

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
**«Нестационарные процессы при развитии импульсного разряда
в водно-солевом растворе»**

Направление подготовки: 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

Профиль подготовки (специальность): 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника

Аспирант _____


(подпись)

Касьянов Владимир Сергеевич

Научный руководитель:

Королев Юрий Дмитриевич,

д.ф.-м.н., профессор,

г.н.с. ИСЭ СО РАН

Томск 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Интерес к разрядным явлениям в жидких средах на протяжении последнего столетия вызван возможностью широкого применения таких типов разрядов в разных сферах технологий. Прикладное применение разрядов в жидкости связано с особенностями протекания тока и вызванными в результате этого процесса эффектами. Основными свойствами разрядов в жидкости, которые можно использовать для прикладного применения являются одновременное возникновение газовых полостей, формирование ударных волн, генерация излучения и наработка активных химических элементов.

Электрический разряд в жидкости рассматривается по аналогии с электрическим разрядом в газе, это есть направленное движение заряженных частиц, которое сопровождается ионизационными процессами. Как правило инициирование пробоя и появление плазмы в жидкости связывают с возникновением в последней газовых полостей и зажиганием разряда в них.

Разряды в жидкостях, открывают новые научные проблемы и развивают технологические возможности использования плазмы. [1-3] На сегодняшний день значительный объем исследований был направлен на изучение разрядов в жидких слабо проводящих жидкостях (диэлектриках) [4]. Внимание со стороны многих групп исследователей к особенностям протекания тока в диэлектрических жидкостях, связан с удобством применения их в высоковольтном оборудовании как правило в качестве изолятора.

Намного меньшее количество исследований было уделено изучению разрядов в жидкостях обладающих значительной проводимостью (так называемых электролитах). К электролитам в природе относится значительная доля жидких сред, поэтому разряды в электролитах представляют большой научный и практический интерес особенно в областях медицины и экологии [5-9].

Основной задачей большинства исследований в области разрядных явлений является решение вопроса стабилизации и контроля, что особенно характерно для разрядов в жидкостях. Причина в том, что протекание разряда в жидкости характеризуется более нестационарными процессами и явлениями, чем его протекание в газовой среде.

Помимо того жидкость может выступать как электрод, такие электроды могут менять геометрическую форму во время разряда и испаряться, это осложняет сравнение протекания разрядов для относительно статичных электродов в газовой среде. [10;11]

Главная трудность при исследовании разрядных явлений в жидкости, это то, что нет достаточного понимания физических и химических процессов. Для описания процессов

развития разряда в жидкостях нет единой теории, описывающей все явления, наблюдаемые экспериментально. Можно выделить основные параметры, влияющие на механизм протекания разряда: геометрические характеристики межэлектродного промежутка, проводимость жидкости, давление в среде, степень неоднородности электрического поля, объем растворенного газа в жидкости, наличие пузырьков газа, величина и полярность прикладываемого напряжения и другие факторы [6;7].

Для различных жидких сред с разными значениями проводимости, напряжение и время воздействия разряда до достижения пробоя могут изменяться в широких диапазонах. Так для диэлектрических жидкостей пробой как правило достигается импульсным высоковольтным наносекундным разрядом, а для проводящих жидкостей формирование пробоя возможно при более низких значениях напряжений и более длительном импульсном воздействии (порядка миллисекунд), которое, как правило, связано с фазовыми переходами в жидкости.

Поэтому весьма актуальным будет вопрос о изучении механизмов формирования разряда в жидкой среде с достаточной проводимостью, в частности в водно-солевых растворах, и изучение поведения сопротивления межэлектродного промежутка, находящегося в жидкости, за время протекания разряда в ней.

Цель работы

Основной задачей настоящей работы является экспериментальное исследование процессов, протекающих в водно-солевом растворе при воздействии на него импульсного напряжения, и детального представления механизмов развития ключевых стадии и свойств разряда.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- Произвести обзор существующей литературы выделить основные параметры и процессы, влияющие на протекание импульсного разряда в проводящей жидкости.
- Провести анализ и разработать модель основных процессов, происходящих при воздействии импульсного электрического разряда в водно-солевом растворе при различных концентрациях.
- На основании полученной информации разработать и создать оптимальную экспериментальную установку для исследования электрического разряда в водно-солевом растворе.
- На базе созданной экспериментальной установки провести экспериментальное исследование процессов и установить закономерности развития разряда в водно-солевом растворе.

- Проанализировать полученные данные и дать анализ физическим процессам, сопровождающим импульсный электрический разряд в водно-солевом растворе приводящим к формированию плазменного канала.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования:

1. Протекание тока в электролите в значительной степени зависит от процесса образования газовых полостей на поверхности электрода. Газовые полости могут существовать в двух различных формах: микропузырьки и макропузырь.
2. В ходе исследования были определены формы горения разряда при различной полярности напряжения на промежутке. Показано, что в случае металлического катода разряд горит в виде микроискр. При жидком катоде зажигается разряд тлеющего типа.
3. При напряжении равном пороговому (около 750 В) активный электрод покрывается слоем газа, напряжение оказывается приложенным к слою, что приводит к возникновению разряда в отдельных микропузырьках. Анализируется влияние процесса формирования газовых полостей на поведение тока разряда.
4. При превышении напряжения над пороговым количество микрополостей с плазмой увеличивается. На границе плазмы происходит образование новых микропузырьков, и зажигание в них разряда. Таким образом происходит распространение фронта плазмы от активного электрода вглубь промежутка с характерной скоростью 10^3 см/с.

Научная и практическая ценность работы заключается в том, что

В результате экспериментальных исследований выявлены особенности и определены характеристики протекания тока в водно-солевом растворе и развитие электрического разряда в межэлектродном промежутке, помещенном в этот раствор. Полученные в работе результаты представляют собой научный задел для дальнейших исследований в области токопроводящих жидких сред. Экспериментальные данные полученные в процессе работы о развитии разряда в водно-солевом растворе могут быть использованы для моделирования процессов в схожих токопроводящих жидкостях.

Исследования выполнялись в рамках проектов РФФИ №14-08-91153-ГФЕН-а, 16-08-00652-а.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе исследованы основные стадии развития импульсного электрического разряда в водно-солевых растворах, определен основной механизм развития разряда, выявлена определяющая роль тепловой неустойчивости в развитии разряда. Полученные экспериментальные данные о динамике разряда могут быть использованы для создания моделей развития электрического разряда в жидких проводящих средах. Результаты работы

могут быть использованы при разработке плазменных методов очистки сточных вод с высокой начальной проводимостью, при проектировании электрогидродинамических установок, а также для определения режимов работы заземляющих устройств.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных надежных методик измерения, использованием поверенного измерительного оборудования и подтверждается воспроизводимостью результатов измерений. Результаты находятся в согласии с данными других авторов.

Апробация результатов работы

Основные результаты научной квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях:

The 12th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2015) September 6–11, 2015, Tomsk, Russia.

15th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (April 19-21, 2016) Moscow, Russia.

5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2016) October 2–7, Tomsk, Russia

Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» с международным участием (ФНТП-2017) 5-9 июня, 2017, Казань, Россия;

6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018) September 16–22, Tomsk, Russia

Личный вклад автора

Автором создана экспериментальная электроразрядная установка для исследования предпробойных явлений в водно-солевом растворе, с отлаженной системой синхронизации измерительного и диагностического оборудования разрядных процессов с моментом подачи импульса на межэлектродный промежуток. С помощью данного оборудования получены новые экспериментальные результаты и предложена физическая картина развития разряда до момента пробоя в водно-солевом растворе. Анализ и интерпретация полученных данных, а также подготовка публикаций по полученным результатам проведены коллективом соавторов при определяющем участии автора.

Публикации

Основные результаты по теме работы изложены в 15 печатных изданиях, из них 6 — в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 9 — в сборниках трудов конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности работы проводимых в рамках данной научно-квалификационной работы, кратко освещена степень разработанности темы, обозначена её цель и поставлены задачи работы, изложена научная новизна, сформулированы основные научные положения, на основе результатов исследования, отмечены их научная ценность и практическая значимость представляемой работы.

Первый раздел работы посвящен обзору научной литературы, посвященной исследуемой теме протекания тока и электрическому разряду в жидкости. Произведен обзор литературы и отмечены основные работы по теме исследования процессов, протекающих при развитии разряда в жидкостях. Из анализа литературы получено представление о рассматриваемых возможных механизмах инициации развития разряда в жидкостях с разной проводимостью, и основных методиках их экспериментального и численного исследования. Выявлен недостаточный объем информации в работах по исследованию механизмов развития разряда в жидкостях со значительной проводимостью. Обработано достаточное количество научных трудов и систематизированы результаты исследований за последние полвека, следствием чего были сформулированы основные задачи данной работы.

Второй раздел работы содержит описание экспериментальных установок, созданных для исследования импульсного электрического разряда в водно-солевых растворах. Описаны методики регистрации тока и напряжения в межэлектродном промежутке, проведены оценки погрешности измерений. Описан метод синхронизации электрических измерений с фоторегистратией разряда.

Аппаратура и методика измерений

Для проведения экспериментов были разработаны две установки, позволяющие производить совместные электрические и оптические измерения разряда в электролите. Общая схема установок представлена на рис. 1 и 2. Первая установка с частотно импульсной подачей напряжения представляет из себя кювету с раствором электролита 4, в которой находится зонд коаксиальной конструкции, схему питания зонда с системой регистрации тока и напряжения, а также устройства оптической диагностики.

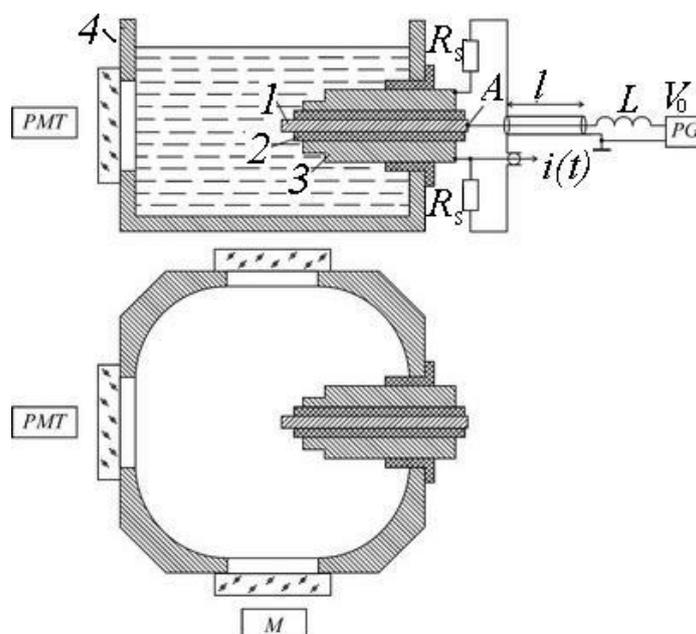


Рис. 1. Общая схема установки. 1 – активный электрод, 2 – керамическая изоляционная трубка, 3 – возвратный заземленный электрод, 4 – кювета с раствором электролита, *PMT* – фотоэлектронный умножитель, *M* – микроскоп, *PG* – импульсный генератор, $R_s = 1,41$ Ом – низкоиндуктивный шунт, l – передающий кабель.

Для питания зонда использовались импульсные генераторы *PG* двух типов. Часть экспериментов была проведена с использованием генератора прямоугольных импульсов отрицательной полярности. Здесь на выходе генератора была расположена токоограничивающая индуктивность $L = 370$ мкГн. Длина коаксиального кабеля $l = 1,5$ м, соответственно, емкость кабеля $C = 150$ пФ. Другая часть экспериментов была проведена при питании промежутка биполярными импульсами. Для этого использовался стандартный генератор ArthroCare Corporation (Model RF 2000). В этом случае $L \approx 13$ мкГн, $l = 3$ м, а емкость внутреннего проводника относительно заземленной оболочки составляла 400 пФ.

Напряжение на электродах промежутка измерялось с применением высокоомного пробника, который подсоединялся между точкой *A* на активном электроде (см. рис. 1) и электродом 3. Это позволило исключить в измерениях напряжения индуктивный компонент и зарегистрировать непосредственно активное падение напряжения между электродами. Для измерения интенсивности свечения разряда с наносекундным временным разрешением у одного из окон кюветы был установлен фотоэлектронный умножитель *PMT*.

Схема экспериментальной установки с подачей одиночных импульсов напряжения представлена на рис. 2. Электродная система и элементы регистрации тока разряда монтировались на диэлектрической плате 1, установленной на контейнер 2. Система электродов состояла из активного электрода 3, выполненного из отрезка внутренней жилы кабеля и обратного электрода 5 в виде диска. Длина активного электрода равнялась 10 мм при

диаметре 1,4 мм. Диаметр и радиус кривизны поверхности обратного электрода составляли 35 мм. Межэлектродный зазор $d = 1$ см. Потенциал на активный электрод подавался с помощью отрезка кабеля 4. Обратный токопровод состоял из металлической пластины 6 и изолированного провода 7. Для предотвращения замыкания тока на металлическую пластину ее поверхность была закрыта диэлектрической пластиной 8.

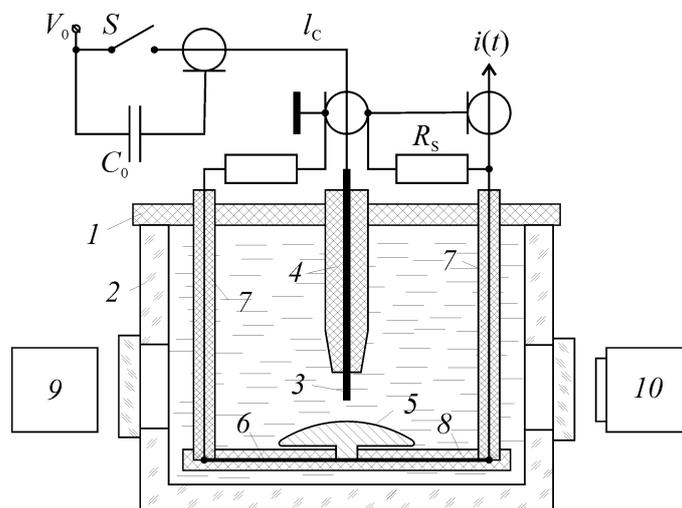


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1 – диэлектрическая плата, 2 – контейнер, 3 – активный электрод, 4 – отрезок кабеля с изоляцией, 5 – обратный электрод, 6 – металлическая пластина обратного токопровода, 7 – провод обратного токопровода, 8 – диэлектрическая пластина, 9 – CCD камера, 10 – ФЭУ.

Электродная система погружалась в контейнер 2, заполненный солевым раствором воды (концентрация $\text{NaCl} = 3\%$, удельная проводимость $\sigma \approx 30$ мСм/см, сопротивление промежутка $R_0 \approx 16$ Ом). Контейнер был оборудован кварцевыми окнами, что позволяло снимать разрядный промежуток на CCD камеру 9 и регистрировать поведение свечения во времени с помощью фотоэлектронного умножителя 10. Время экспозиции камеры изменялось в диапазоне $\Delta t \leq 1,5$ мс, а излучение регистрировалось в спектральном диапазоне $\Delta \lambda = 330 - 850$ нм. В ряде случаев, для подсветки слабых объектов нами использовалась флэш-лампа, которая была изготовлена из мощных импульсных светодиодов.

К промежутку прикладывались одиночные импульсы напряжения положительной полярности, которые формировались в результате коммутации конденсатора $C_0 = 40$ мкФ, искровым разрядником S на коаксиальный кабель. Протяженность кабеля $l_c = 15$ м, а волновое сопротивление контура $\rho \approx 0,7$ Ом. Напряжение на конденсаторе C_0 составляло величину $V_0 \approx 200 - 3300$ В. В этих условиях максимальный ток через электролит не превышал 3 кА.

В экспериментах проводилось измерение разрядного тока i и напряжения на межэлектродном промежутке V_d . Ток измерялся с помощью шунта $R_s = 0.01$ Ом, а регистрация

Такая ситуация развития газовых полостей характерна как для низкого, так и для высокого напряжения. Однако при напряжениях генератора V_0 выше порогового значения в микропузырьках возникает разряд. В начале рассмотрим ситуацию, когда напряжение V_0 ниже порогового значения. В этом случае разряда нет, и полный ток через промежуток соответствует току через электролит i_{el} . Данный ток ограничен сопротивлением электролита и определяется тем, какая часть поверхности активного электрода не экранирована газовым слоем и участвует в переносе тока. В этих условиях максимальный ток в промежутке при заданном напряжении протекает в том случае, когда количество микропузырьков на электроде невелико. На рис. 3 приведены фотографии межэлектродного промежутка для случая отсутствия плазмы внутри газовых полостей.

Случай на рис. 3а соответствует низкому напряжению $V_0 = 100$ В. Микропузырьки экранируют незначительную часть поверхности активного электрода. Сопротивление промежутка составляет примерно $R = 70$ Ом. Однако чаще всего при прикладном применении мы имеем ситуацию с более высокими напряжениями на электродах [12, 13]. В таких условиях по мере приближения напряжения к пороговому значению количество микропузырьков на поверхности активного электрода возрастает. Вблизи поверхности активного электрода образуется облако из микропузырьков. Такая ситуация представлена фотографией на рис. 3б, условия соответствуют напряжению $V_0 = 150$ В. Здесь сопротивление промежутка возросло до $R = 600$ Ом.

Теперь перейдем к рассмотрению другой формы существования газовых полостей. В данном пункте описана ситуация, когда на поверхности активного электрода существует только одна большая по сравнению с микропузырьками газовая полость (от 1 мм и более).

Основное отличие от микропузырьков заключается в следующем. Такая газовая полость существует при напряжениях V_0 выше порогового значения. Дело в том, что макропузырь может образоваться только за счет ввода мощности в конгломераты микропузырьков при протекании тока разряда. Чтобы размер газовой полости на электроде увеличивался, необходимо повышение давления газа внутри нее, которое обеспечивается при возникновении микроарядов.

Сказанное выше не означает, что внутри макрополости в каждый момент времени должен существовать разряд. Разрядный ток необходим на начальном этапе ее развития. Однако после того как на активном электроде образовалась полость, могут быть интервалы времени, в течение которых разряда в полости нет. Такая пульсация разрядного тока обеспечивает стабильность существования макропузыря в секундном интервале времени.

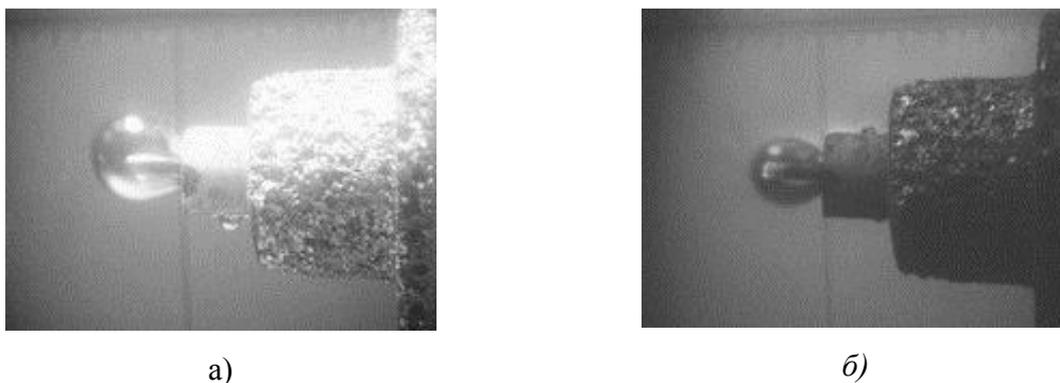


Рис. 4. Фотографии межэлектродного промежутка при наличии макропузыря. $V_0 = 175$ В.

а) Плазмы внутри полости нет; б) Плазма внутри полости есть.

Еще одно отличие заключается в том, что макропузырь практически целиком покрывает активный электрод за исключением малой области вблизи керамического изолятора. Сопротивление промежутка возрастает в несколько раз по сравнению со случаем микропузырьков. Даже возникновение плазмы внутри полости не приводит к значительному росту тока. Это связано с тем, что пробой происходит только в областях, где расстояние между поверхностью электрода и внутренней стенкой полости (электролитом) мало.

На рис. 4 приведены фотографии макропузыря без плазмы (рис. 4а) и с плазмой внутри полости (рис. 4б) при одинаковом напряжении $V_0 = 175$ В. Соответствующие осциллограммы напряжения и тока для условий рисунка 4а приведены на рис. 5а. Здесь видно, что при токе около 0,1 А пиков на отрицательной и положительной полярности нет. Сопротивление промежутка составляет 2000 Ом.

Осциллограммы на рисунке 5б соответствуют фотографии на рисунке 4б. При таком же напряжении $V_0 = 175$ В внутри полости существуют микроразряды. Микроразряды в данных условиях возникают редко. В частности, всплески тока микроразрядов при отрицательной полярности напряжения видны только на последнем импульсе. За время экспозиции фотографии было всего несколько микроразрядов. Видно, что микроразряды локализованы в области торца активного электрода, либо в области, где газовая полость примыкает к электроду (вблизи керамической трубки).

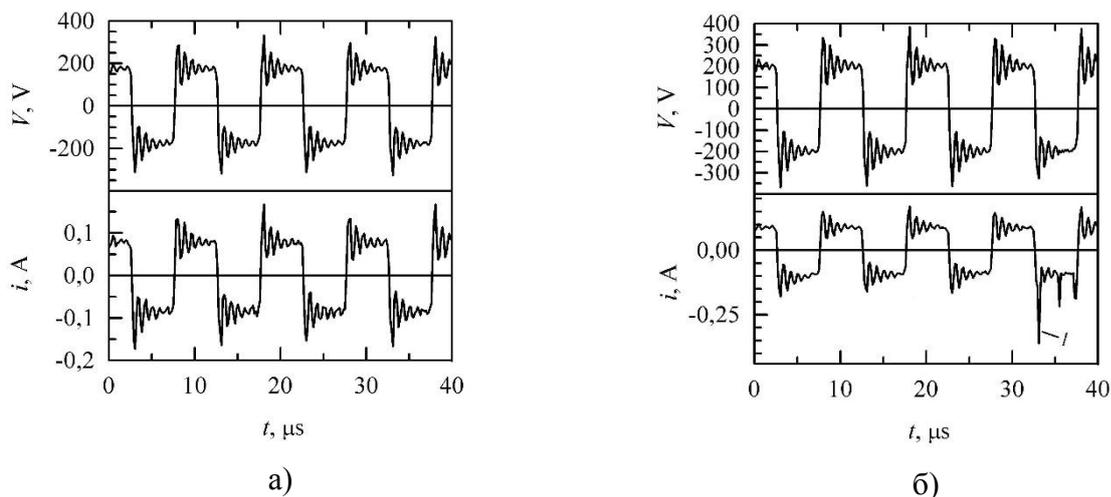


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока при наличии макропузыря. $V_0 = 175$ В. а) Плазмы внутри полости нет, $R = 2000$ Ом; б) Плазма внутри полости есть, I – пики тока микроискрового разряда.

Формы горения разряда

Разряд при металлическом катоде

В зависимости от того – металлический катод или жидкий, зажигается та или иная форма разряда. В настоящем пункте мы опишем ситуацию, когда катодом является металлический активный электрод зонда. В этом случае на активный электрод I (см. рис. 1) подавалось напряжение от генератора импульсов отрицательной полярности длительностью 40 мкс, а возвратный электрод 3 был заземлен. Минимальное сопротивление промежутка в этих условиях составило примерно 150 Ом.

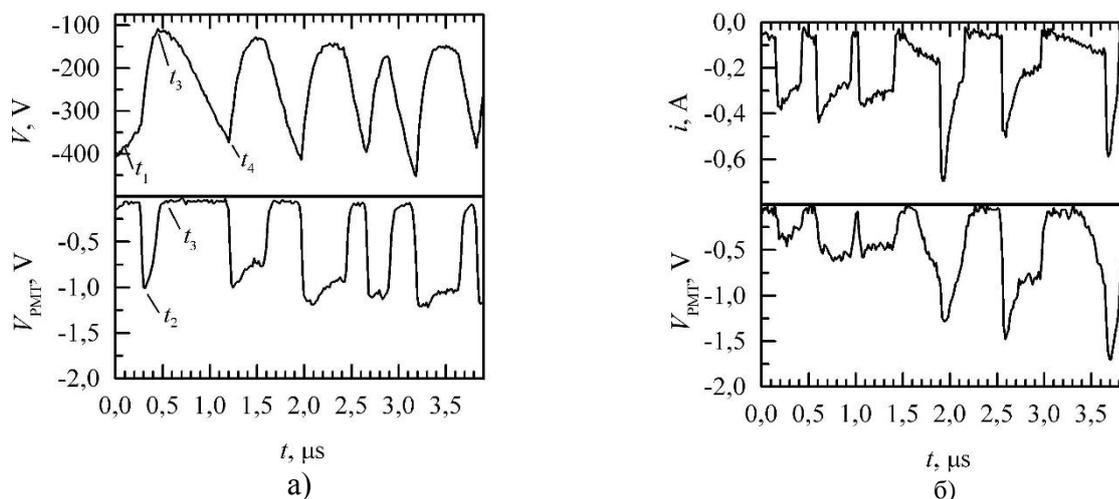


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на промежутке совместно с осциллограммой свечения вблизи активного электрода (а) и тока через промежуток совместно с осциллограммой свечения (б). Напряжение холостого хода на выходе генератора $V_0 = 250$ В.

На рис. 6 представлен пример осциллограмм напряжения, тока и интенсивности излучения в случае, когда напряжение на выходе генератора $V_0 = 250$ В соответствует значению вблизи

порогового. При V_0 вблизи порогового значения в газовых полостях может возникать разряд, но разряды зажигаются далеко не в каждом импульсе. Сопротивление промежутка в этих условиях таково, что эффект резонансной зарядки емкости передающего кабеля через токоограничивающую индуктивность может иметь место.

На рисунке мы специально представляем осциллограммы, которые соответствуют случаю наличия разрядов. Для более детального рассмотрения был выбран отдельный участок импульса, общая длительность которого составляет 4 мкс.

К начальному моменту регистрации $t_1 = 0,1$ мкс (рис. ба) в результате развития явлений в промежутке напряжение на нем оказалось около 400 В. Сигнал интенсивности свечения промежутка в этот момент очень слабый. Его можно трактовать, как излучение от предшествующего микроаряда. Соответствующий ток при отсутствии сигнала излучения составляет 0,05 А. В этом случае промежуток обладает высоким сопротивлением $R = 8$ кОм. Поэтому можно сказать, что в момент t_1 плазмы в газовых полостях нет, и практически вся поверхность катода экранирована от контакта с электролитом, т. к. минимальное сопротивление промежутка составляет около 150 Ом.

Далее в момент $t_2 = 0,3$ мкс наблюдается максимум сигнала излучения. Из осциллограммы тока на рис. бб можно оценить, что типичный ток в момент максимума излучения составляет примерно (0,4 – 0,6) А при напряжении на промежутке около 200 В. Здесь сопротивление резко упало примерно до значения (0,3 – 0,5) кОм. Поэтому данный момент можно отождествить с пробоем в газовых полостях. Емкость передающего кабеля разряжается через газоразрядную плазму.

При V_0 вблизи пороговых значений условия таковы, что разряд не поддерживается током источника питания. Из осциллограммы свечения (рис. ба) видно, что к моменту $t_3 = 0,5$ мкс разряд гаснет, т.к. напряжение на емкости спадает до низкого значения, которого уже не достаточно для горения разряда. С процессом деионизации плазмы сопротивление промежутка возрастает. Начинает иметь место эффект резонансной зарядки емкости кабеля через индуктивность. Напряжение на емкости возрастает до тех пор, пока не достигнет пробивного значения. В момент $t_4 = 1,2$ мкс вновь возникает пробой в газовых полостях. Далее процесс повторяется.

Из рассмотрения осциллограмм рисунка ба видно, что длительность горения разряда флуктуирует. Также видно, что флуктуирует и время, за которое происходит резонансная зарядка емкости кабеля до пробивного напряжения. Это происходит потому, что данные времена зависят не только от величины индуктивности и емкости, но и от сопротивления межэлектродного промежутка, которое сложным образом изменяется со временем.

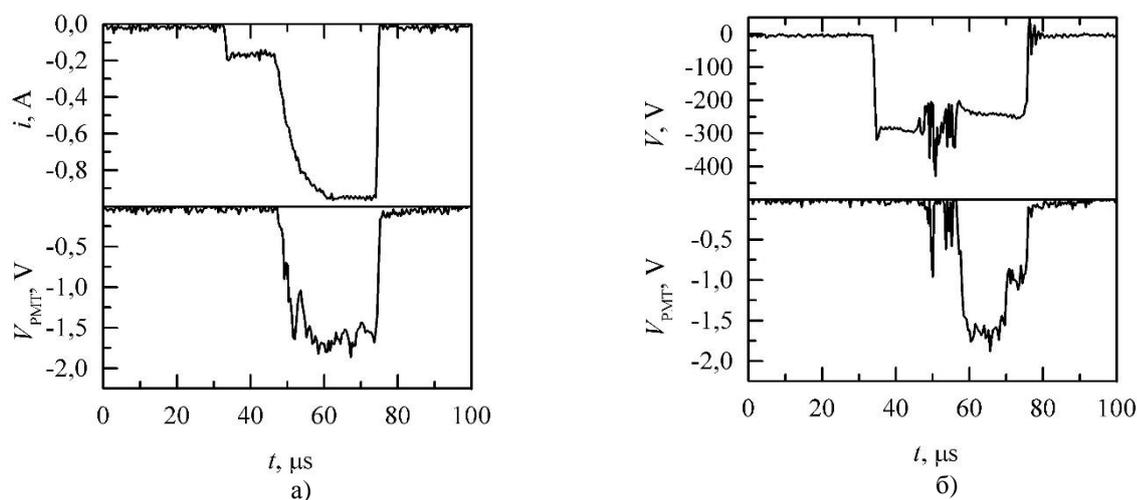


Рис. 7. Осциллограмма тока через промежуток совместно с осциллограммой свечения вблизи активного электрода (а) и напряжения на промежутке совместно с осциллограммой свечения (б). Напряжение холостого хода на выходе генератора $V_0 = 300$ В.

Здесь, наконец, мы можем вполне определенно сказать о форме горения разряда, которая ответственна за возникновение импульсов тока. Спектральные исследования излучения показали, что в спектре свечения этого разряда присутствуют линии материала катода. Мы определяем данный вид разряда как разновидность искрового микроаряда в газовой полости, причем катодом является поверхность металла, а анодом поверхность электролита. Типичная длительность существования данного микроаряда составляет 0,5 мкс и менее.

На рис. 7 представлена ситуация, которая соответствует напряжению $V_0 = 300$ В, т.е. существенно выше порогового. Здесь искровые разряды в микрополостях возникают практически в каждом импульсе напряжения. Масштаб осциллограмм выбран таким образом, чтобы можно было рассмотреть поведение напряжения, тока и сигнала интенсивности излучения в течение всего импульса напряжения.

Для металлического катода характерна форма горения разряда в виде нестационарных микроискр. Другой формой горения разряда, которая могла бы существовать в газовой полости при металлическом катоде, является разряд типа тлеющего. Следовательно, всплески тока могут наблюдаться либо при переходе от слабого предпробойного тока в искру, либо при переходе слаботочного тлеющего разряда в искру. В экспериментах с импульсами отрицательной полярности наиболее детально продемонстрирован первый процесс, т.е. формирование искрового разряда на фоне протекания слабого предпробойного тока.

Разряд при жидком катоде

Далее рассмотрим ситуацию, когда катодом оказывается поверхность электролита, а анодом является металлический активный электрод зонда. В этом случае напряжение на активный электрод 1 (см. рис. 1) подавалось от генератора биполярных импульсов с

длительностью полупериода 5 мкс, а возвратный электрод 3 был заземлен. Минимальное сопротивление промежутка в этих условиях составило примерно 70 Ом.

На рис. 8 представлен пример осциллограмм напряжения, тока и интенсивности излучения в случае, когда напряжение на выходе генератора $V_0 = 200$ В соответствует значению выше порогового. В этих условиях на фронте импульсов напряжения отчетливо видны колебания, которые соответствуют эффекту резонансной зарядки емкости кабеля $C = 400$ пФ через индуктивность $L = 13$ мкГн.

Здесь также видны импульсы микроискровых разрядов только при отрицательной полярности напряжения. Они могут наблюдаться как в начале импульсов, где эффект резонансной зарядки ярко выражен, так и в течение импульса. Однако самым примечательным является то, что при высоких напряжениях V_0 появляется сигнал излучения на положительной полярности. Мы связываем данный сигнал с излучением микрозарядов тлеющего типа, которые характеризуются большой величиной катодного падения напряжения и высоким внутренним сопротивлением по сравнению с искровым разрядом. При типичной толщине газовой полости около 100 мкм длина катодного слоя в данном случае соизмерима с толщиной газовой пленки на поверхности активного электрода, а длина плазменной области, примыкающей к катодному слою мала. Соответственно, добавка тока разряда в полный ток незначительна, и интенсивность свечения плазмы мала.

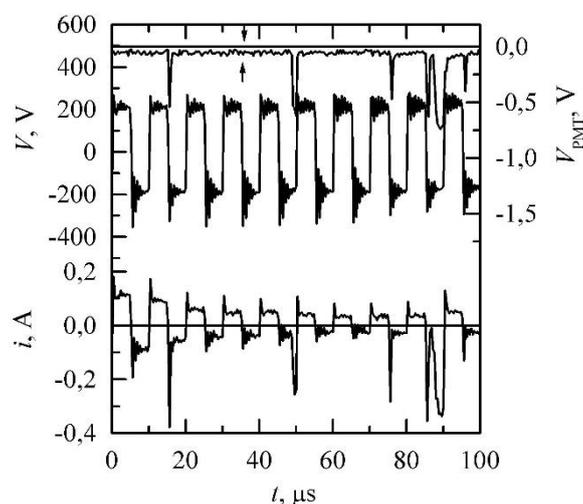


Рис. 8 Осциллограммы напряжения, тока и интенсивности свечения из области вблизи активного электрода для случая питания промежутка от генератора биполярных импульсов. $V_0 = 200$ В заведомо выше порогового значения.

Вместе с тем, слабый сигнал излучения виден и при отрицательной полярности напряжения, т.е. разряд типа тлеющего поддерживается и для случая металлического катода. Однако здесь на фоне тлеющего разряда возникают всплески тока, которые мы интерпретируем как переход тлеющего разряда в искровой разряд. Разница в формах горения

разряда обусловлена тем, что переход тлеющего разряда в искровой в ситуации, когда катод жидкий затруднен [14].

При протекании тока в электролите возникновение газовых микрополостей происходит при довольно низких напряжениях на промежутке. Когда напряжение достигает порогового значения V_{cr} , внутри некоторых полостей может зажигаться газовый разряд. Для рассматриваемых условий, когда к промежутку прикладывается импульсное напряжение и активный электрод имеет плоский торец, пороговое напряжение составляет $V_{cr} \approx 750$ В.

В эксперименте динамику формирования газовых полостей и возникновения плазмы в них удобно исследовать, проводя последовательное повышение начального напряжения V_0 , приложенного к промежутку. Вначале приведем результаты для условий, когда напряжение лежит в диапазоне ниже порогового. Пример осциллограмм напряжения на промежутке, тока разряда и фотографий промежутка, соответствующих характерным стадиям развития процесса во времени показан на рис. 2.

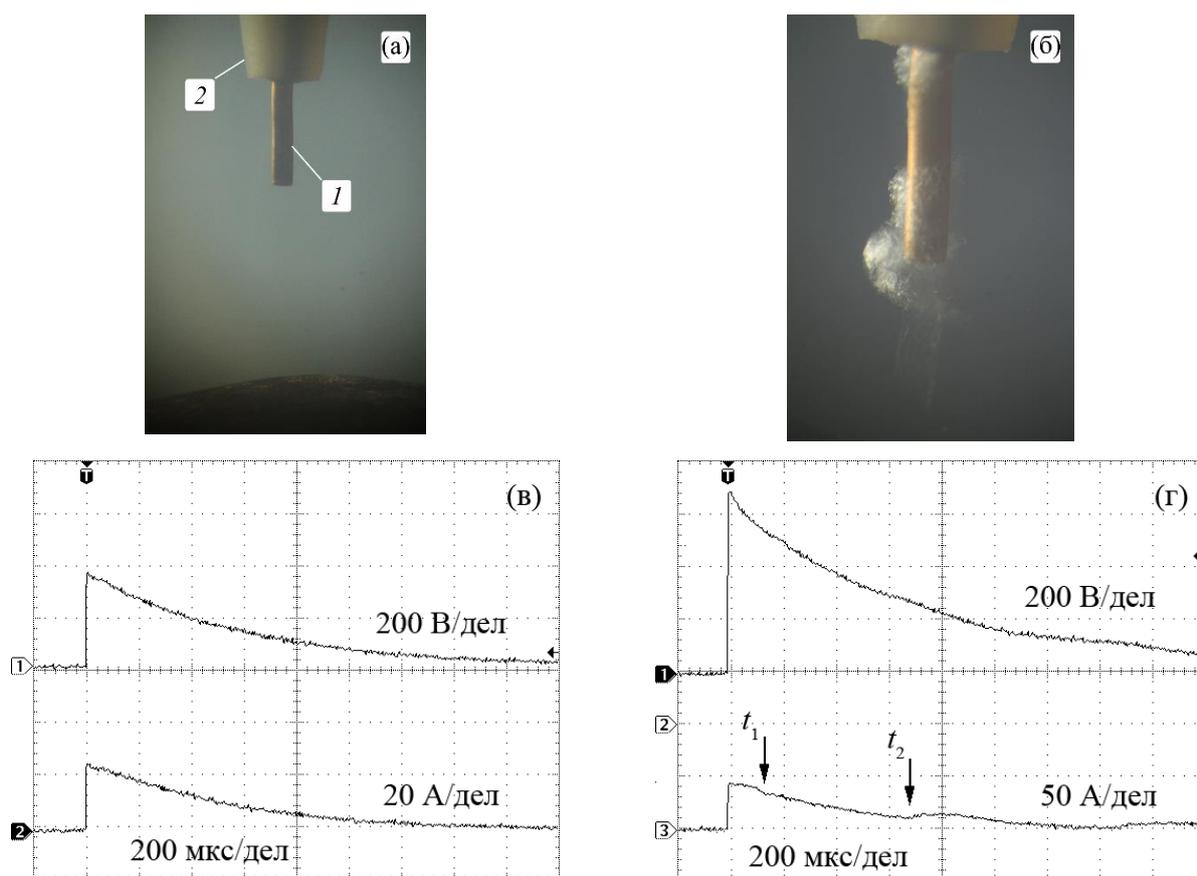


Рис. 9. Фотографии промежутка совместно с осциллограммами напряжения и тока для начальных напряжений на промежутке ниже пороговых. (а), (б) – $V_0 = 370$ В; (в), (г) – $V_0 = 680$ В. 1 – активный электрод, 2 – полиэтиленовый изолятор. Длительность экспозиции $\Delta t = 1$ мс, открытие затвора ССД камеры соответствовало моменту прихода импульса напряжения.

Вплоть до напряжения $V_0 = 400$ В газовые полости в промежутке отсутствовали (рис. 9а). Начальное сопротивление электролита, определенное как отношение напряжения V_0 к току i_0 , было $R_0 = 15$ Ом. На рис. 9в видно, что спад напряжения и тока происходит в соответствии с разрядкой емкости $C_0 = 40$ мкФ через сопротивление, которое практически не изменяется во времени. Например, в момент $t = 600$ мкс оно равно 18.5 Ом и ненамного превышает начальное, что, как представляется, связано с нагревом объема электролита.

При повышении начального напряжения имеет место процесс образования газовых полостей (рис. 9б). Полости возникают в виде микропузырьков с характерным диаметром 100 мкм. Причиной образования микропузырьков является выделение тепловой мощности в объеме при протекании тока через электролит. Для геометрии электродов острие – плоскость максимальное электрическое поле и максимальная плотность тока соответствуют области расположенной непосредственно вблизи кончика острия. Соответственно, первые микропузырьки зарождаются в этой области и часть из них привязывается к поверхности активного электрода. Кроме того, пузырьки образуются в окрестности тройной точки, где металлический электрод 1 соприкасается с изолятором 2.

Легко видеть (рис. 9г), что сопротивление промежутка изменяется во времени. Например, в момент t_1 сопротивление промежутка увеличилось, и на осциллограмме мы видим более резкий спад тока чем тот, который бы наблюдался при постоянном сопротивлении. Причина состоит в возникновении микропузырьков, которые экранируют электрод и препятствуют протеканию тока через электролит. Для данного конкретного случая начало эффекта экранировки тока проявляется через время около 100 мкс.

Картину развития процессов в динамике можно схематично описать следующим образом. С одной стороны, при протекании тока образуются новые микрополости, которые имеют вид конгломератов, или облаков микропузырьков. Они находятся не только на поверхности, но и в объеме жидкости. Рождение новых газовых полостей приводит к усилению эффекта экранировки тока. С другой стороны, каждый пузырек может начать уменьшаться в объеме, если к нему не подводится достаточная тепловая мощность. Кроме того, пузырьки могут отделяться от поверхности активного электрода и всплывать вверх, что ведет к снижению экранировки электрода.

Из осциллограммы тока на рис 9г видно, что процессы рождения и гибели микропузырьков вблизи активного электрода в каждый момент времени не уравнивают друг друга. В этом плане весьма иллюстративным является момент времени $t_2 = 680$ мкс. В данный момент сопротивление промежутка $R(t_2) \approx 30$ Ом. За счет разрядки емкости C_0 напряжение снизилось до величины $V(t_2) = 270$ В, а ток через промежуток в условиях

экранировки составляет около 10 А. При таких условиях новые микропузырьки перестают образовываться, и начинает преобладать процесс гибели микропузырьков. На осциллограмме тока данный факт отражается в том, что ток резко возрастает. Можно говорить о том, что поверхность электрода и область вблизи поверхности освобождаются от микропузырьков, и эффект экранировки тока вновь ослабляется.

При повышении начального напряжения на промежутке скорость образования микропузырьков увеличивается. Здесь возможны ситуации, когда активный электрод полностью экранируется облаком микропузырьков, и ток становится практически равным нулю. Тем не менее, через типичное время около 1 мс облако разрушается, промежуток начинает проводить ток, и происходит полная разрядка конденсатора через электролит.

На рис. 10 показаны осциллограммы напряжения, тока и сигнала с ФЭУ для условий, когда напряжение на промежутке равно пороговому. Здесь сопротивление промежутка достигает 30 Ом через время $t_1 = 380$ мкс, т.е., через меньшее время, чем для условий на рис. 9г. Однако напряжение на промежутке при этом составляет $V(t_1) = 450$ В. Это значит, что образование новых газовых микрополостей не прекращается, и вследствие экранировки активного электрода сопротивление промежутка продолжает расти. Тогда ток через промежуток начинает резко уменьшаться, и далее к моменту времени t_2 ток становится близким к нулю. Здесь мы можем говорить о том, что произошла фактически полная экранировка поверхности электрода облаком микропузырьков, т.е. на поверхности электрода образовался слой газа, который отделяет электрод от жидкости. По сравнению с ранее рассмотренными случаями ситуация кардинально меняется. Внешнее напряжение оказывается приложенным к газовому слою, и в некоторых микрополостях возможно зажигание разряда.

Для возникновения разряда необходимо, чтобы напряжение на газовой микрополости оказалось выше напряжения соответствующего минимуму кривой Пашена, т.е. находилось на уровне около 300 В и более [15,16]. В нашем случае напряжение на промежутке оказывается равным 450 В, и для некоторых микрополостей условие развития самостоятельного разряда может быть выполнено. Ранее возникновение разрядов в микрополостях рассматривалось выше. Площадь активного электрода и ток через электролит были существенно меньше, чем для условий данного эксперимента. Поэтому возникновение небольшого количества микропузырьков уже приводило к экранировке активного электрода, причем факт возникновения разряда в отдельном микропузырьке отражался на осциллограмме тока. Было показано, что разрядный ток через отдельный микропузырек протекает в форме импульсов амплитудой в доли ампера с типичной длительностью около 1 мкс и менее. Мы

характеризовали эти импульсы как импульсы тока частичных микрозарядов в газовых полостях.

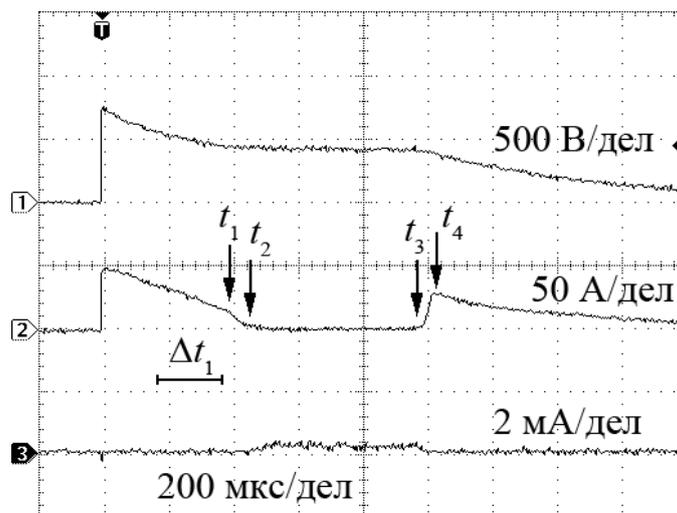


Рис. 10. Осциллограммы напряжения на промежутке (1) и тока (2) совместно с осциллограммой сигнала с фотоумножителя (3) для начального напряжения равного пороговому $V_0 = V_{cr} = 750$ В.

Именно режим поддержания микрозарядов имеет место на интервале времен от t_2 до t_3 . Импульсные разряды возникают и гаснут в небольшом количестве микрополостей. Энергия импульса берется из кабеля, соединяющего накопительную емкость с промежутком. Наличие микрозарядов на данной стадии подтверждается осциллограммой сигнала свечения с ФЭУ (рис. 10). Для данного случая сигнал свечения слабый и его интенсивность находится вблизи порога чувствительности ФЭУ. Тем не менее, отчетливо видно превышение сигнала над нулевой линией. На интегральных снимках межэлектродного промежутка видно облако микропузырьков экранирующее поверхность активного электрода, причем в некоторых микропузырьках наблюдается свечение.

Отметим, что напряжение на промежутке во временном интервале от t_2 до t_3 хотя и слабо, но уменьшается со временем, а протекающий ток очень мал. Поэтому скорость образования новых микропузырьков уменьшается. Как и для условий рис. 9г, в конце рассматриваемой стадии газовые полости практически перестают образовываться, и начинает преобладать процесс гибели полостей и освобождение от них поверхности активного электрода. Вследствие этого электрод перестает быть экранированным слоем газа, и возникновение микрозарядов оказывается невозможным. Начало «очистки» поверхности электрода от газовых микрополостей можно отождествить с моментом t_3 на рис. 10 (или с моментом t_2 на рис. 9г). Начиная с этого момента происходит резкий рост тока через электролит, который

наблюдается на в интервале времени от t_3 до t_4 . Далее после момента t_4 имеет место разряд емкости C_0 через сопротивление электролита.

Описанная выше картина характерна для пороговых напряжений на промежутке. Если напряжение превышает пороговое, то в промежутке загорается разряд с довольно большим током. Ток разряда протекает через газовые полости с плазмой и замыкается на обратный электрод через объем электролита. Данный режим характеризуется осциллограммами, и фотографиями свечения промежутка, представленными на рис. 11, соответствующими начальному напряжению $V_0 = 1100$ В.

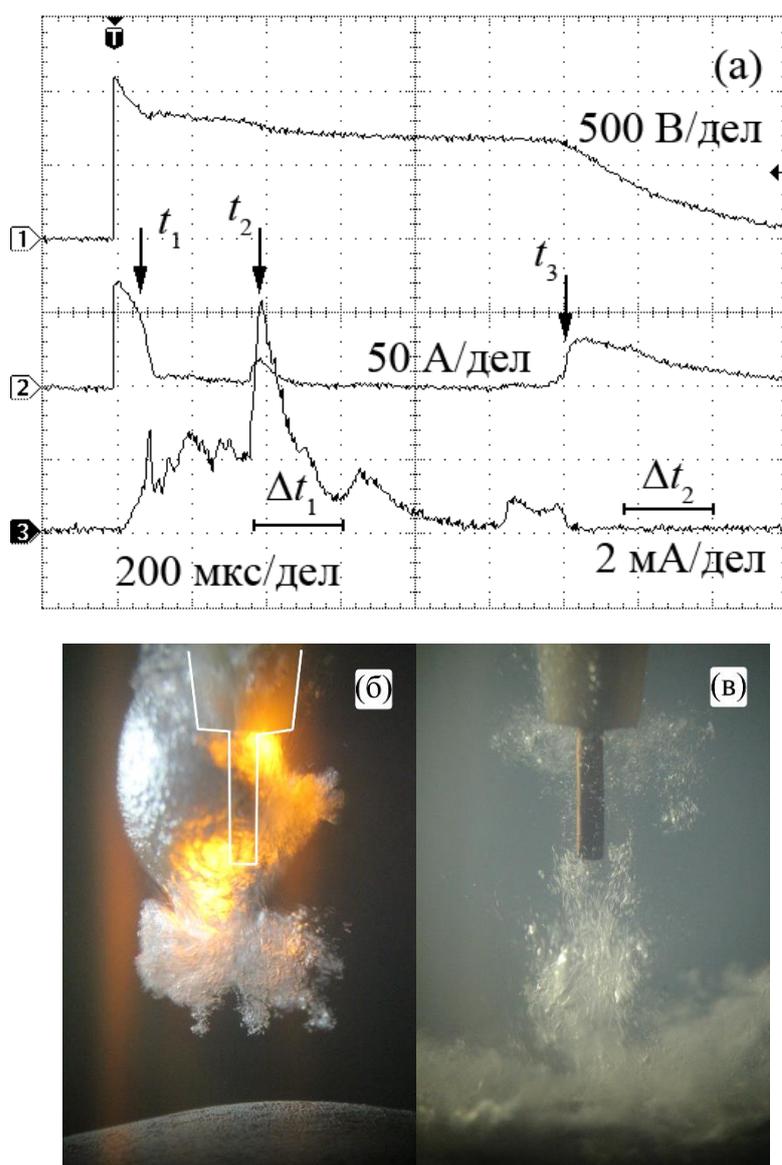


Рис. 11. Осциллограммы напряжения на промежутке (1), тока (2) и сигнала с фотоумножителя (3), совместно с фотографиями свечения промежутка при экспозициях Δt_1 и Δt_2 . Начальное напряжение выше порогового, $V_0 = 1100$ В.

Полная экранировка поверхности активного электрода при таком напряжении начинается уже через время $t_1 = 60$ мкс (рис. 11). Отметим, что сигнал с фотоумножителя, показывающий, что в отдельных микрополостях возникают микроразряды, появляется даже несколько раньше этого времени. Интенсивность сигнала значительно выше, чем для напряжения равного пороговому. На осциллограмме свечения видны хаотические пульсации. Это говорит о том, что в одних микрополостях разряды возникают, а в других гаснут.

Ясно, что при наличии плазмы в газовых полостях эффект экранировки активного электрода ослабляется, поскольку ток протекает с активного электрода через микрополости с плазмой и через объем электролита на противоположный электрод. На осциллограммах тока и свечения довольно характерным является момент времени t_2 . После момента t_1 в промежутке поддерживается некоторый усредненный ток разряда на уровне около 3 А. Далее в момент t_2 на осциллограмме тока наблюдается выброс амплитудой 20 А, который сопровождается некоторым спадом напряжения и импульсом сигнала ФЭУ. Фотография промежутка, сделанная с экспозицией $\Delta t_1 = 250$ мкс, захватывает по времени стадию резкого выброса тока разряда и выброса интенсивности свечения. Видно (рис. 11б), что свечение, т.е., фактически плазма разряда присутствует в большом количестве микрополостей. Можно говорить о том, что размер плазмы в направлении от активного электрода к противоположному составляет более чем половину длины промежутка. Наиболее яркое свечение наблюдается в области кончика активного электрода и вблизи тройной точки.

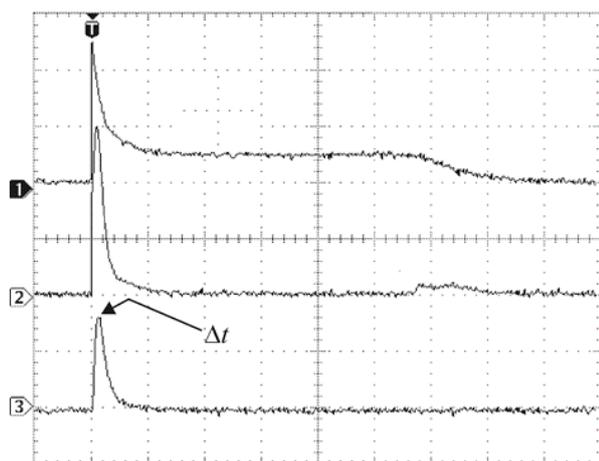
Образование представленной картины свечения промежутка разряда можно на качественном уровне пояснить следующим образом. К моменту t_1 активный электрод покрывается облаком микропузырьков, и напряжение оказывается приложенным к слою газа. Когда в микрополостях, сформированных на поверхности активного электрода зажигается разряд, потенциал активного электрода вытесняется на границу плазменных областей в направлении противоположного электрода. Ток с активного электрода начинает протекать через газоразрядную плазму и объем электролита. Впереди границы плазмы образуются новые газовые полости, и в них также возникает плазма. Иными словами, мы наблюдаем процесс распространения фронта микропузырьков и фронта плазмы вглубь промежутка. Типичная скорость распространения этого своеобразного фронта ионизации составляет 10^3 см/с.

В общем случае именно описанный процесс приводит к полному перекрытию промежутка высокопроводящим плазменным каналом. Тогда мы говорим о завершеном пробое промежутка. Однако для обсуждаемых условий начального напряжения $V_0 = 1100$ В и используемой емкости C_0 полного перекрытия промежутка плазмой не происходит, т. е. имеет место случай незавершенного пробоя.

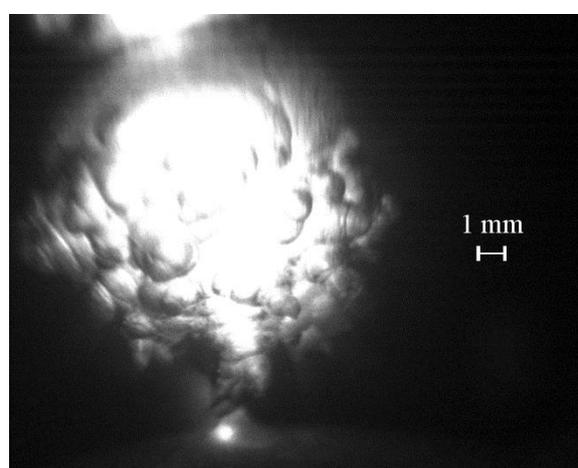
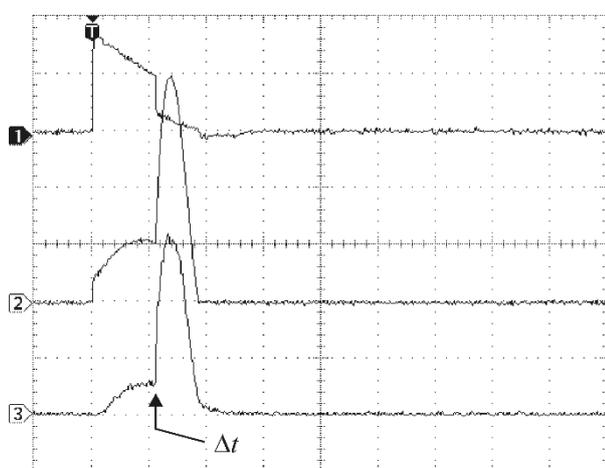
По мере развития процессов происходит разрядка емкости, и напряжение на промежутке уменьшается. Соответственно уменьшается и интенсивность свечения плазмы. Хотя после импульса, возникающего в момент t_2 , на осциллограмме сигнала ФЭУ можно видеть еще несколько импульсов, но в целом тенденция такова, что интенсивность свечения уменьшается со временем. Это означает, что при снижении напряжения разряд в микропузырьках погасает, поскольку напряжения 600 В недостаточно для того, чтобы поддерживать разряд в большом количестве микрополостей, расположенных в объеме. Практически полное погасание разряда происходит к моменту t_3 .

После момента t_3 имеет место «очистка» поверхности от микропузырьков и гибель микропузырьков за счет уменьшения их объема. Также, как и для условий на рис. 9г и рис. 10, остаточное напряжение на емкости и ток через промежуток недостаточны, чтобы происходил процесс генерации новых микропузырьков. Видно, что за счет снятия экранировки активного электрода ток через электролит возрастает до 30 А, и далее емкость полностью разряжается. Фотография, с экспозицией Δt_2 , сделанная на временном интервале $t > t_3$, подтверждает погасание разряда и наличие в промежутке микропузырьков, которые не экранируют активный электрод полностью.

В диапазоне предпробойных напряжений $V_0 \geq 1500$ В интенсивность излучения плазмы возрастает более чем на порядок и ее поведение во времени практически повторяет форму тока рис.12а. Свое максимальное значение интенсивность достигает к моменту $t \leq 100$ мкс. К данному моменту в промежутке уже присутствует макрополость с размером не около 5 мм (момент съемки отмечен стрелочкой, длительность экспозиции $\Delta t = 1$ мкс) по направлению к обратному электроду. Видно на рис.12а, что полость заполнена плотной диффузной плазмой. Очевидно, что в данном случае с одной стороны, почти полностью происходит нивелирование эффекта экранировки активного электрода. С другой стороны, уменьшается протяженность слоя электролита между электродами. Ситуацию можно трактовать как уменьшение межэлектродного зазора. Оба фактора ведут к тому, что сопротивление промежутка должно упасть по сравнению с начальным сопротивлением и зазор сможет пропускать большие токи. Расчет, сделанный на основе осциллограмм рис.12а показывает, что в момент максимума тока сопротивление промежутка $R_g \approx 7$ Ом, что существенно меньше начального сопротивления $R_0 = 16$ Ом. В отсутствие пробоя уже в начальной стадии разряда ток достигает величины около 300 А. Отметим, что режим позволяющий формировать в жидкости газовые макрополости за малые времена, должен являться исключительно благоприятным для генерации ударных волн [10, 11].



а)



б)

Рис.12. Осциллограммы напряжения (луч 1), токов разряда и фотоумножителя (2, 3) а так же фотографии межэлектродного зазора снятые в интервале времени Δt . б) – $V_0 = 2500$ В, 1000 В/дел., 100 А/дел., 20 мА/дел., 1 мс/дел.; $\Delta t = 1$ мкс; в) – $V_0 = 3300$ В, 200 В/дел., 500 А/дел., 40 мА/дел., 100 мкс/дел., $\Delta t = 1$ мкс.

Форма горения разряда в полости требует дополнительного исследования. Однако ясно, что мы имеем дело с одной из специфических форм горения сильноточного диффузного разряда с жидким катодом [1;10-11]. Особенность разряда состоит в том, что процессы формирования катодных пятен и соответственно переход разряда к искре затруднены [14].

На рис.12б представлены осциллограммы напряжения на промежутке, токов разряда и фотоумножителя, а также фотография зазора для случая статического пробоя $V_0 = 3300$ В. Момент снятия фотографии отмечен стрелкой, а время экспозиции $\Delta t = 1$ мкс. Случай приведен для иллюстрации факта, что пробой в жидкостях происходит в результате развития разряда в газовой полости, перемкнувшей промежуток [1, 4]. Данный режим специально не исследовался в нашей работе.

Выводы

Исследованы стадии развития разряда, при этом основное внимание уделено процессам формирования и гибели газовых полостей, а также возникновению плазмы в полостях. Показано, что формирование газовых полостей происходит при значениях напряжения приложенных к промежутку превышающих 350 В, а величина порогового напряжения, при котором в полостях возникает газоразрядная плазма составляет около 800 В. Полости существуют в виде микро и макропузырей с характерными размерами 0,1 мм и единицы миллиметров соответственно. Основными механизмом возникновения полостей и изменения их размера является джоулев нагрев и испарение жидкости, а также нагрев газа внутри полостей протекающими токами.

При напряжении на промежутке ниже порогового протекание тока через электролит определяется сопротивлением электролита и динамикой формирования и гибели микрополостей, которые возникают вблизи кончика активного электрода и на его поверхности, а также в области тройной точки, где активный электрод находится в контакте с изолятором. Полости имеют форму микропузырьков с характерным размером около 100 мкм. За счет образования конгломератов микропузырьков происходит частичная экранировка поверхности электрода газовым слоем, что ведет к росту сопротивления промежутка и падению тока. Процесс гибели микрополостей и их отрыва от поверхности электрода сопровождается увеличением тока.

При напряжении равном пороговому, которое в условиях эксперимента было около 750 В, электрод оказывается практически полностью покрыт газовыми микрополостями. В этом случае приложенное к промежутку напряжение прикладывается к газовому слою, и в некоторых микрополостях становится возможным формирование газоразрядной плазмы. Разряд поддерживается в форме слабых импульсов тока короткой длительности.

При превышении напряжения над пороговым количество микрополостей с плазмой увеличивается. Ток в промежутке замыкается с активного электрода через плазму и через объем электролита на противоположный электрод. На границе плазмы происходит образование новых газовых микрополостей, в которых также зажигается разряд. Таким образом происходит распространение фронта плазмы в направлении противоположного электрода. Типичная скорость распространения составляет 10^3 см/с. Тем не менее, если напряжение на промежутке незначительно превышает пороговое, то полного перекрытия промежутка плазмой не происходит. Перекрытие и переход к сильноточному разряду наблюдается, начиная с напряжений на уровне 2.5 кВ.

Публикации автора по теме работы

1. *Korolev Y.D., Shemyakin I.A., Ivashov R.V., Kasyanov V.S., Landl N.V., Sun Y.H., Shao T., Gao Y.* Discharge in the saline solution in a vicinity of the threshold voltages. // *Journal Phys.: Conference Series*. 2014. V. 552. P. 012005.
2. *Королев Ю.Д., Шемякин И.А., Касьянов В.С., Ивашов Р.В., Ландль Н.В., Sun Y., Shao T., Gao Y.* Исследование электрического разряда в солевых растворах в области напряжений вблизи пороговых. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 11-3. С. 12-16.
3. *Korolev Y.D., Shemyakin I.A., Ivashov R.V., Kasyanov V.S., Landl N.V., Sun Y., Shao T., Gao Y.* Investigation of the electrical discharge in the saline solutions in a vicinity of the threshold voltages. // *4th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Abstracts)*, 2014. P. 244.
4. *Шемякин И.А., Королев Ю.Д., Касьянов В.С., Гейман В.Г., Болотов А.В., Sun Y., Shao T., Gao Y.* Начальные стадии сильноточного импульсного разряда в воде с добавками соли. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2015. Т. 58. № 9. С. 268-272.
5. *Sun Y., Xu X., Ren C., Fan A., Fu R., Gao Y., Shao T., Yan P., Shemyakin I.A., Kasianov V.S., Korolev Y.D.* Research on the electrical characteristics of the pulsed discharge in saline solutions. // *12 International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications"(Abstracts)*, 2015. P. 21.
6. *Shemyakin I.A., Korolev Y D., Kasianov V.S., Geyman V.G., Bolotov A.V., Sun Y., Shao T. Gao Y.* Initial stages of the high-current pulsed discharge in saline solutions. // *12 International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications"(Abstracts)*, 2015. P. 57.
7. *Shemyakin I. A., Korolev Y.D., Kasyanov V.S., Nekhoroshev V.O., Bolotov A.V.* Prebreakdown stages of a pulsed discharge in the saline solutions. // *Proceedings the 15th International workshop on magneto-plasma aerodynamics: Abstracts*, 2016. P. 134-136.
8. *Korolev Y.D., Bolotov A.V., Kasianov V.S., Landl N.V., Nekhoroshev V.O., Geyman V.G., Frants O.B., Shemyakin I.A.* Investigation of the initial stages of pulsed discharge in saline solution. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016 Т. 59. № 9. С. 78-81.
9. *Касьянов В.С., Королев Ю.Д., Шемякин И.А., Гейман В.Г., Болотов А.В., Франц О.Б.* Развитие газовых полостей и разрядов в них при напряжениях выше порогового. // *Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы», Сборник тезисов*. 2017. С. 88.
10. *Касьянов В.С., Королев Ю.Д., Шемякин И.А., Гейман В.Г., Болотов А.В., Нехорошев В.О.* Формирование газовых полостей в электролите и развитие разряда в них при напряжениях

близких к пороговому. // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы», Сборник тезисов. 2017. С. 59.

11. *Королев Ю.Д., Шемякин И. А., Касьянов В.С., Гейман В.Г., Болотов А.В., Нехорошев В.О.* Развитие разряда в солевом растворе при напряжениях близких к пороговому значению. // Физика плазмы. 2018 Т. 44. № 6. С. 507-513.
12. *Korolev Y.D., Kasyanov V.S., Shemyakin I.A., Bolotov A.V., Nekhoroshev V.O., Geyman V.G.* Formation of shock waves at different stages of discharge development in saline solution. // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Book of Abstract. 2018. P. 260.
13. *Korolev Y.D., Kasyanov V.S., Shemyakin I.A., Bolotov A.V., Geyman V.G., Frants O.B.* Features of development of a pulse discharge in a saline solution at different voltage polarity on active electrode. // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Book of Abstract. 2018. P. 259.
14. *Korolev Y.D., Kasianov V.S., Shemyakin I.A., Bolotov A.V., Frants O.B., Landl N.V., Geyman V.G.* Development of plasma discharge in saline solutions. // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Book of Abstract. 2018. P. 239.
15. *Королев Ю.Д., Касьянов В.С., Шемякин И.А., Болотов А.В., Франц О.Б., Ландль Н.В., Гейман В.Г.* Формирование газовых полостей и развитие незавершенного пробоя в электролите. // Известия высших учебных заведений. Физика 2016 Т. 61. № 8. С. 3-7.

Список цитируемой литературы

- [1] Bruggeman P., Leys C., // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42, N. 5, Article Number 053001.
- [2] Наугольных К.А., Рой Н.А. // Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.
- [3] Электрический разряд в жидкости и его применение / Под ред. Г.А. Гулый. Киев: Наукова думка, 1977. 174 с
- [4] В. Я. Ушаков // Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск : Изд-во НТЛ, 2005. — 488 с.
- [5] Ушаков В. Я., Семкина О. П., Рюмин В. В. О природе импульсного электрического пробоя водных электролитов // Электронная обработка материалов. — 1972. — Т. 44, № 2. — С. 48—54. 32.
- [6] Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Штейнберг А. А. Некоторые особенности электрического пробоя электролитов // ДАН СССР. — 1962. — Т. 147, № 4. — С. 822— 825.
- [7] Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Стояк М. Ю. Формирование электрического пробоя в водных растворах хлористого натрия // ЖТФ. — 1964. — Т. 34, вып. 5. — С. 949— 951.

- [8] Henry H. F. Velocity of the Anode Spark in Copper Sulfate Solutions Under Application of Impulsive Potential // *Journal of Applied Physics*. — 1948. — Vol. 19, no. 11. — P. 988–994.
- [9] Jones H. M., Kunhardt E. E. Pulsed dielectric breakdown of pressurized water and salt solutions // *Journal of Applied Physics*. — 1995. — Vol. 77, no. 2. — P. 795–805.
- [10] Korobejnikov S. M., Yanshin E. V. Model of prebreakdown processes in liquids under pulse voltage // 1987 Ninth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. — 1987. — P. 398–402.
- [11] Коробейников С. М. О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. Предпробойные процессы // ТБТ. — 1998.
- [12] K. R. Stalder, J. Woloszko, I. G. Brown, C. D. Smith, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 27, pp. 4503 – 4505 (2001).
- [13] J. Woloszko, K. R. Stalder, I. G. Brown, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **30**, 3, pp. 1376 – 1383 (2002).
- [14] Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, *Physics of pulsed breakdown in gases*, Ekaterinburg, Ural Division of the Russian Academy of Science, 1998, 275 p.
- [15] Schaper L., Stalder K.R., Graham W.G. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. V. 20. P. 034004.
- [16] Korolev Y.D., Shemyakin I.A., Ivashov R.V., Kasyanov V.S., Landl N.V., Sun Y.H., Shao T., Gao Y. Discharge in the saline solution in a vicinity of the threshold voltages// *Journal Phys.: Conference Series*. 2014. V. 552. P. 012005.