки от классической, использующей точечный источник света и нож Фуко, состоит в том, что применена система щель-решетка. В экспериментах использовалась

вертикальная решетка чередующихся темных и светлых полос одинаковой толщины с периодом 1 мм. На рис.4.71 представлена схема экспериментальной ячейки из этой установки. Ячейка выполнена из прозрачного оргстекла и представляет собой прямоугольный сосуд, в боковые стенки которого вклеены основные объективы (2, 5), создающие поток параллельных лучей в ячейке. В основание вклеен латунный стержень (6) диаметром 4 мм. В своей верхней части он имеет резьбу, которая позволяет использовать сменные нижние электроды (сферический диаметром 5 мм и острейковый). На рисунке изображен сферический нижний электрод (1) и плоский верхний (3). Охлаждение нижнего электрода производилось жидким азотом, имеющим температуру кипения около  $-170^{\circ}\text{C}$ .

Азот заливался в цилиндрический латунный сосуд (8), термоизолированный оболочкой (7) из пенопласта. Для измерения температуры охлаждаемого электрода использовалась медь–константановая термопара, измерительный спай которой находился внутри сферического электрода, а опорный – в термостате.

В качестве источника света в полутеневого установки использовался осветитель ОИ–28 и щель (0,5×30 мм), которая устанавливалась вместо диафрагмы за конденсором осветителя.

Теневые методы позволяют исследовать прозрачные оптические неоднородности. Исследование тепловых явлений выявило связь оптических неоднородностей с неизотермичностью среды. Как правило, измеряемой величиной является угол отклонения световых лучей в неоднородности. Если оптическая неоднородность смещает параллельный пучок лучей на малый угол  $\theta$ , то в фокальной плоскости объектива луч сдвинется на величину  $\delta = f \operatorname{tg} \theta$ , где  $f$ –фокусное расстояние объектива. Смещение луча не зависит от положения неоднородности. Если в фокальной плоскости установлена непрозрачная диафрагма, прерывающая распространение света, то лучи, смещенные неоднородностью, пройдут вне нити, и соответствующее место на экране будет светлым. Таким образом, оптическая неоднородность визуализируется. При замене нити решеткой отклоненные оптической неоднородностью лучи будут попадать на полосы решетки в зависимости от угла наклона. Поэтому изображение оптической неоднородности видно на экране (фотографии) в виде чередующихся светлых и темных полос. Эти полосы являются полосами равного угла отклонения световых лучей.

Анализ фотографий межэлектродного промежутка показал, что при нагревании или охлаждении шарового электрода в отсутствие электрического поля у поверхности шара образуется полусферическая шапка термически неоднородной жидкости. У основания шапка расплзается вдоль дна кюветы. Непосредственно после включений поля на первоначально шарообразной "границе" охлажденной среды появляются отдельные конусообразные выросты нагретой жидкости, заостренная головка которых нормальна к поверхности шара. Развитие этих выростов происходит путем вытягивания в струи с

грибовидной шапкой в радиальных к шару направлениях. С течением времени вся поверхность охлажденной жидкости покрывается конусообразными бугорками, периодически выбрасывающими сгустки холодной жидкости. При напряжениях выше  $5\div 10$  кВ бугорки перерастают в струи охлажденной жидкости, распространяющиеся к противоэлектроду.

Наблюдения показали, что картина воздействия поля на охлажденный слой жидкости идентична картине воздействия поля на нагретый слой. Охлаждение приэлектродной области, как уже отмечалось, должно привести к возникновению у электрода гетерозаряда. При этом термоэлектрокондуктивные силы прижимают околоэлектродные слои жидкости к поверхности электрода, повышают устойчивость электрогидростатического равновесия, подавляют термогравитационную конвекцию и понижают теплообмен. Однако на практике в целом ряде слабопроводящих жидкостей мы наблюдали практически те же ЭГД–эффекты, что и при нагревании электрода. Теплоотдача от охлажденного электрода при наличии электрического поля также существенно возрастает. Это дает основание утверждать, что природа электроконвективных процессов в электроизолирующих жидкостях имеет не термоэлектрокондуктивный характер. Нагревание или охлаждение приэлектродной зоны в диапазоне  $\pm 40^\circ\text{C}$  не оказывает существенного влияния на ЭГД–процессы в жидкости, а интенсификация теплообмена обусловлена электроконвективными движениями и не зависит от направления теплотока [3].

Наряду с полутеневыми исследованиями было проведено изучение кинематики ЭГД–течений от охлаждаемого (нагреваемого) электрода. Эксперименты проводились в той же кювете, но линзы были заменены отполированными прозрачными стенками из плексигласа. Фотографирование ЭГД–течений проводилось путем введения меток-пузырьков при боковой импульсной подсветке. Температурные измерения включали регистрацию температуры электрода в жидкости.

В экспериментах с нагреваемым шаром нагрев производился специальной спиралью из нихрома. ЭГД–течение исследовалось в диапазоне температур шарового электрода от  $-100^\circ\text{C}$  до  $+70^\circ\text{C}$ . Для минимизации влияния термогравитационной конвекции, направленной вверх от нагретого электрода и вниз от охлажденного, все исследования пришлось разбить на две части: нагревание и охлаждение. Кювета при этом реконструировалась. Нагреваемый спиралью шаровой электрод помещался сверху, а плоский высоковольтный электрод – снизу. Измерения температуры проводились медь-константановыми термопарами. Опорные концы термопар помещены в термостат с трансформаторным маслом, туда же был опущен термометр. Это позволило во время опыта регистрировать температуру относительно опорных спаев. Для устранения побочных ЭГД–потоков с поверхности термопары, размещенной в жидкости, которая была помещена внутри полиэтиленового капилляра толщиной 0,5 мм с внешним диаметром 0,8 мм и длиной 100 мм с заваренным внешним концом. Поверхность проводов термопары вне рабочего конца была



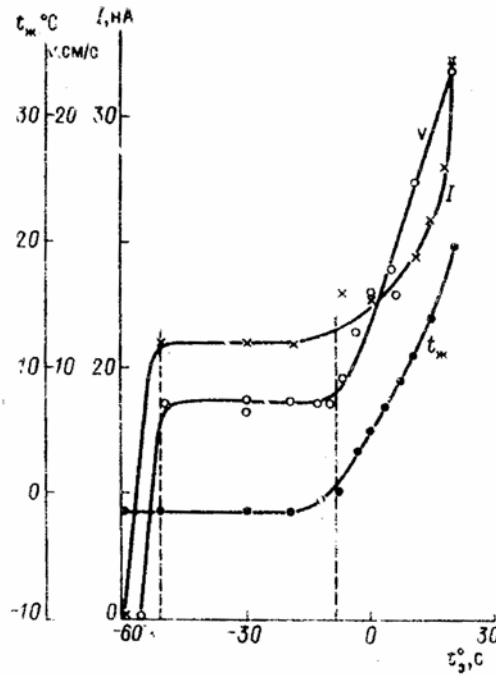
дополнительно изолирована второй полиэтиленовой трубочкой диаметром 2 мм с толщиной стенок 1 мм. При градуировке обе термопары дали линейную, практически совпадающую зависимость термопотенциала на рабочем и опорном спаях от разности температур.

Эксперименты проводились следующим образом: при фиксированном высоком напряжении в сосуд, помещенный под кюветой, заливался жидкий азот, обеспечивающий глубокое охлаждение шарового электрода, появление вокруг него "ледяной" корки и, вследствие этого, полную остановку движения. После испарения азота из сосуда шаровой электрод начинал медленно нагреваться. Этот процесс длился около двух часов. По мере естественного повышения температуры фотографировалось движение жидкости в кювете с одновременной регистрацией для каждой снятой ситуации температуры охлажденного электрода, температуры жидкости в кювете и силы тока через жидкость. При фотосъемке фиксировалась также длительность импульса подсветки. Целью этих измерений было получение данных для получения зависимости скорости ЭГД–течений и тока, проходящего через жидкость, от температуры электрода и жидкости. Кроме этого, регистрировалась температура, при которой начиналось движение жидкости, и зависимость этой температуры от напряжения. Одновременно с измерениями велось визуальное наблюдение процесса, позволявшее описать изменения характера движения, его особенности и выбрать моменты для фотографирования процесса.

Возможности экспериментальной установки позволяли доводить температуру охлаждения шарового электрода до  $-110^{\circ}\text{C}$ . При таком охлаждении вокруг шарового электрода образовывалась корка из замерзшего масла толщиной 1 мм, и ЭГД–течение в кювете полностью прекращалось. Температура остальной жидкости снижалась до  $+5^{\circ}\text{C}$ .

Далее жидкий азот, охлаждающий шаровой электрод, испарялся, и начиналось постепенное нагревание электрода. Вследствие этого нагревания температура электрода повышалась, и толщина слоя замерзшего масла вокруг шарового электрода уменьшалась. При этом движение жидкости по-прежнему отсутствовало, а сила тока и температура жидкости оставались постоянными. При достижении температуры электрода  $-60^{\circ}\text{C}$  появлялось движение жидкости, скорость очень быстро росла и при  $-50^{\circ}\text{C}$  достигала 50 % от своей максимальной величины. Одновременно наблюдался рост силы тока, проходящего через кювету.

На рис.4.72 представлены зависимости температуры жидкости, скорости и силы тока, протекающего через жидкость, от температуры электрода. С изменением температуры электрода от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  скорость ЭГД–течения, сила тока, а также температура жидкости оставались практически неизменными, эта область отмечена пунктиром. Далее начинался медленный синхронный рост температуры и скорости движения жидкости по закону, близкому к линейному.

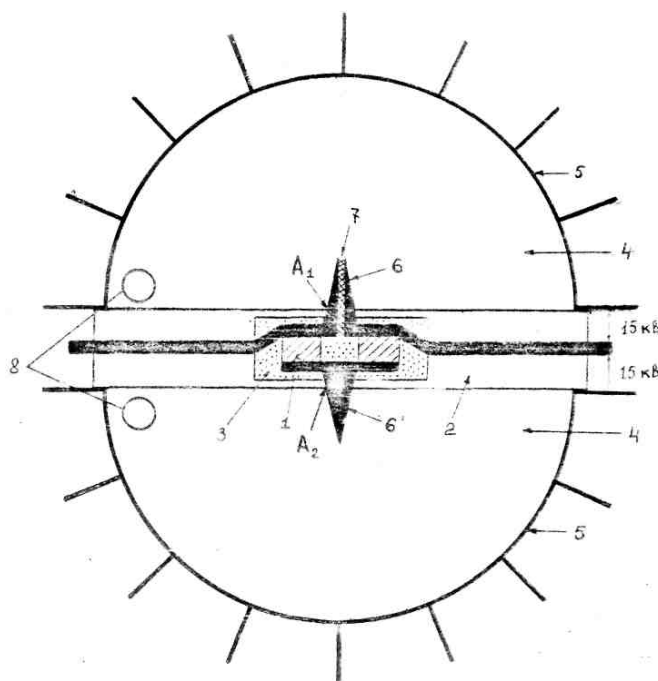


**Рисунок 4.72.** Зависимости температуры жидкости (трансформаторного масла), скорости жидкости и силы тока, протекающего через жидкость, от температуры электрода

Установлено, что скорость ЭГД-течений практически не зависит от перепада температур в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , что соответствует изменению среднего градиента в приэлектродной зоне от  $-500$  до  $+500$  градусов/см. Это позволяет сделать вывод, что внешнее нагревание или охлаждение электрода от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  практически, в пределах погрешности 10%, не влияет на кинематику ЭГД-течений. Оказалось, что неизотермичность приэлектродной зоны оказывает влияние на характер ЭГД-течения опосредованно – благодаря изменению вязкости и проводимости среды с изменением температуры. Это нашло свое отражение в линейной зависимости скорости и силы тока от температуры среды независимо от градиента температур в приэлектродной зоне. Полученные результаты доказывают, что градиенты температуры, а, следовательно, и проводимости в приэлектродных областях не оказывают существенного влияния на общую проводимость жидкости и кинематику ЭГД-течений. В то же время образование тонкого слоя замерзшей жидкости на поверхности электрода приводит к полной остановке ЭГД-течений и резкому уменьшению силы тока, проходящего через жидкость. Этот факт является еще одним прямым доказательством определяющей роли поверхностных явлений на границе раздела электрод–жидкость в процессах токопрохождения и образования ЭГД-течений в жидких диэлектриках.

### Исследование интенсификации теплообмена в конструкции теплообменника теплового насоса

Для исследования возможности повышения эффективности работы термоэлементов при помощи интенсификации теплообмена электрическим полем была разработана и изготовлена модель электроконвективного теплообменника (рис.4.73). Эта модель включает термоэлемент (1), помещённый в гнездо перегородки (2) из органического стекла и термоизолированный стекловатой (3). Перегородка (2) делит на две равные части, заполненный жидкостью сосуд (4) с дном из оргстекла и боковыми медными кольцевыми стенками, служащими одновременно и высоковольтными электродами и теплообменниками с окружающей средой. Перемычки термоэлемента выполнены в виде Т-образных медных пластин (6) и являются одновременно теплоотдающими поверхностями и заземленными электродами высоковольтного теплообменника. «Горячие» пластины электрически изолированы друг от друга прокладкой из лакоткани (7) и склеены эпоксидным клеем, холодные пластины (6) спаяны.



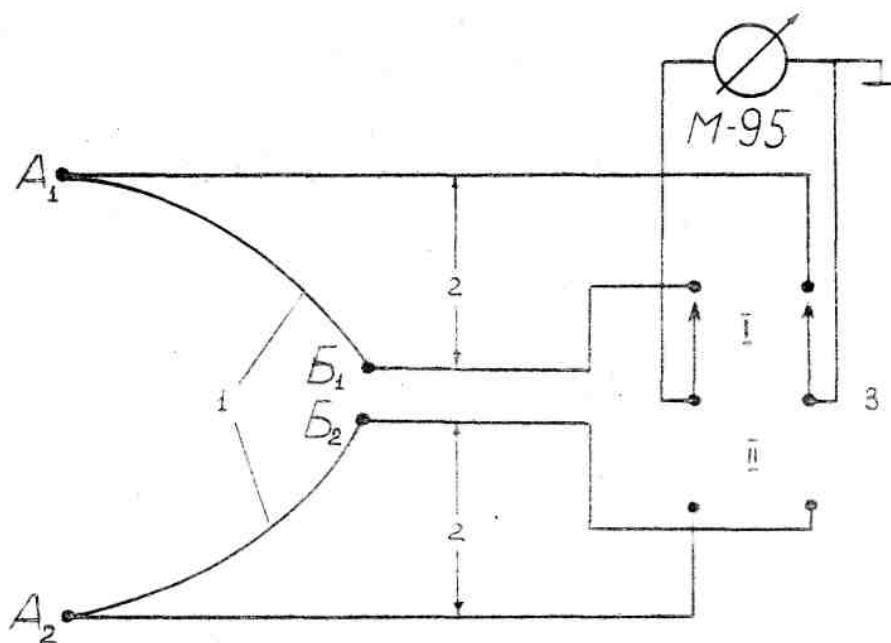
**Рисунок 4.73.** Электроконвективный теплообменник. 1 – кристаллы термоэлемента; 2 – перегородка; 3 – теплоизоляция (стекловата); 4 – полости с рабочей жидкостью; 5 – электроды; 6, 6' – внутренние теплоотдающие пластинки; 7 – лакоткань; 8 – гнезда для термометров,  $A_1$ ,  $A_2$  – места введения термопар.

Таким образом, Т-образные перемычки термоэлемента имеют выступающую часть – теплообменник, соприкасающуюся с жидкостью. Остальные, находящиеся в гнезде, части теплообменника не имеют контакта с жидкостью, т.к. гнездо залито слоем эпоксидного клея. В выступающих частях

перемычек высверлены гнезда, в которые впаяны рабочие спаи  $A_1$  и  $A_2$  термопар. Сверху левая и правая половины сосуда закрываются крышками из оргстекла, имеющими гнезда для градусников (8). Разработанная конструкция теплообменника позволяет производить как независимые испытания интенсификации теплообмена от каждого из спаев термоэлемента в режиме термоизоляции другого, так и совместные испытания обоих спаев.

Установка, наряду с ЭГД-теплообменником, включает в себя сильноточный источник питания термоэлемента ( $0 \div 50$  А), высоковольтный источник питания ( $0 \div 20$  кВ), два ртутных термометра, вентилятор, термостатированный сосуд с термометром, в который опущены опорные спаи термопар  $B_1$  и  $B_2$ , переключатель термопар и микроампервольтметр постоянного тока типа М-95 для замера ЭДС термопар.

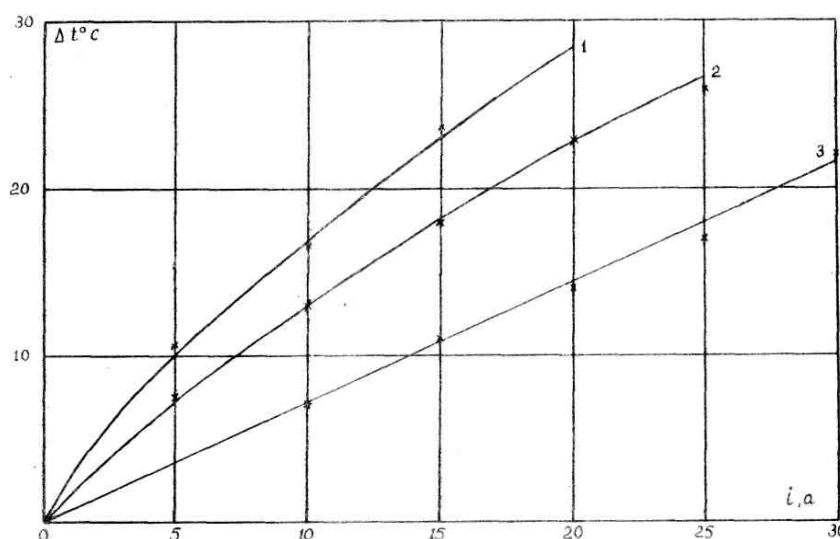
На рис.4.74 представлена схема измерения температуры спаев термоэлемента при помощи двух дифференциальных термопар, опорные спаи которых  $B_1$  и  $B_2$  помещены в термостатированный сосуд. Температура жидкости в сосуде контролируется ртутным термометром. Измерительные спаи термопар  $A_1$  и  $A_2$  размещены в гнездах горячей и холодной пластин термоэлемента (рис.4.73). Переключатель служит для последовательного подключения дифференциальных термопар  $A_1B_1$  или  $A_2B_2$  к микроамперметру М-95 ( $R_{вн} \geq 5$  кОм). В каждом из положений переключателя измеряется термо-ЭДС спаия  $A_1$  или  $A_2$  относительно опорных спаев  $B_1$ ,  $B_2$ , находящихся в изотермических условиях при известной температуре. Это позволяет определить как абсолютную температуру каждого из спаев, так и их разность.



**Рисунок 4.74.** Схема измерения температуры спаев термоэлемента: 1 – константен; 2 – медь;  $A_1$ ,  $A_2$  – измерительные спаи;  $B_1$ ,  $B_2$  – опорные спаи; 3 – переключатель.

## Результаты измерений

Исследования работы модели электроконвективного теплообменника включали определение зависимости перепада температур  $\Delta T$  на спаях термоэлемента от тока  $i$  через термоэлемент в режиме № 1, когда оба внутренних теплообменника находились в воздухе; в режиме № 2, когда в «горячем» отсеке находилась жидкость (уайт-спирит) и на электрод горячего отсека подавалось максимальное напряжение  $\Delta\varphi \sim 20$  кВ, а «холодный» теплообменник был теплоизолирован пенопластовой обкладкой; и в режиме № 3, когда в обоих отсеках модели находится жидкость (1 %-ая суспензия графита в уайт-спирите) и при наличии высокого напряжения  $\Delta\varphi = 18$  кВ. Результаты этих измерений представлены на рис.4.75, кривые 1–3.



**Рисунок 4.75.** Зависимость перепада температур холодного и горячего электродов термоэлемента от тока в различных режимах: 1 – без теплоотвода от обоих спаев; 2 – без теплоотвода от холодного спая и с теплоотводом от горячего спая электрическим ветром в суспензии «1 % графита + уайт-спирит»; 3 – с теплоотводом от обоих спаев при помощи электрического ветра в суспензии «1% графита + уайт-спирит» ( $U = 18$  кВ).

Режимы № 1 и № 2 наиболее близко соответствуют ненагруженной работе термоэлемента. В режиме № 1 оба спая термоэлемента практически термоизолированы. В режиме № 2 термоизолирован только холодный спай, горячий спай охлаждается электрическим ветром. Визуальные наблюдения показали, что при подаче напряжения на высоковольтные электроды модели в каждой из половинок ячейки с жидкостью возникают электрогидродинамические течения, которые повышают теплообмен термоэлемента с жидкостью. При этом перепад температур на спаях термоэлемента уменьшается, кривая 2 (рис.4.75) лежит ниже кривой 1.

Кривая 3 соответствует режиму максимального теплоотвода от обеих электродов при помощи электрической конвекции. Видно, что перепад

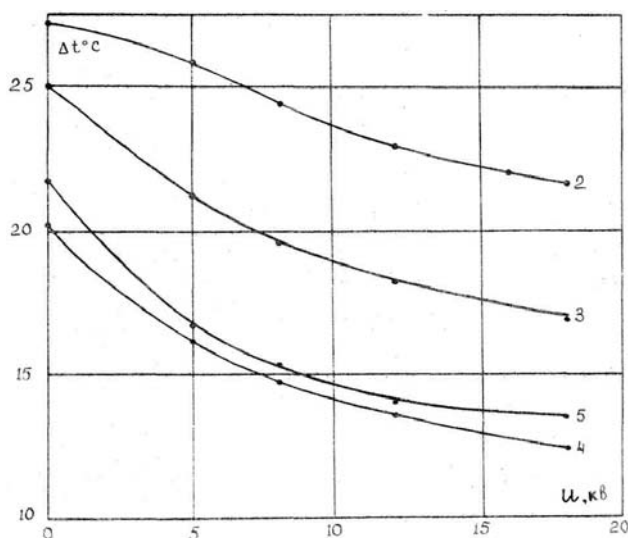
температур между электродами значительно падает и следовательно теплоотвод от спаев термоэлемента существенно возрастает.

Для количественной оценки влияния электрической конвекции на эффективность работы термоэлемента была проведена серия испытаний теплообменника в режиме № 4. При этом ток питания термоэлемента поддерживался постоянным и равным 20 А. В процессе испытаний изменялось высокое напряжение на электродах обоих отсеков модели. В этом режиме также измерялись температуры спаев теплообменника. Приращение холодопроизводительности рассчитывалось за счет интенсификации теплообмена электрическим полем  $\Delta Q_x$  относительно исходного значения  $Q_x^0$ , равного холодопроизводительности термоэлемента в отсутствие электрической конвекции. Приращение  $\Delta Q_x$  высчитывалось по формуле:

$$\Delta Q_x = Q_x^K - Q_x^0 = \frac{\alpha^2}{2 \cdot R} (\Delta T_K - \Delta T_0)$$

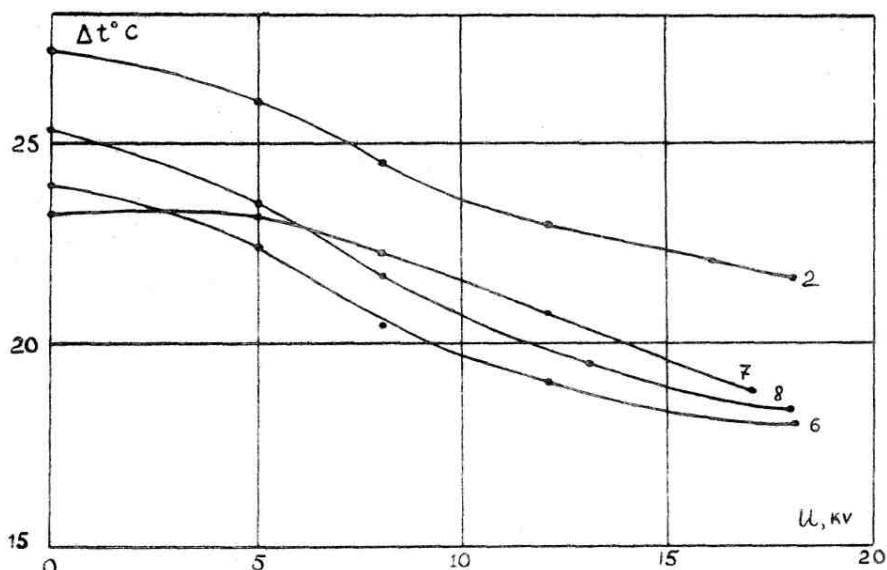
здесь  $Q_x^K$ ,  $\Delta T_K$  и  $Q_x^0$ , и  $\Delta T_0$  – соответственно холодопроизводительность и разность температур на спаях термоэлемента в условиях электроконвекции и без нее. Величины  $\Delta Q_x$  и  $\Delta T_K$  зависят от напряжения на высоковольтных электродах и характеризуют влияние электрического поля на эффективность работы термоэлемента.

Испытания в режиме № 5 проводились как в гомогенных органических жидкостях (трансформаторное масло № 2 и № 6) и кремнийорганических жидкостях (ФМ-6 № 7 и ФС-169 № 8), так и в гетерогенных (1 % суспензия графита в уайт-спирите № 5 и 2 % эмульсия ФС-169 в ПМС-1,5R № 3 и № 4). Результаты измерений представлены на рис.4.76–1.78.



**Рисунок 4.76.** Зависимость перепада температур на спаях термоэлемента от напряжения: 2 – трансформаторное масло, 3 и 4 – 2 % эмульсия ФС-169 в ПМС-1,5R, 5 – 1 % суспензия графита в уайт-спирите.

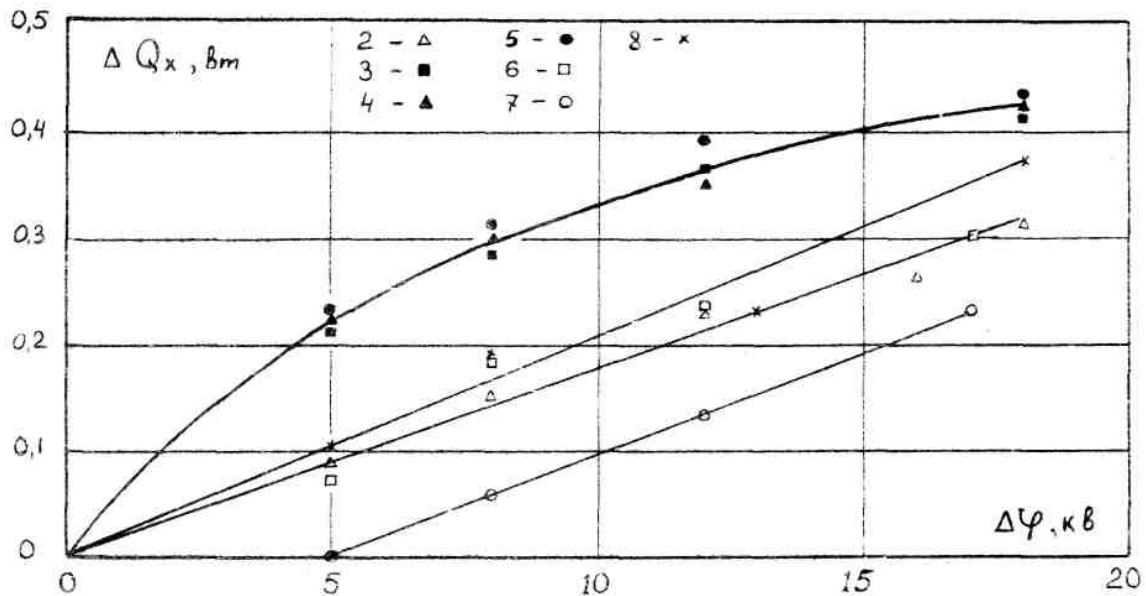
Внешний обдув высоковольтных электродов не изменяет характера зависимости  $\Delta T$  от напряжения, а смещает ее в область более низких температур (рис.4.76, кривые № 3, № 4, и № 2, № 6) и практически не влияет на приращение холодопроизводительности термоэлемента  $\Delta Q_x$  (рис.4.78, кривые № 3, № 4 и № 2, № 6). Видно, что электрическое поле существенно интенсифицирует теплообмен – температура спаев и перепад температур между спаями падает с ростом напряжения. Интенсификация теплообмена, как и следовало ожидать, наиболее существенна в гетерогенных средах (рис.4.76).



**Рисунок 4.77.** Зависимость перепада температур на спаях термоэлемента от напряжения: 2, 6 – в трансформаторном масле, 7 – в ФМ-6, 8 – в ФС-169.

Приращение холодопроизводительности термоэлемента при интенсификации теплообмена электрическим полем зависит от электрофизических свойств жидкости (рис.4.78): в гомогенных средах оно линейно растет с увеличением напряжения; в гетерогенных (рис.4.78, точки 3,4,5) – приращение холодопроизводительности более существенно. Однако зависимость  $\Delta Q_x$  от напряжения имеет тенденцию к насыщению.

Следует отметить, что достигнутое приращение холодопроизводительности при помощи электроконвекции весьма существенно. Максимально-возможная холодопроизводительность термоэлемента не превышает 1,5 Вт, а достигнутое максимальное приращение холодопроизводительности в эмульсии ФС-169 в ПМС составляет 0,8 Вт. Видно, что достигнутая интенсификация теплоотвода приводит к существенному, до двух раз, повышению холодопроизводительности термоэлемента. Это позволяет утверждать, что предложенный способ весьма эффективен.



**Рисунок 4.78.** Приращение холодопроизводительности термоэлемента в зависимости от напряжения на внешних электродах модели: 2, 6 – трансформаторное масло; 3, 4 – эмульсия ФС-169 в ПМС-1,5; 5 – суспензия графита в уайт-спирите; 7 – ФМ-6; 8 – ФС-169.

### Электрогидроакустические преобразователи [3]

Эффект образования объемного заряда в жидкости можно использовать как для получения направленного ЭГД-течения, так и для реализации колебательного движения среды, т.е. электрогидроакустического (ЭГА) преобразования. Такое преобразование может быть реализовано потоком ЭГД-течения в переменном электрическом поле, имеющим наряду с поступательной и колебательную компоненту скорости.

Однако при конструировании ЭГА-преобразователей целесообразно использовать суперпозицию постоянного и переменного полей:  $p = 2 \cdot a \cdot E^2$ . Тогда при  $E = E_0 + E_1 \cdot \sin(\omega t)$  давление можно записать в виде:

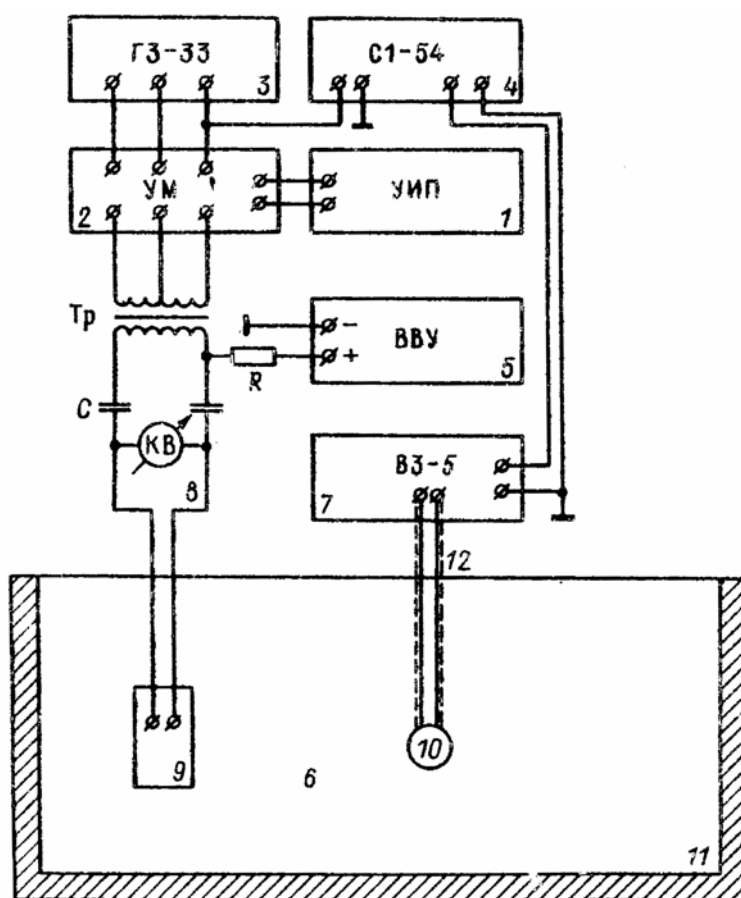
$$p = a(2E_0^2 + E_1^2) + 4aE_0E_1 \sin(\omega t) + aE_1^2 \sin^2(\omega t - \pi/2). \quad (4.4)$$

Давление имеет переменную составляющую на основной и удвоенной частотах. Впервые ЭГА-преобразователи были исследованы Фалькенгагеном, однако он отнес эффект преобразования на счет электрострикционных причин. В то же время в слабопроводящих средах возникает объемный заряд, который должен стать главной причиной преобразования на основной частоте. Как уже отмечалось, коэффициент  $a$  в выражении (4.4) определяется если использовать формулу Клаузиуса–Массотти:

$$2a = \varepsilon_0 [\varepsilon + (\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2) / \beta] E^2$$



В отличие от классических задач линейной акустики, использующих однородное волновое уравнение и неоднородные краевые условия, в задачах ЭГА–преобразования следует записать неоднородное волновое уравнение и однородные краевые условия. В ЭГА–преобразователе, благодаря объемному распределению электрического заряда, происходит преобразование во всем объеме жидкости, а не только на границах, как это имеет место в твердых излучателях. По этой причине ЭГА–преобразователи являются новым классом подобных систем. В силу отмеченных особенностей в этих преобразователях должны быть ослаблены резонансные свойства и повышена направленность излучения.



**Рисунок 4.79.** Блок-схема установки для исследования ЭГА–преобразователей.

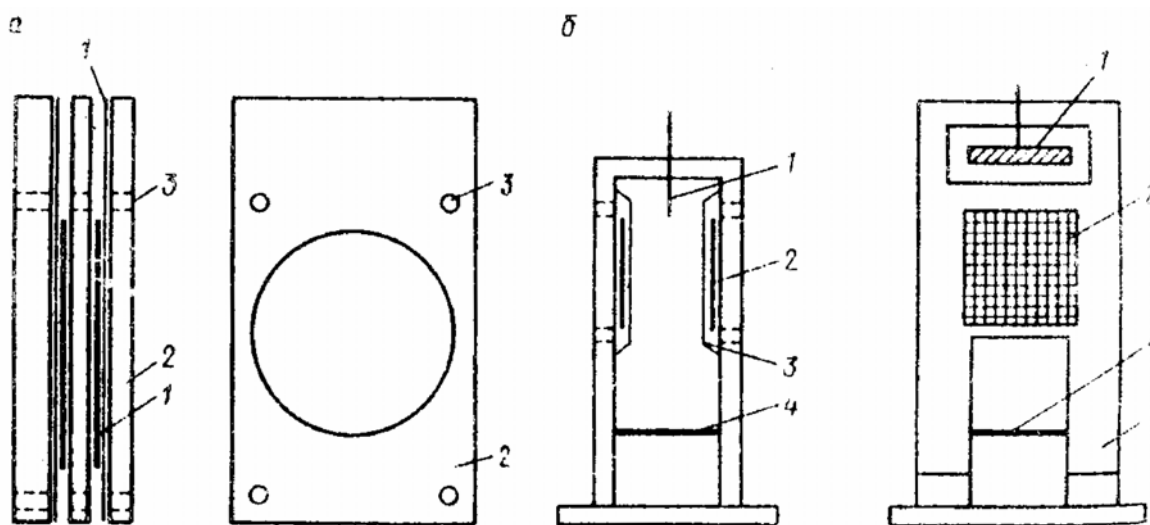
Установка для исследования ЭГА–преобразователей (рис.4.79) содержит экспериментальный аквариум (11), заполненный вазелиновым маслом (6) и заглушённый специальной звукопоглощающей резиной, работающей в диапазоне частот выше 4 кГц, размеры заглушённого объема с исследуемой жидкостью выбраны следующими: длина 80 см, ширина 20 см, высота 30 см; исследуемый ЭГА–преобразователь (9), тракт измерения акустических давлений, содержащий калиброванный сферический титанат-бариевый приемник (10), подводящий кабель (12), милливольтметр (7), контрольный

осциллограф (4); тракт питания преобразователя, содержащий установку высокого переменного напряжения (5), измерительный киловольтметр (8) типа С-96.

Получение высокого переменного напряжения в широком диапазоне частот представляет собой сложную техническую задачу. Для этой цели была изготовлена специальная установка. Напряжение звуковой частоты с симметричного выхода генератора (3) подается на вход двухтактного усилителя мощности (2), нагрузкой которого является повышающий трансформатор, собранный на базе телевизионного строчного трансформатора ТВС-110Л. Выходное напряжение с трансформатора подается на исследуемый преобразователь (9) (3 – блокирующие емкости, 1 – источник питания усилителя).

Усилитель мощности собран по двухтактной схеме на лампах ГУ-50. В выходном трансформаторе предусмотрено изменение резонансной частоты, которое осуществляется путем изменения зазора в сердечнике трансформатора. Собранный установка позволяет получать напряжение в интервале от  $-9$  кВ до  $+9$  кВ в диапазоне частот  $60 \div 90$  кГц. Напряжение с выхода генератора подается на контрольный осциллограф, на пластины которого подано усиленное напряжение приемного тракта.

Для работы в условиях повышенного уровня электромагнитных наводок принят ряд специальных мер. Источник высокого переменного напряжения полностью помещён в железную заземленную клетку. Подводящий кабель (12) имеет двойной взаимно изолированный экран, внешний экран также изолирован полихлорвиниловой трубкой. Подводящие сигнальные жилы свиты, электрическое содержание экранов и их заземление осуществлено в одной точке – во входном штекере прибора ВЗ-5. Эти меры обеспечили уровень наводок, в наихудших условиях, когда сигнальные цепи расположились в непосредственной близости от силовых, не выше  $5$  мкВ.



*Рисунок 4.80. Различные модели ЭГА-преобразователей, а – конденсаторный, б – струйный.*

Для исследования ЭГА–преобразователей были изготовлены различные модели. Модель № 1 – конденсаторный преобразователь – состоит из двух сетчатых электродов (1, рис.4.80, а). Пространство между ними заполняется исследуемой слабопроводящей жидкостью, гидроизоляция внешней среды осуществляется при помощи тонкой полиэтиленовой пленки. При помощи болтов, вставленных в отверстие (3), пластины (2) зажимаются, чем достигается полная герметичность. В средней пластине сверху вырезано отверстие для заполнения пространства между сетчатыми электродами, исследуемой жидкостью. Расстояние между электродами 5 мм, радиус сетчатых электродов 2,4 мм. Модель позволяет изучать диэлектрики, имеющиеся в наибольших количествах.

Модель № 2 – струйный преобразователь (рис.4.80, б) – состоит из электрода (1), являющегося частью лезвия бритвы длиной 1 см и шириной 2 мм. На расстоянии 3 см расположен электрод (4) из медной пластины длиной 3 см и шириной 1 см. Высокое переменное напряжение подается на сетчатые электроды (2), расположенные на расстоянии 1 см друг от друга; 3 – полиэтиленовая пленка, изолирующая сетчатые электроды; 5 – держатель. Все детали выполнены из плексигласа. Такая конструкция дает возможность изучать ЭГА–преобразование, не заполняя исследуемой жидкостью весь аквариум.

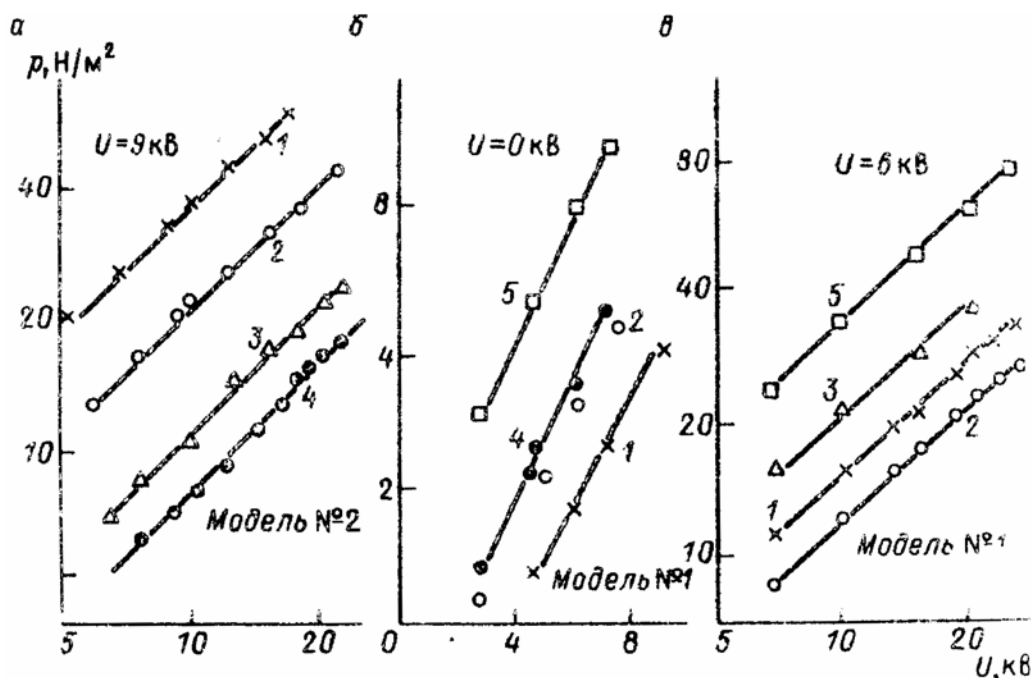
В плоскопараллельной модели № 1, как показали результаты зондовых измерений, объемный заряд возникает, в основном, в приэлектродных областях. ЭГД–течения, распределяющие заряд по объему ячейки, являются помехой, так как уменьшают плотность заряда.

В модели № 2 для ЭГА–преобразования используется заряженная струя ЭГД–течения, возникающая между электродами (1) и (4) (рис.4.80, б). Наложение поперечной переменной составляющей при помощи дополнительных электродов (2) приводят к возникновению поперечных колебаний заряженной центральной струи. Поэтому ЭГД–течение здесь является полезным фактором, увеличивающим плотность объемного заряда в рабочем объеме излучателя.

Как показали измерения, в отсутствие постоянного поля излучение, как и следовало ожидать, происходит на удвоенной частоте 120 кГц. Это значит, что причиной преобразования является электрострикционный эффект. Интенсивность излучаемого сигнала оказалась пропорциональной  $E_1$ , причем сигнал регистрируется очень слабый. При подаче на электроды постоянного напряжения картина изменяется. Через несколько секунд после включения поля с напряженностью  $E_0$  появляется более сильное излучение на основной частоте.

На рис.4.81 представлены зависимости принимаемого звукового давления на расстоянии 10 см от излучателя моделей № 2 (а) и № 1 (б, в) при постоянном напряжении. Различные кривые получены с разными рабочими жидкостями в межэлектродном промежутке излучения: 1 – фреон-113; 2 – уайтспирит; 3 –

медицинское вазелиновое масло; 4 – трансформаторное масло, 5 – касторовое масло. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются линейными зависимостями, лежащими на разных уровнях. По линейному характеру зависимости и частоте излучения можно заключить, что преобразование происходит вследствие возникновения объемного заряда в среде.



**Рисунок 4.81.** Зависимости принимаемого звукового давления от излучателя моделей № 2 (а) и № 1 (б, в) на расстоянии 10 см при постоянном напряжении

Как видно (рис.4.81), величина излучаемого давления существенно зависит от вида жидкости. Так, интенсивность излучения в плоскопараллельной модели № 1 возрастает по мере роста вязкости среды. При этом акустическое давление достаточно велико и достигает в касторовом  $80 \text{ Н/м}^2$  при  $U = 25 \text{ кВ}$ , в вазелиновом масле –  $40 \text{ Н/м}^2$ . Порядок полученных величин соответствует постоянным давлениям, измеренным при помощи капиллярного манометра, характерное время колебательного процесса ( $t_0 = 18 \text{ мкс}$ ) много меньше собственных времен релаксации исследуемых жидкостей ( $\omega_0 = 1 \div 10 \text{ Гц}$ ).

Сопоставление результатов преобразования для модели № 2 показывает, что в этой модели преобразование эффективнее в слабвязких жидкостях. Интенсивность излучения убывает с увеличением вязкости в ряду исследуемых жидкостей: фреон, уайтспирит, вазелиновое масло. Этот результат вполне понятен, так как преобразование в модели № 2 зависит от скорости ЭГД-течения, которая, в свою очередь, убывает с ростом вязкости жидкости. Что касается модели № 1, то в ней ЭГД-течения являются помехой, а, следовательно, эффективность преобразования должна расти с ростом вязкости.

Итак, результаты исследования ЭГА-преобразования в звукопрозрачных моделях показывают, что оно обусловлено объемным зарядом в среде и,

следовательно, имеет объемный, а не поверхностный характер. Эффективность ЭГА–преобразования естественно зависит от свойств рабочей среды преобразователя и весьма высока, несмотря на существенное различие частот преобразования и собственных частот жидкости, что говорит об интенсивном ионно-молекулярном взаимодействии в рассматриваемом классе сред.

### Литература

1. Stuetzer O.M. Ion Drag Pressure Generation. //J. Appl. Phys., 1959, Vol.30, № 7, p.984-994.
2. Stuetzer O.M. Ion Drag Pumps. //J. Appl. Phys., 1960, Vol.31, № 1, p.136-146.
3. Стишков Ю.К. Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л: Издательство ЛГУ, 1989. 174 с.
4. Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования // Докл. АН СССР. 1986. Т.288. №4.
5. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Рычков Ю.М. Объемный заряд и ЭГД-течения в симметричных системах электродов // Электронная обработка материалов. 1982. №1.
6. Стишков Ю.К., Рычков Ю.М. Стационарная электризация неподвижного слабопроводящего бинарного электролита // Электронная обработка материалов. 1981. №6.
7. Стишков Ю.К. ЭГД-течения и процессы ионообразования в слабопроводящих жидкостях // Матер. 3-й Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям. Плес. 1983.
8. Рачков Ю.М., Стишков Ю.К. Напряженность электрического поля и объемный заряд в технических жидких диэлектриках // Коллоидный журнал. 1978. №6,
9. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Два режима ЭГД-течений и конвективная проводимость // Магнитная гидродинамика. 1979. №4.
10. Стишков Ю.К. ЭГД-преобразователи электрохимического типа // Вестн. Ленингр. ун-та, Сер. физ. 1984. №22.
11. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Макаров П.А, Электрогидродинамические преобразователи // Магнитная гидродинамика. 1982. №2.
12. Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Петрова З.М. Влияние размеров и температуры активного электрода на кинематику ЭГД-течений //Сб.трудов Агрофиз. ин-та им.А.Ф.Иоффе. Л., 1979. №4.
13. Стишков Ю.К., Чистяков Н.А. Влияние внешней нагрузки и стенок из диэлектрического материала на кинематику и динамику ЭГД-течений // Магнитная гидродинамика. 1984. №1.
14. Грошев А.К., Михайлов С.А., Стишков Ю.К. Влияние свойств границы электрод-жидкость на высоковольтную проводимость жидких диэлектриков // Тезисы докладов III Межреспубликанского семинара, Гродно, 1992.

15. Богданов В. Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование ЭГД-распылителя. Сборник трудов конференции Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей. С-Пб, 1998, с.214-218.
16. Болога М.К., Гроссу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977. 265с.
17. Малахов А.В. К вопросу о типах (классификации) электрогидродинамических насосов. //Доклады 5-ой МНК "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей." Санкт-Петербург, Россия, 1998, с.223-226.
18. Малахов А.В. и др. А.С. 273844 от 03.05.1988, СССР.
19. Малахов А.В. Экспериментальное исследование ЭГД-термостата. //6-ое Всесоюзное совещание по электрической обработке материалов. Тезисы докладов. Кишинев, МССР, 1990, с.211-212
20. Malakhov A.V. The Effect of Time Factor upon the Stability Of Output Parameters of Electrohydrodynamic Converters. //Proceedings of 13-th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99). Nara, Japon, 1999, p.156-159.
21. Кеймах М.Я., Меркель Е.Ю. Влияние электрических полей на теплообмен в жидких диэлектриках// Тепло- и массоперенос. Т.1. – М.: Энергия, 1968. 704 с.
22. Бергс А. Интенсификация теплообмена// Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы. –М.: Мир, 1981 с. 145-192.
23. Ohadi M.M. Heat transfer enhancement in heat exchangers. ASHRAE Journal, 1991, 33, N 12. P. 42-50..
24. Болога М.К., Савин И.К. Электрогидродинамические испарительно-конденсационные системы. – Кишинев.:Штиинца, 1991. 278 с.
25. Петриченко Н.А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях: Автореф. канд. дис. Л., 1973.
26. Янговский Е.И. Об изотермической и неизотермической электроконвекции в жидких диэлектриках // Тез. докл. 9-го Рижского совещ. по магнитной гидродинамике. Рига. 1978. Т.1.
27. Апфельбаум М.С., Янговский Е.И., О силе, действующей на игольчатый электрод, и вызываемых ею течениях// Магнитная электродинамика. N 4. 1977. с. 35 – 38.
28. Апфельбаум М.С., Полянский В.А. Об образовании объемного заряда в слабопроводящих средах// Магнитная электродинамика. N 1. 1982. с. 40 – 48.
29. Апфельбаум М.С. Течения слабопроводящих жидких диэлектриков в неоднородном электрическом поле. Автореф. канд. дис. Долгопрудный, 1986.
30. Жакин А.И. О неизотермической электроконвекции// Изв. АН СССР. Сер. – Механика жидкостей и газа. N 2. 1980 с. 27 –32.
31. Ненишев А.С. Мызников М.О. Применение электрогидродинамических теплообменных аппаратов в системе отвода тепла в компрессорах: Тезисы

- докладов X Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. – Казань, 1995. с. 43-45.
32. Ненишев А.С., Мызников М.О. Течение слабопроводящей жидкости в канале сложной формы при воздействии электрического поля// Предмет, объекты и проблемы энергетики векторного взаимодействия потоков в системах с распределенными параметрами: Доклады 1 Международной конференции 26-30 мая 1997 года. – М.: Буркин, 1997. с. 102-109.
  33. Ненишев А.С., Мызников М.О. Течение и теплообмен в каналах матричного электрогидродинамического теплообменника// Криогенное оборудование и холодильное оборудование и технологии. Вып. 1. Часть 2: Сборник научных трудов Международной академии холода. – Омск, 1997. с. 94-103.
  34. Ненишев А.С., Мызников М.О. К вопросу об ЭГД течения и теплообмене в сильно и слабо неоднородных электрических полях// Динамика систем, механизмов и машин. Книга 3: Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции. – Омск, 1997. с. 54.
  35. Нагорный В.С. Электрокаплеструйные регистрирующие устройства. – Л.: Машиностроение, 1988. 272 с.
  36. Конвективные процессы в невесомости/ В.И. Полежаев, М.С. Белло, Н.А. Верезуб и др. – М.: Наука, 1991. 240 с.
  37. Коваленко Я.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
  38. Борисов В.А. Разработка и исследование ионно-конвекционного насоса со специальной формой коллектора. Автореферат диссертации на соискание ученой степени ктн. Ленинград. 1989. 16 С.
  39. Ширяева С.О., Григорьев А.И. “Релаксационные и технологические временные масштабы явления электродиспергирования жидкости“ ЭОМ 2/94г.
  40. Ширяева С.О., Григорьев А.И. “Критические условия неустойчивости капли электропроводной жидкости в среде, через которую течёт электрический ток” ЭОМ 3/94 г.
  41. Нагорный В.С. Левченко Ю.А. Электрокаплеструйная автоматика в производстве химических нитей. С-Пб. И-во «Политехника», 2001, 231с.
  42. Безруков В.И., Основы электрокаплеструйных технологий, С-Пб, Судостроение, 2001.-240с.
  43. Шкадов В.Я., Шутов А.А. Устойчивость поверхностно заряженной вязкой струи в электрическом поле// Итоги науки и техники. Сер. «Механика жидкости и газа». 1984. Т.1. С.27-35.