

На правах рукописи



**ШЕМЕТ Михаил Вячеславович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО  
БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В КОРОТКИХ ВОЗДУШНЫХ  
ПРОМЕЖУТКАХ**

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном  
учреждении высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,  
**Емельянов Олег Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Мошкунов Сергей Игоревич**,  
доктор технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт электрофизики и  
электроэнергетики Российской академии наук,  
заведующий лабораторией

**Кудрявцев Анатолий Анатольевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный университет»,  
доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»

Защита состоится «5» июня 2015 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета  
Д 212.229.16 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный  
учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте  
<https://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.16,  
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Наталия Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** За последние 10-15 лет наблюдается рост числа исследований барьерного разряда (БР) вследствие его широкого использования не только при получении озона, но и для плазмохимической модификации материалов, разрушения летучих органических соединений, биомедицинских приложений, систем управления воздушными потоками и др. В последние годы имеет место тенденция к миниатюризации устройств, использующих наносекундные разряды атмосферного давления субмиллиметровых масштабов ( $\sim 1-1000$  мкм), что связано с практическими преимуществами, такими как портативность, уменьшение значения рабочего напряжения, снижение потребления энергии и пр. Аналогичные разрядные процессы (локализованные микропробои), известные как частичные разряды (ЧР), наблюдаются в дефектных областях систем электрической изоляции. Однако для высоковольтных конструкций такие процессы являются крайне нежелательными, поскольку служат причиной деградации и преждевременного пробоя электрической изоляции. Вместе с тем, на сегодняшний день так и не сформирован общий подход прогнозирования срока службы электроизоляционной конструкции на основе корреляции с измеренными характеристиками ЧР, а механизмам развития ЧР уделено значительно меньше внимания по сравнению с альтернативными направлениями исследований (распознавание ЧР, деградация диэлектриков, разработка систем диагностики и др.). Таким образом, изучение разрядных явлений в коротких промежутках при атмосферном давлении имеет, по крайней мере, двусторонний интерес и представляется вполне актуальным.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время в литературе отсутствует общее мнение о механизмах пробоя и развития разрядов в субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении, что объясняется отличающимися результатами моделирования, условиями проведения экспериментов и неоднозначностью терминологии, вызванной многообразием условий существования разряда. Большинство исследований разряда проводилось в средних и длинных промежутках, где установлено, что таунсендовский механизм разряда реализуется, когда произведение давления на размер промежутка  $pd$  меньше 200 торр·см, а стримерный механизм развивается при  $pd > 1000$  торр·см. Однако для БР в промежутках миллиметрового размера при атмосферном давлении ( $pd \sim 76$  торр·см) было экспериментально зафиксировано возникновение стримеров, что противоречит устоявшимся представлениям. Механизмы развития БР в миллиметровых промежутках теоретически и экспериментально исследовались в работах Ю.С. Акишева, В.И. Гибалова, К.В. Козлова, С.И. Мошкунова, М.В. Соколовой, Ю.В. Юргеленаса, R. Brandenburg, U. Kogelschatz, G.J. Pietsch и др. Кроме того, в литературе представлен целый ряд статей, демонстрирующих явное отклонение от закона Пашена, объясняемого теорией Таунсенда, для зазоров в несколько десятков микрометров и менее. В этом случае, когда характерный масштаб изменения напряженности электрического поля в разрядном промежутке сопоставим с длиной релаксации энергии электрона, необходим учет нелокальности

функции распределения электронов по энергиям (ФРЭ). Существенное развитие представлений о нелокальных разрядных процессах внесли работы Л.Д. Цендина, А.А. Кудрявцева, Ю.Б. Голубовского, Г.В. Найдиса, J.P. Voeuf, U. Ebert и др. Закономерностям развития ЧР, как основной причины деградации полимерных диэлектриков, посвящены труды В.П. Вдовико, Г.С. Кучинского, А.Г. Овсянникова, R. Bartnikas, J.C. Devins, G.C. Montanari, P.H.F. Morshuis и др.

Большинство экспериментальных исследований разрядов в коротких промежутках проводились при переменном напряжении, когда за период напряжения происходят единицы - сотни разрядов. В основном, это связано с требованиями методик исследования (кросскорреляционная спектроскопия) или стоящими практическими задачами (деградация рабочего диэлектрика, наработка озона). Вместе с тем, первостепенным является изучение характеристик первого разряда, что обусловлено его определяющим влиянием на последующее развитие серии разрядов. Следует отметить, что исследованиям разряда в условиях внешнего неоднородного поля в коротких промежутках, в особенности, при наличии диэлектрического барьера, посвящено весьма ограниченное количество работ. В случае, когда развитие разряда осложнено наличием диэлектрика, крайне важное значение имеет заряд, накапливающийся на поверхности диэлектрика, вследствие его влияния на динамику разряда в целом. Однако в литературе фактически отсутствуют детальные количественные экспериментальные данные о поверхностном заряде, накапливаемом при развитии разряда в субмиллиметровых промежутках.

**Цель работы.** Проведение экспериментальных исследований для выяснения основных характеристик развития одиночного барьерного разряда в воздушных субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении в условиях однородного и неоднородного полей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создать экспериментальную установку для измерения электрофизических характеристик барьерного разряда.
2. Проверить применимость закона Пашена в присутствии диэлектрического барьера на поверхности анода или катода.
3. Определить основные характеристики одиночного барьерного разряда: напряжение возникновения разряда, разрядный ток, переносимый во внешней цепи заряд, а также параметры и пространственное распределение заряда, накапливаемого на поверхности полимерного барьера.
4. Выяснить механизм развития барьерного разряда.

**Научная новизна:**

1. Экспериментально определены пространственные распределения зарядов, накопленных на полимерных барьерах в результате развития одиночного барьерного разряда в воздушных промежутках 0.1-1 мм при атмосферном давлении в условиях однородного и неоднородного распределений электрического поля.

2. Показано, что при однородном распределении поля пробой субмиллиметровых воздушных промежутков возникает в условиях значительных перенапряжений (~20-40%) относительно значений, рассчитанных на основании закона Пашена в соответствии с общепринятыми литературными данными.

3. Выявлено, что в условиях неоднородного поля для воздушных промежутков 0.1-2 мм напряжение возникновения разряда при положительной полярности иглы на 25-35% превышает соответствующее значение для отрицательной полярности.

4. Экспериментально показано, что в условиях неоднородного поля в зависимости от размера воздушного промежутка барьерный разряд может развиваться в одиночной или множественной импульсных формах.

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс для измерения импульсных характеристик барьерного разряда и распределения заряда, накопленного на поверхности диэлектрического барьера.

2. На основании экспериментальных данных предложены формулы расчета напряжения возникновения разряда в воздушных промежутках 0.1-2 мм при атмосферном давлении в условиях однородного и неоднородного распределений электрического поля.

3. Экспериментально установлено, что смена полярности металлического электрода с отрицательной на положительную приводит к существенному увеличению амплитуды разрядного тока (в 2-12 раз) и величины накопленного поверхностного заряда (в 3-8 раз).

4. Показано, что в условиях неоднородного поля при увеличении длины воздушного промежутка выше критического значения  $d_{кр}$  для положительной полярности иглы ( $d_{кр} \sim 1.5$  мм) наблюдается переход от одиночного стримерного механизма развития к режиму вспышечной короны, для отрицательной ( $d_{кр} \sim 0.9$  мм) – от одиночного импульса Тричела к серии импульсов.

5. Для условий, когда размер воздушного промежутка меньше размера генерационной зоны отрицательной короны (~ 90 мкм) наблюдается аномально высокая интенсивность разряда, обусловленная сквозным проращением стримера в межэлектродном промежутке.

#### **Методология и методы исследования.**

Исследования одиночного барьерного разряда в условиях однородного и неоднородного полей проводились в системах «шар – воздушный зазор – полимерный барьер – плоскость» и «игла – воздушный зазор – полимерный барьер – плоскость» соответственно, при этом барьер располагался непосредственно на поверхности плоского электрода. Размер воздушного промежутка варьировался в пределах 0-2 мм. Разработанная методика и аппаратно-программный комплекс обеспечивали надежное измерение основных электрофизических характеристик БР: напряжения возникновения разряда в интервале  $\pm 5$  кВ, разрядного тока (0.2-5000 мА) и прошедшего в цепи заряда (0.001-100 нКл) в диапазоне 1 нс – 500 мкс, а также распределения

накапливаемого поверхностного заряда с пространственной и зарядовой разрешающей способностью  $\sim 0.5 \text{ мм}^2$  и  $\sim 1 \text{ пКл}$  соответственно. Чувствительность зондовой методики была повышена с помощью программного обеспечения для обработки экспериментальных данных на основе метода регуляризации Тихонова. Расчет распределений напряженности и потенциала электрического поля, необходимых для решения задач исследования, проводился с использованием численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментального исследования одиночного барьерного разряда в воздушных субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении в условиях однородного и неоднородного распределений внешнего поля.

2. В воздушных промежутках 0.1-2 мм в условиях атмосферного давления:

- при однородном распределении поля разряд развивается по стримерному механизму;
- при неоднородном распределении поля для отрицательной полярности иглы наблюдается режим тричельной короны, для положительной полярности иглы в зависимости от размера межэлектродного зазора – стримерный механизм или режим вспышечной короны.

3. Экспериментально определенная форма радиального сечения распределения поверхностного заряда после первого разряда удовлетворительно описывается функцией Гаусса, а формы сечений последующих зарядов – суперпозицией указанных функций.

4. Поверхностный заряд, накапливаемый в процессе развития барьерного разряда, определяет локализацию развития последующих разрядов.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационной работы были использованы в ЗАО «Полимер-аппарат» г. СПб при разработке высоковольтного оборудования, а также в учебном процессе кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» ФГАОУ ВО «СПбПУ» для студентов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». (*Акты использования прилагаются к диссертации*).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием быстродействующей аппаратуры, особым вниманием к измерительным цепям, тщательной калибровкой измерительных устройств, большим количеством экспериментов и их корректной статистической обработкой.

**Личный вклад автора** определяется участием в постановке задач исследования, разработке и создании экспериментальных установок и методик измерения, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе полученных данных. Основные результаты работы получены автором лично. В процессе работы автор пользовался консультациями к.т.н. П.Н. Бондаренко.

**Апробация полученных результатов.** Результаты диссертационной работы обсуждались на 2013 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Shenzhen, 2013 г.), XLII, XXXIX и XXXVIII научно-практических конференциях с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013, 2010 и 2009 гг.), International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering «Diagnostika '13» (Pilsen, 2013 г.), XVI и XIV Всероссийских научно-методических конференциях «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» (Санкт-Петербург, 2012 и 2010 гг.), XII Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики – 2011) (Санкт-Петербург, 2011 г.), 18th International Conference on Dielectric and Insulating Systems in Electrical Engineering «DISEE 2010» (Bratislava, 2010 г.), V Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010» (Санкт-Петербург, 2010 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базе Scopus, а также 1 учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 179 наименований, и четырех приложений. Диссертация изложена на 177 страницах, содержит 55 рисунков и 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, определены цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также отмечены степень достоверности и апробация полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены возможные режимы существования БР, представлены современные результаты экспериментального исследования БР в коротких промежутках при атмосферном давлении, описаны основные модели развития БР. В следующем разделе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований поверхностного БР. Далее в исторической последовательности изложено развитие представлений о положительном и отрицательном коронных разрядах постоянного тока. Отдельное внимание уделено работам, посвященным исследованиям коронного разряда при наличии диэлектрического барьера в разрядном промежутке. В следующем разделе подробно рассмотрены современные представления о механизмах развития ЧР, дополнительно представлены общие сведения о ЧР – основные механизмы деградации полимерной изоляции под действием ЧР, методы измерения и распознавания ЧР. Далее описаны существующие методы измерения заряда на поверхности диэлектриков, отмечены работы, посвященные накапливаемому заряду в процессе развития БР (ЧР). В конце главы обсуждены вопросы, связанные с напряжением возникновения разряда в

условиях однородного и неоднородного полей: справедливость закона Пашена для малых промежутков в области высоких давлений; появление начального электрона, необходимого для инициации разряда; напряжения зажигания разряда и пробоя в системе «игла-плоскость».

**Во второй главе** представлено описание разработанной методики для экспериментального исследования БР, в основе которой лежало прямое измерение основных электрических характеристик разряда: напряжения возникновения разряда; разрядного импульса тока; заряда, протекшего в цепи во время разряда; пространственного распределения поверхностной плотности заряда, накапливающегося на поверхности диэлектрического барьера.

Измерения проводились в лабораторных условиях с помощью экспериментальной установки (рисунок 1), включавшей в себя следующие элементы: высоковольтную часть, измерительную ячейку со сменной системой электродов, измерительные цепи, а также зондовую систему. Основные элементы установки находились внутри герметизированной испытательной камеры с контролируемой температурой ( $T$ ) и относительной влажностью воздуха ( $\varphi$ ). Измерительная ячейка представляла собой систему «верхний электрод – воздушный зазор – диэлектрический барьер – нижний электрод». Для создания однородного распределения поля в воздушном зазоре в качестве верхнего электрода использовался стальной шар диаметром 10 мм, для неоднородного – стальные сменные иглы с радиусом закругления 40 мкм. При этом коэффициенты неоднородности  $k_n$  при размерах воздушного зазора 0.1-1 мм составляли 1.001-1.089 и 2.6-14 для первого и второго случая электродов соответственно. В качестве барьера использовались полимерные пленки, широко применяемые в конденсаторостроении: полиэтилентерефталат (ПЭТФ) толщиной 100 мкм и полипропилен (ПП) толщиной 12 мкм. Благодаря использованным техническим решениям удалось добиться малых значений паразитных параметров измерительной цепи (индуктивность менее 3 нГн, емкость менее 2 пФ).

Разрядный импульс тока определялся по изменению напряжения на низкоомном шунте  $R$ ,

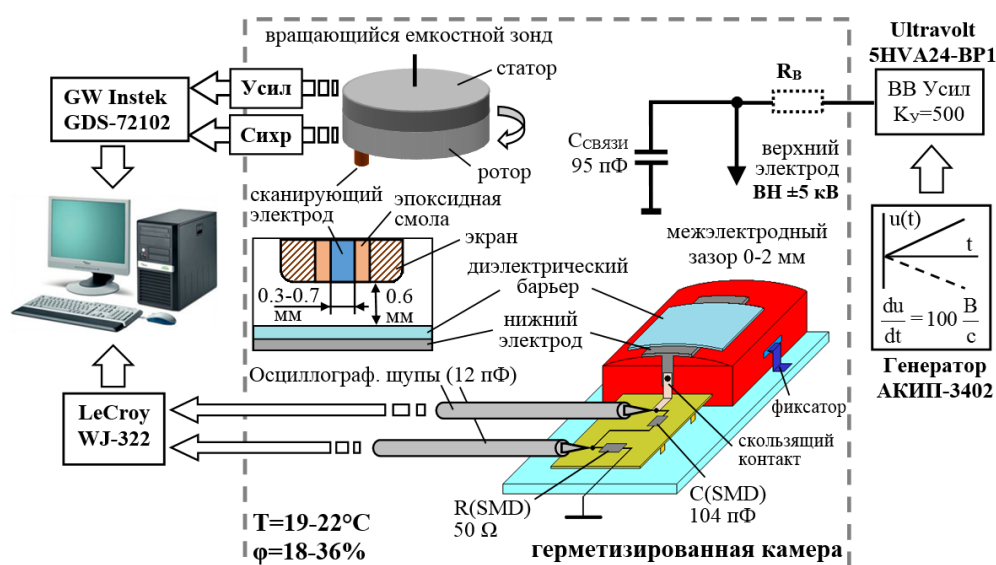


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

подключенном к нижнему электроду. Протекающий в цепи заряд  $q$  оценивался по величине изменения напряжения на малоиндуктивной емкости  $C$ , подключенной к нижнему электроду последовательно с шунтом. Значение напряжения на вышеупомянутых элементах регистрировалось



с помощью осциллографа LeCroy WaveJet-322 (2 ГВыб/с). Максимальная чувствительность метода регистрации тока – 0.2 мА, прошедшего в цепи заряда – 1 пКл. Для измерения поверхностного заряда был сконструирован емкостной вращающийся зонд, измерительная часть которого состояла из сканирующего электрода – медной эмалированной проволоки диаметром 0.3-0.7 мм и экрана – латунной трубки с внешним диаметром 4 мм.

При малом масштабе изменения плотности исследуемого поверхностного заряда по отношению к геометрическим размерам зонда, исследуемая картина заряда будет искажена еще на этапе сканирования за счет интегрирующего эффекта аппаратной функции зонда. В общем случае связь между исследуемым «истинным» распределением заряда  $\sigma_{\text{ист}}(x,y)$  и откликом прибора  $u(x,y)$  – наведенным на зонде потенциалом, описывается двумерным интегральным уравнением Фредгольма I рода типа свертки. Наиболее эффективный и устойчивый алгоритм решения данного уравнения дает метод регуляризации Тихонова. Ядро уравнения Фредгольма I рода, в рассматриваемом случае – аппаратная функция измерительного устройства, определялось с использованием численного моделирования. Для этого в пакете Comsol Multiphysics была создана 3D-модель, имитирующая процесс сканирования заряда с учетом реальных размеров измерительной ячейки и зондовой структуры. Для демонстрации эффективности данного подхода на рисунке 2 совместно с максимальным профилем сечения искомого распределения  $\sigma_{\text{ист}}(x,y)$  – симметричной двумерной функции Гаусса, представлены профили вещественной части регуляризованного решения  $\sigma_{\alpha}(x',y')$ , рассчитанного при трех различных значениях параметра регуляризации  $\alpha$  на основе отклика зонда  $u(x,y)$  с внесенной случайной 5% относительной погрешностью. Так для данного примера при  $\alpha_2=10^{-13.2}$  получается устойчивое решение с удовлетворительным разрешением.

Последний раздел главы посвящен исследованию пробоя в однородном поле между металлическими электродами в системе «шар-плоскость» с целью проверки применимости закона Пашена в субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении. Контроль получаемых значений  $U_{\text{пр}}$  проводился с помощью разрядной ячейки с латунными электродами Роговского диаметром 36 мм. На основании экспериментальных данных предложены уточненные значения констант, фигурирующих в традиционной форме записи закона Пашена.

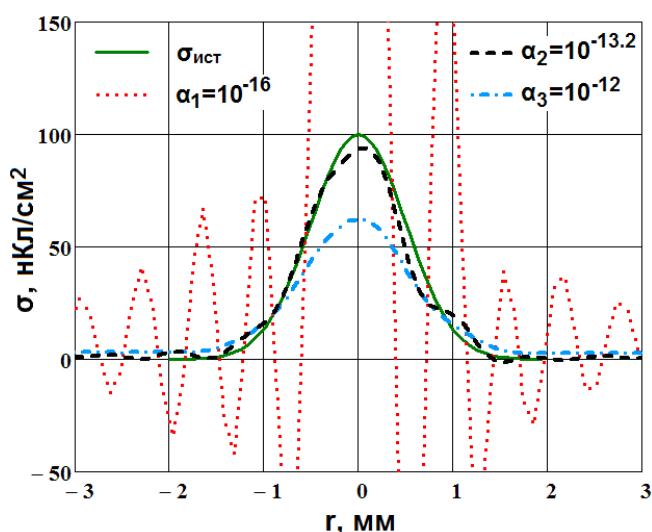
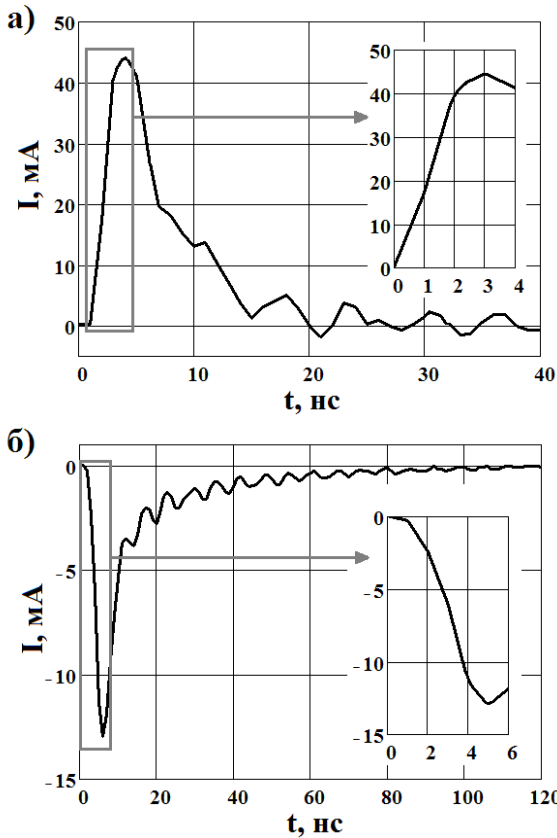


Рисунок 2 – Радиальные профили сечения «истинного» распределения заряда  $\sigma_{\text{ист}}(x,y)$  и вещественной части регуляризованного решения  $\sigma_{\alpha}(x',y')$  при  $\alpha_1=10^{-16}$ ,  $\alpha_2=10^{-13.2}$ ,  $\alpha_3=10^{-12}$

шнена в субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении. Контроль получаемых значений  $U_{\text{пр}}$  проводился с помощью разрядной ячейки с латунными электродами Роговского диаметром 36 мм. На основании экспериментальных данных предложены уточненные значения констант, фигурирующих в традиционной форме записи закона Пашена.

**Третья глава** содержит результаты экспериментального исследования БР в условиях однородного поля. Выявлено, что напряжение пробоя субмиллиметровых воздушных зазоров слабо зависит от наличия диэлектрического



а – шар (+), барьер на катоде,  $U_{\text{ПР}}=2490$  В;  
 б – шар (-), барьер на аноде,  $U_{\text{ПР}}=2270$  В  
 Рисунок 3 – Осциллограммы импульса тока БР в условиях однородного поля ( $d = 0.03$  см, барьер – ПЭТФ 100 мкм)

десятков нКл. Характерный пространственный масштаб поверхностного заряда  $\sim$  на 0.5-1.5 порядка превышает межэлектродное расстояние. Измеренные распределения поверхностной плотности заряда удовлетворительно описываются модельной двумерной функцией Гаусса. В таблице 1 представлены средние значения основных параметров накопленного заряда ( $Q$  – величина заряда;  $\sigma_{\text{МАХ}}$  – максимальная плотность заряда;  $r_3$  – радиус пятна заряда, определяемый как средний радиус изолинии, соответствующей 1%  $\sigma_{\text{МАХ}}$ ;  $s$  – стандартное отклонение аппроксимирующей функции Гаусса) для случаев диэлектрика на катоде или аноде. Из таблицы 1 видно, что усиление тока разряда при смене полярности шара обуславливает увеличение накопленного заряда  $\sim$  в 3-5 раз.

Таблица 1 – Основные параметры распределения накопленного поверхностного заряда (система «шар-плоскость», барьер – ПЭТФ 100 мкм).

Диэлектрик	$d$ , см	$U_{\text{ПР}}$ , В	$Q$ , нКл	$\sigma_{\text{МАХ}}$ , нКл/см <sup>2</sup>	$r_3$ , см	$s$ , см
Катод	0.01	1413	13.9	44.9	0.5	0.22
	0.03	2552	31	66.2	0.63	0.27
	0.05	3326	37.5	79.6	0.68	0.27
	0.1	5538	68.6	122.6	0.76	0.30
Анод	0.01	1200	1.8	35.3	0.25	0.09
	0.03	2274	5.8	53.7	0.36	0.13
	0.05	3036	8.2	64.3	0.37	0.14
	0.1	4917	15.1	92.2	0.42	0.16

барьера и полярности напряжения (когда  $\epsilon_{\text{Б}}/d_{\text{Б}} > 1/d$ , где  $\epsilon_{\text{Б}}$ ,  $d_{\text{Б}}$  – диэлектрическая проницаемость и толщина барьера,  $d$  – размер воздушного зазора). На основании экспериментальных данных предложена формула расчета пробивного напряжения воздушных промежутков  $d$  в диапазоне 0.01-0.2 см:

$$U_{\text{ПР}}(d) = \frac{251 \cdot pd}{\ln(pd) - 0.68}, \text{ где } p \text{ – давление, торр. Дан-}$$

ная формула соответствует традиционной записи закона Пашена с уточненными значениями констант.

Экспериментально установлено, что смена полярности шара с отрицательной на положительную приводит к двух-четырёхкратному усилению разрядного тока при сопоставимом уровне пробивного напряжения. В качестве иллюстрации на рисунке 3 представлены осциллограммы тока БР для обеих полярностей приложенного напряжения. При развитии БР в субмиллиметровых промежутках на поверхности барьера накапливается заряд порядка единиц-

Переход к стримерному механизму обусловлен образованием плазмы вследствие перекрытия головки электронов лавины и ионного следа. При этом поле пространственных зарядов лавины  $E_{л}$  становится сопоставимым с внешним  $E_{в}$ , число электронов в головке лавины  $N_e$  достигает критического значения ( $\sim 10^8$ ), что соответствует известным эмпирическим критериям Мика и Леба. В нашем случае ( $pd = 7.6-76$  торр·см), предполагая, что единственный начальный электрон появился около катода, рассчитанные значения  $N_e$  лавины, достигшей анода, составляют  $\sim 10^7-10^8$ . Электрическое поле, создаваемое электронами головки лавины, определялось на основе соотношения:

$$E_{л}(x) = eN_e(x) / [4\pi\epsilon_0(r(x))^2], \quad (1)$$

где  $e$  – элементарный заряд,  $x$  – пройденное лавиной расстояние,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $N_e(x)$  – число электронов в головке лавины на пути  $x$ . В качестве  $r(x)$  использовался наибольший из диффузионного или электростатического радиусов расширения головки лавины, при этом максимально возможный радиус  $\approx 1/(\alpha-\eta)$ , где  $\alpha$  и  $\eta$  – коэффициенты ударной ионизации и прилипания соответственно. Выполненные расчеты показывают, что условие  $E_{л} \approx E_{в}$  выполняется при проходе одной лавиной пути порядка или меньше  $d$ . Кроме того, результаты измерения  $U_{пр}$  демонстрируют, что при медленном подъеме испытательного напряжения  $\sim 100$  В/с пробой происходит при значительном перенапряжении  $\sim 20-40\%$  относительно значений, рассчитанных по закону Пашена с использованием общепринятых значений констант. Вместе с тем известно, что уже небольшое ( $\sim 10\%$ ) перенапряжение может привести к возникновению стримера в промежутках, характеризующихся таунсендовским механизмом при статическом напряжении пробоя. Таким образом, можно заключить, что пробой в исследованных зазорах определяется стримерным механизмом развития.

**Четвертая глава** содержит результаты исследования БР в условиях неоднородного поля. На рисунке 4 представлена экспериментальная зависимость напряжения возникновения барьерного разряда  $U_{вр}$  в зависимости от размера воздушного промежутка  $d$  в диапазоне 0.1-1 мм при атмосферном давлении. На графике присутствует явное преобладание  $U_{вр}$  при положительной полярности иглы над  $U_{вр}$  при отрицательной полярности (на 25-35%). Отмеченная тенденция прямо противоположна известным закономерностям пробоя в неоднородных полях для относительно больших промежутков (1 см и более). Смена полярности иглы с отрицательной на положительную приводит к усилению разрядного процесса (рисунок 5). В зависимости от полярности иглы, величины приложенного напряжения и внешнего сопротивления на поверхности барьера накап-

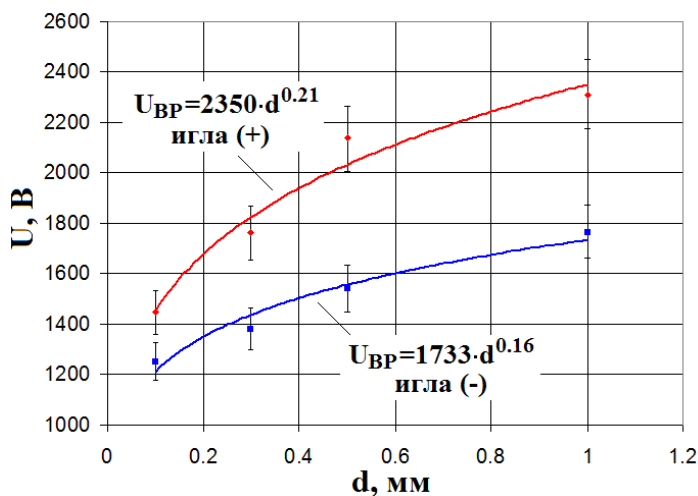
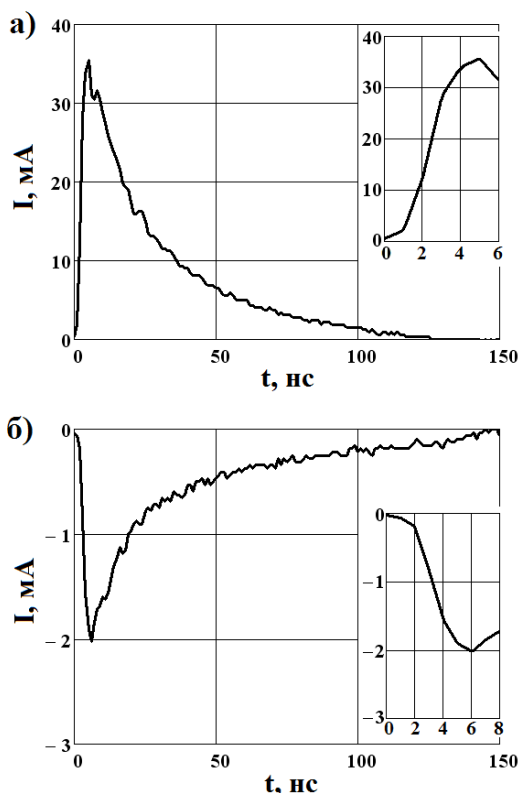


Рисунок 4 – Зависимость напряжений возникновения разряда  $U_{вр}$  от размера воздушного промежутка  $d$  (барьер ПЭТФ 100 мкм)

лярности иглы над  $U_{вр}$  при отрицательной полярности (на 25-35%). Отмеченная тенденция прямо противоположна известным закономерностям пробоя в неоднородных полях для относительно больших промежутков (1 см и более). Смена полярности иглы с отрицательной на положительную приводит к усилению разрядного процесса (рисунок 5). В зависимости от полярности иглы, величины приложенного напряжения и внешнего сопротивления на поверхности барьера накап-



а – игла (+), барьер на катоде,  $U_{ВР}=1740$  В;  
 б – игла (-), барьер на аноде,  $U_{ВР}=1120$  В  
 Рисунок 5 – Осциллограммы импульса  
 тока БР ( $d=0.3$  мм, барьер –  
 ПЭТФ 100 мкм,  $R_{В}=0$ )

напряжения. Радиальные профили сечения накопленного заряда в случае БР и ПБР отличаются незначительно. Таким образом, можно заключить, что основная часть токового импульса БР определяется поверхностной стадией разряда.

Наиболее вероятным механизмом появления начального электрона в случае положительной полярности иглы и субмиллиметрового размера промежутка является отрыв электрона от отрицательного атмосферного иона при соударении с нейтральным атомом или молекулой. Необходимую для этого энергию ион может набрать на длине свободного пробега, если внешнее

ливается заряд порядка сотых-единиц нКл. В таблице 2 представлены усредненные результаты измерений и расчетов в отсутствии внешнего ограничения тока для обеих полярностей иглы (где  $I_{МАХ}$  – амплитуда разрядного тока,  $d=0$  мм соответствуют расположению иглы на поверхности барьера – поверхностный БР). Экспериментально определено, что импульсы тока в случаях БР (при  $d=0.1$  мм) и поверхностного БР (ПБР) близки друг другу: амплитуда составила около 30 мА, а длительность  $\sim 100$  нс. Эти результаты легко объясняются, если рассматривать прорастание стримера до поверхности барьера, как касание иглой указанной поверхности. После достижения стримером диэлектрика инициируется развитие поверхностного разряда, как и в случае ПБР. Дальнейшее развитие процесса и его затухание в обоих случаях определяется поверхностными свойствами барьера и величиной приложенного

Таблица 2 – Усредненные результаты измерений и расчетов в отсутствии внешнего ограничения тока (система «игла-плоскость», барьер – ПЭТФ 100 мкм).

Полярность иглы	$d$ , мм	$U_{ВР}$ , В	$I_{МАХ}$ , мА	$Q$ , нКл	$\sigma_{МАХ}$ , нКл/см <sup>2</sup>	$r_3$ , мм
+	0	1325	33	0.64	32.7	1.55
	0.1	1445	51	0.92	37.1	1.65
	0.3	1760	54	1.35	44.5	1.85
	0.5	2135	79	2.34	53.9	2.50
	1	2310	34	1.38	41.5	2.10
-	0	1030	4	0.05	15.0	0.80
	0.1	1250	29	0.26	19.2	1.40
	0.3	1380	5.6	0.20	22.8	1.30
	0.5	1540	7.6	0.29	24.9	1.45
	1	1765	Первый имп. - 2.8 Последующие имп. - <1.5	0.31	10.3	1.90

поле будет превышать  $\sim 40$  кВ/см. В нашем случае при  $U_{ВР}$  указанное условие выполняется на расстоянии  $\sim 100$  мкм от иглы. Проведенные оценки показывают, что в условиях эксперимента при подвижности  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с) десятки-сотни отрицательных ионов будут втягиваться в область высокого поля под действием кулоновских сил за времена порядка нескольких миллисекунд, несмотря на малую величину их концентрации. Расчет по формуле (1) показал, что для любого исследуемого межэлектродного зазора число электронов резко увеличивается в конце пути на отрезке  $\sim 15$  мкм. При этом поле головки электронов в непосредственной близости у анода становится сопоставимым с внешним  $E_{Л} \approx E_{В}$ , т.е. достигается критерий перехода лавины в стример. В пользу данного утверждения следует привести дополнительные аргументы:

1) Прорастающий катоднонаправленный стример можно рассматривать как своеобразное продолжение иглы. Величина максимальной напряженности поля на кончике иглы в момент начала разряда  $\sim 300$ -400 кВ/см (рисунок 6) близка к литературным данным численного моделирования напряженности поля на фронте положительных стримеров  $\sim 300$ -350 кВ/см;

2) Для любого исследуемого промежутка на всей его длине напряженность поля превышает пороговое значение для распространения катоднонаправленного стримера  $\sim 4.7$  кВ/см (рисунок 6).

В свою очередь, при отрицательной полярности иглы, по всей видимости, мы имеем дело с формированием импульса Тричела. При характерной амплитуде импульса тока  $\sim$  нескольких мА его резкий рост происходит за  $\sim 2$ -5 нс после предварительного слабого нарастания в течение нескольких нс. Дальнейший рост импульса тока соответствует развитию катоднонаправленной волны ионизации в генерационной зоне короны, которая может составлять десятки-сотни микрон в зависимости от острейности электрода и величины межэлектродного расстояния. Спад импульса соответствует режиму выноса ионов из разрядного промежутка на электроды. В нашем случае для  $d=0.1$  мм наблюдались относительно большие значения амплитуды разрядного тока (29 мА, см. таблицу 2). Дополнительные эксперименты, проведенные для  $d=0.03$ -0.13 мм, продемонстрировали изменение  $I_{МАХ}$  в диапазоне 3-35 мА, при этом максимальное значение соответствовало за-

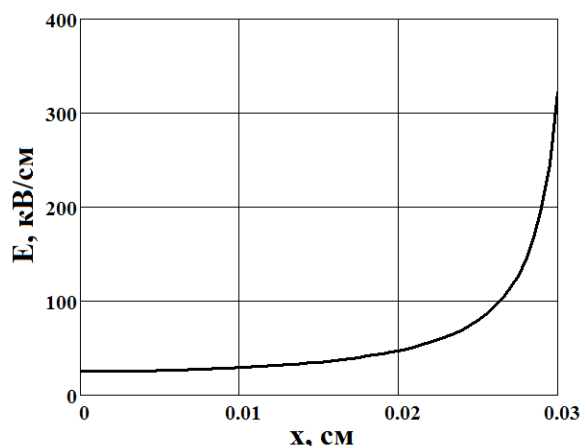


Рисунок 6 – Распределение напряженности поля вдоль осевой линии в момент возникновения разряда («+игла-плоскость»,  $d=0.3$  мм,  $U_{ВР}=1740$  В, барьер – ПЭТФ 100 мкм)

зору 0.09 мм. По всей видимости, данное межэлектродное расстояние соответствует размеру генерационной зоны короны, при этом сквозное прорастание стримера в данной зоне обуславливает столь большие величины тока.

При неоднородном распределении электрического поля в воздушном промежутке БР (ЧР) может иметь как одноимпульсную, так и многоимпульсную форму. Данный факт может послужить причиной некорректного определения характеристик серии ЧР измерительными устройствами, поскольку

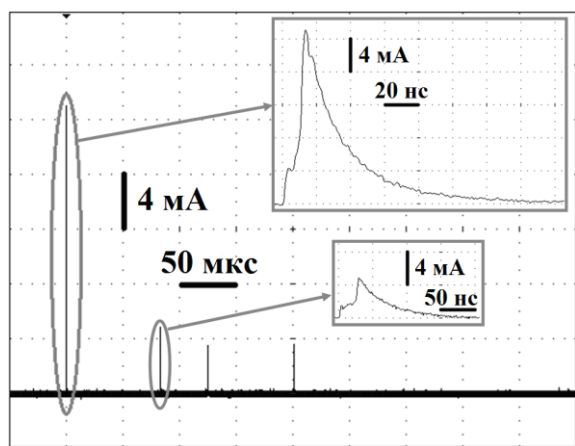


Рисунок 7 – Игла (+), режим вспышечной короны ( $d=2$  мм,  $U_{ВР}=3440$  В, барьер – ПЭТФ 100 мкм,  $R_B=0.5$  МОм)

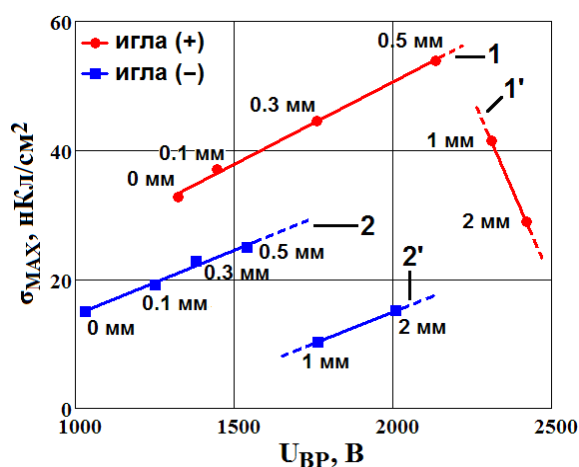


Рисунок 8 – Зависимость максимальной плотности заряда  $\sigma_{\text{МАХ}}$  от величины напряжения возникновения разряда  $U_{ВР}$

В практических целях БР (как и ЧР) развиваются вследствие воздействия переменного напряжения (50 Гц – 1 ГГц). В данных условиях большой интерес представляет кинетика периодической перезарядки поверхности барьера. Для исследования последовательного развития БР к разрядному промежутку прикладывался один цикл пилообразного напряжения (рисунок 9). В связи с проведением измерений поверхностного заряда с помощью вращающегося зонда длительность цикла  $T$  составила 10 мин. С одной стороны, указанное время намного меньше времени релаксации заряда на полимерном барьере. С другой стороны,  $T$  значительно превышает время рекомбинации плазмы, образованной в результате развития

традиционно считается, что каждый импульс тока соответствует отдельному локальному дефекту с конкретными геометрическими размерами. Режим одиночного импульса при отрицательной полярности наблюдался до  $d_{\text{КР}} \sim 0.9$  мм. В больших промежутках после первого импульса разрядного тока величины встречного «запирающего» поля накопленного поверхностного заряда было недостаточно для прекращения последующих разрядов, и в системе развивалась затухающая серия импульсов Тричела. Для положительной полярности иглы при  $d > d_{\text{КР}} \sim 1.5$  мм также наблюдалось появление вторичных импульсов при уменьшении амплитуды тока в несколько раз. Данная многоимпульсная форма разряда (рисунок 7) соответствует т.н. вспышечной короне («burst corona»). Выявленные линейные зависимости  $\sigma_{\text{МАХ}}$  от  $U_{ВР}$  (рисунок 8) явно демонстрируют изменение механизма разряда при размере промежутка 0.5-1 мм: переход от стримерного режима (1) к вспышечной короне (1') при положительной полярности иглы и от одиночного импульса Тричела (2) к серии импульсов (2') при отрицательной полярности.

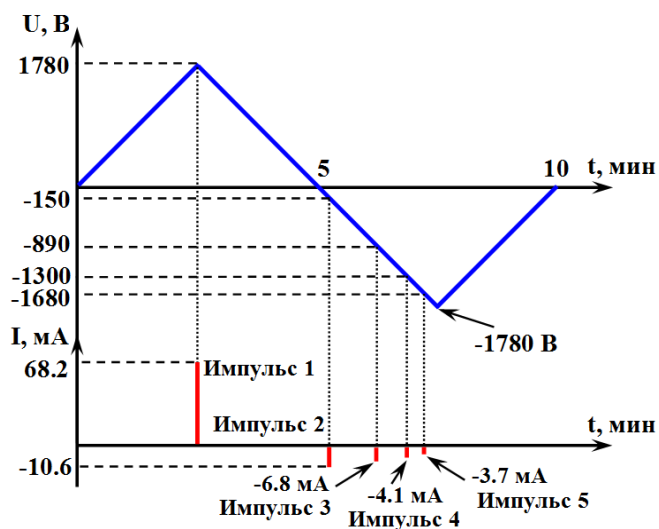
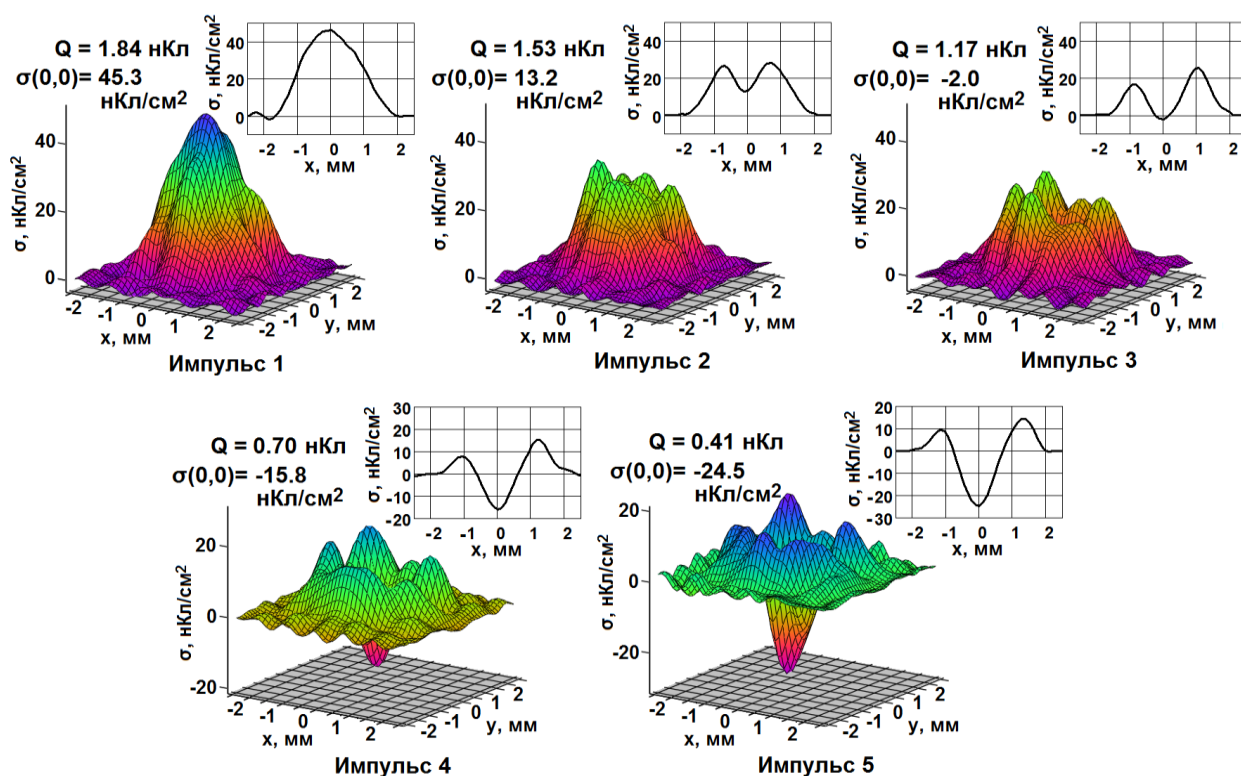


Рисунок 9 – Последовательное развитие разрядов в течение одного цикла пилообразного напряжения ( $d=0.3$  мм, барьер ПЭТФ 100 мкм)



предыдущего разряда, или характерного времени диффузии ионов. Таким образом, каждый последующий разряд будет определяться суперпозицией внешнего поля и поля поверхностного заряда от предыдущего разряда. Последовательное изменение распределения заряда на поверхности барьера в результате развития серии разрядов представлено на рисунке 10. Данные распределения заряда наглядно демонстрируют пространственный эффект памяти БР. Полученный результат является аргументом в пользу традиционного мнения об определяющей роли поверхностного заряда для эффекта памяти. В течение цикла приложенного напряжения величина поверхностного заряда изменилась от 1.84 нКл до 0.41 нКл. Форма радиального профиля сечения первого поверхностного заряда может быть аппроксимирована функцией Гаусса, в остальных случаях – суперпозицией положительной и отрицательной функций Гаусса. На отрицательном полупериоде в момент возникновения каждого из разрядов напряженность поля на кончике иглы составляла  $\sim -285$  кВ/см. Данное обстоятельство позволило прогнозировать напряжение возникновения последующего разряда, учитывая измеренное распределение поверхностной плотности заряда, накопленного в результате развития предыдущего разряда. Кроме того, полученные результаты работы могут быть использованы для моделирования развития серии импульсов БР (ЧР), распознавания типов разряда, а также в области плазмохимической обработки поверхности полимерных материалов для оптимизации производственного процесса.



На вставках представлены радиальные профили сечения поверхностного заряда  
 Рисунок 10 – Последовательное изменение распределения заряда на поверхности барьера ПЭТФ 100 мкм (соответствует рисунку 9)

### **Основные выводы и результаты работы:**

1. Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс для измерения основных электрофизических характеристик барьерного разряда, развивающегося в субмиллиметровых промежутках. Программно-аппаратный комплекс обеспечивает измерение напряжения возникновения разряда в интервале  $\pm 5$  кВ, временную регистрацию разрядного тока (0.2-5000 мА), прошедшего в цепи заряда (0.001-100 нКл) в диапазоне 1 нс – 500 мкс, а также измерение распределения накапливаемого поверхностного заряда с пространственной и зарядовой разрешающей способностью  $\sim 0.5$  мм<sup>2</sup> и  $\sim 1$  пКл соответственно. Чувствительность зондовой методики была повышена с помощью разработанного программного обеспечения для обработки экспериментальных данных на основе метода регуляризации Тихонова.

2. **В условиях однородного поля** для воздушных промежутков 0.1-2 мм разряд возникает при значительных перенапряжениях  $\sim 20$ -40% относительно значений, рассчитанных по закону Пашена, предложена формула расчета пробивного напряжения. Проведенные оценки указывают на стримерный механизм пробоя промежутка. При дальнейшем развитии барьерного разряда на поверхности барьера накапливается заряд порядка единиц-десятков нКл при амплитудах разрядного тока порядка десятых-единиц ампер. Смена полярности шара с отрицательной на положительную приводит к увеличению амплитуды разрядного тока ( $\sim$  в 2-4 раза) и величины накопленного поверхностного заряда ( $\sim$  в 3-5 раз) при сопоставимом уровне пробивного напряжения, что связано с отличием в развитии положительного и отрицательного поверхностных стримеров.

3. **В условиях неоднородного поля** для воздушных промежутков 0.1-1 мм напряжение возникновения разряда при положительной полярности иглы на 25-35% превышает соответствующее значение для отрицательной полярности. При этом измеренные значения не зависят от типа материала барьера, его полярности и толщины. В процессе разряда на поверхности барьера накапливается заряд порядка сотых-единиц нКл. Смена полярности иглы с отрицательной на положительную также приводит к многократному увеличению амплитуды разрядного тока ( $\sim$  в 2-12 раз) и величины накопленного поверхностного заряда ( $\sim$  в 3-8 раз). Для положительной полярности иглы экспериментальные значения амплитуды импульсов разрядного тока с фронтом  $\sim 3$ -5 нс лежат в пределах 20-80 мА. Выполненные оценки свидетельствуют о стримерном механизме развития разряда. Для отрицательной полярности значения амплитуды разрядного тока, достигаемые за  $\sim 2$ -5 нс, лежат в пределах 2-8 мА, что соответствует развитию импульса Тричела. В условиях, когда размер воздушного промежутка меньше размера генерационной зоны отрицательной короны ( $\sim 90$  мкм), наблюдается аномально высокая интенсивность разряда, обусловленная сквозным проращением стримера в межэлектродном промежутке.

4. **В условиях неоднородного поля** для обеих полярностей иглы режим одиночного импульса тока разряда наблюдается до определенного межэлектродного расстояния  $d_{кр}$ . В случае



превышения  $d_{кр}$  для положительной полярности иглы наблюдается режим вспышечной короны, а для отрицательной – развитие затухающей серии импульсов Тричела. Это обусловлено недостаточностью запирающего действия встречного поля поверхностного заряда от первого импульса тока для прекращения последующих импульсов.

5. Результаты исследования последовательного развития БР демонстрируют существование пространственного эффекта памяти, обуславливаемого влиянием остаточного поверхностного заряда. Форма радиального сечения распределения поверхностного заряда после первого разряда удовлетворительно описывается функцией Гаусса, а формы сечений последующих зарядов – суперпозицией указанных функций.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Бондаренко, П.Н. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, М.В. Шемет // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 8. – С. 21-29. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
2. Бондаренко, П.Н. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Однородное поле / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, М.В. Шемет // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 6. – С. 51-59. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
3. Емельянов, О.А. Методика и аппаратно-программный комплекс для измерений электрофизических параметров барьерного разряда / О.А. Емельянов, М.В. Шемет // Измерительная техника. – 2014. – № 6. – С. 46-50. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
4. Emelyanov, O.A. Single dielectric barrier discharge characteristics in needle-to-plane configuration / O.A. Emelyanov, M.V. Shemet // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2014. – Vol. 47, 315201. – P. 1-8. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
5. Belko, V. A study of nanosecond arcsurface flashover in metallized polymer films / V. Belko, O. Emelyanov, M. Shemet // 2013 IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena : annual rep. of int. conf. – Shenzhen, October 2013. – Vol. 1. – P. 476-477. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
6. Bondarenko, P. Single filament partial discharge: Surface charge accumulation / P. Bondarenko, O. Emelyanov, M. Shemet // 2013 IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena : annual rep. of int. conf. – Shenzhen, October 2013. – Vol. 2. – P. 936-938. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе Scopus)
7. Ключко, П.И. Экспериментальное исследование одно- и многоимпульсного режимов развития частичного разряда в условиях неоднородного поля / П.И. Ключко, М.В. Шемет // XLII Неделя

науки СПбГПУ : мат-лы науч.-практ. конф. с международным участием. – Санкт-Петербург, Декабрь 2013. – Ч. 1. – С.16-18.

8. PD Series Prediction Based on Surface Charge Distribution Measuring by Matrix Method / P.N. Bondarenko, O.A. Emelyanov, A.P. Gorlov, J.V. Shabanov, M.V. Shemet, I.N. Sorokoletov // *Diagnostics in Electrical Engineering : proc. of int. conf.* – Pilsen, September 2013. – P. 152-155.

9. Прогнозирование следования ЧР / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, М.Р. Хабибуллин, М.В. Шемет // *Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2011) : мат-лы XII международной конф.* – Санкт-Петербург, Май 2011. – Т. 2. – С. 222-225.

10. Белько, В.О. Исследование перекрытий микрозазоров между электродами, напыленными на полимерные пленки / В.О. Белько, М.В. Шемет // *Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2011) : мат-лы XII международной конф.* – Санкт-Петербург, Май 2012. – Т. 1. – С. 219-221.

11. Емельянов, О.А. Причины систематического разброса напряжения зажигания барьерного разряда в условиях неоднородного поля / О.А. Емельянов, М.В. Шемет // *XXXIX Неделя Науки СПбГПУ : мат-лы международной науч.-практ. конф.* – Санкт-Петербург, Декабрь 2010. – Ч. 2. – С. 35-36.

12. Shemet, M. Investigation of the surface charge accumulated due to a nanosecond single barrier discharge in submillimeter air gaps / M. Shemet // *Dielectric and Insulating systems in Electrical Engineering (DISEE 2010) : proc. of 18<sup>th</sup> int. conf.* – Bratislava, September 2010. – P. 215-218.

13. Бондаренко, П.Н. Особенности оседания заряда на поверхности барьера в результате единичного разряда / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, М.В. Шемет // *Электрическая изоляция–2010 : сб. науч. тр. V международной науч.-техн. конф.* – Санкт-Петербург, Июнь 2010. – С. 125-127.

14. Анализ спектров ТСД пленок, заряженных в единичном наносекундном барьерном микроразряде / П.Н. Бондаренко, М.Э. Борисова, О.В. Галюков, О.А. Емельянов, М.В. Шемет // *Электрическая изоляция–2010 : сб. науч. тр. V международной науч.-техн. конф.* – Санкт-Петербург, Июнь 2010. – С. 292.

15. Шемет, М.В. Исследование напряжения возникновения единичного барьерного микроразряда / М.В. Шемет // *Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах : мат-лы XIV всероссийской науч.-метод. конф.* – Санкт-Петербург, Май 2010. – Т. 1. – С. 46-47.

16. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники. Часть 2: Исследование электрофизических процессов в системах конденсаторной изоляции: учеб.-метод. пособие / О.А. Емельянов, В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, М.В. Шемет. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 58 с.

17. Емельянов, О.А. Особенности развития барьерных микроразрядов в субмиллиметровых промежутках / О.А. Емельянов, М.В. Шемет // *XXXVIII Неделя Науки СПбГПУ : мат-лы международной науч.-практ. конф.* – Санкт-Петербург, Декабрь 2009. – Ч. 2. – С. 63-65.