

На правах рукописи

Панов Владислав Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ
В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.08 —
«Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАН
Сон Эдуард Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Акишев Юрий Семенович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
Начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы

Коробейников Сергей Миронович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Новосибирский государственный технический университет,
Заведующий кафедрой безопасности труда

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники Сибирского
отделения Российской академии наук

Защита состоится 21 марта 2018 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института высоких температур РАН и на сайте диссертационного совета по адресу www.jiht.ru/science/dissert-council.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.110.02.

Автореферат разослан DD mmmmmmmmm YYYU года.
Телефон для справок: +7 (495) 485-83-45.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02,
канд. физ.-мат. наук



Васильев М. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Импульсные электрические разряды успешно применяются в различных областях технологии, таких как очистка газов, воды и др.. Одним из направлений, где использование электроразрядных технологий может дать наибольший эффект является очистка подземных и промышленных сточных вод. Сточные воды промышленных предприятий во многих случаях содержат загрязнения, не поддающиеся удалению при помощи традиционных методов (биологической очистки, механического отстаивания и фильтрации). Значительную проблему представляет очистка сточных вод предприятий микроэлектронной промышленности, содержащих в больших концентрациях изопропиловый спирт и другие вещества.

Импульсный характер воздействия позволяет достигать существенно неравновесных условий в каналах разряда, при этом появляется возможность создания технологических процессов, которые не могут быть реализованы в стационарных условиях, так как требуют очень больших затрат энергии, высоких температур и т. д.. Существенным преимуществом таких неравновесных процессов является наработка активных радикалов, в том числе окислителей и ультрафиолетового излучения. При этом, недостаток окислителей при больших концентрациях вредных примесей может быть восполнен предварительной аэрацией воды обычным воздухом, что требует отдельного исследования физики разряда в двухфазных средах.

К настоящему времени наиболее детально исследован разряд в диэлектрических жидкостях, обладающих малой проводимостью. Значительно меньше внимания уделено исследованиям импульсных разрядов в жидкостях, обладающих значительной проводимостью, к которым относятся сточные воды промышленных предприятий. В связи с этим в качестве основного объекта исследования была выбрана вода, обладающая проводимостью на уровне 300 мкСм/см.

Другой актуальной задачей является исследование импульсного электрического разряда в многофазной среде. Она связана с необходимостью усовершенствования систем молниезащиты передающих линий, а также защиты электрических подстанций и оборудования от перенапряжений, возникающих при ударе и растекании тока молнии во влажном грунте. Решение этой проблемы особенно актуально в связи с массовым внедрением в энергетику информационных и управляющих систем на основе микроэлектроники и микропроцессорной техники на ее основе, имеющих повышенную чувствительность к возникающим перенапряжениям. Большое влияние на характер растекания импульсного тока оказывают состав и влажность грунта, которые определяют проводимость среды. Модели, используемые в настоящий момент для расчета параметров и конфигураций заземлителей, не учитывают в необходимой мере особенности развития плазменных каналов на заземляющих устройствах при возникновении разрядных процессов в грунте.

Для описания процессов развития разряда в жидкостях до сих пор нет единой теории, охватывающей всё многообразие процессов, наблюдаемых экспериментально. Значительное влияние на механизм разряда оказывают такие параметры, как проводимость жидкости, давление в среде, тип и полярность прикладываемого напряжения, длина межэлектродного промежутка, степень неоднородности электрического поля, наличие пузырьков газа и другие факторы. Обширный материал накоплен по импульсным наносекундным разрядам в чистых диэлектрических жидкостях в связи с их использованием в высоковольтном оборудовании. Предлагаются новые подходы к математическому моделированию таких разрядов, делаются попытки перейти от адаптации газовых моделей разряда

к формированию теории пробоя диэлектрических жидкостей. Однако значительно меньшее внимание было уделено процессам развития разряда в проводящих жидкостях. Хотя проводящие жидкости и обладают высокой импульсной прочностью, формирование пробоя в них возможно при более длительном импульсном воздействии (в области миллисекундных времен), который, как правило, связан с фазовыми переходами в жидкости. При этом возникает целый ряд вопросов, связанных с влиянием проводимости, степени неоднородности поля и других параметров на электрическую прочность и механизмы формирования разряда в такой среде.

Исследование развития электрического разряда в проводящих однофазных, двухфазных и многофазных средах позволит выяснить механизмы развития импульсных разрядов, необходимые для решения актуальных научно-технических задач.

Степень разработанности темы

Исследованию импульсных разрядов в жидкостях с повышенной проводимостью посвящено сравнительно небольшое число работ. Механизмы развития разряда в жидкости при миллисекундных временах в настоящее время практически не выяснены.

В области исследования и классификации разрядных явлений в диэлектрических жидкостях классическими стали работы коллективов под руководством В. С. Комелькова, положившие начало исследований в СССР [1; 2], O. Lesaint — современное состояние вопроса представлено в обзорной статье [3], В. Я. Ушакова — монографию [4] под его редакцией о разрядах в жидкостях можно считать наиболее полным и современным рассмотрением, включающим классификацию и физическое толкование ряда наблюдаемых явлений, а также их количественную оценку.

Область длинных промежутков с неоднородным электрическим полем изучена только в области больших перенапряжений, при которых наблюдается быстрый «стримерно-лидерный» механизм развития разряда. Однако можно заметить [5; 6], что при той же проводимости развитие разряда возможно при более низких значениях средней напряженности с заметно более низкими средними скоростями распространения канала разряда, что указывает на иной механизм развития. Начиная с первой половины двадцатого столетия данным исследованиям посвящено крайне мало работ. В них обсуждаются вопросы зависимости скорости роста канала разряда от проводимости, длины разрядного промежутка, время инициации разряда, проводится сравнительный анализ с диэлектрическими жидкостями, изучается влияние ионного состава растворов на основные параметры разряда. Основная часть исследований выполнена с короткими импульсами напряжения в микросекундном диапазоне. В [4] отмечается недостаток исследований разряда в жидкостях со значительной проводимостью и «электро-теплого механизма», следуя терминологии [4], как наиболее вероятного механизма развития разряда в таких жидкостях.

Целью данной работы является экспериментальное исследование импульсного электрического разряда в однофазных и двухфазных средах на основе воды и масла и определение механизмов его развития при воздействии импульсами напряжения большой длительности. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать динамику развития электрического разряда в проводящей воде при воздействии импульсами напряжения большой длительности;
- исследовать влияние добавок (изопропилового спирта) на механизм электрического разряда;

- исследовать влияние заранее созданных в объеме и на поверхности электродов микропузырьков газа на механизм развития электрического разряда в воде;
- исследовать влияние микропузырьков воздуха и элегаза на электрическую прочность трансформаторного масла при различном объемном газоисодержании;
- исследовать динамику развития электрического разряда в мокром песке;
- определить механизмы развития исследованных типов электрического разряд.

Научная новизна

1. Впервые проведены систематические измерения скорости распространения электрического разряда в проводящей воде (330 мкСм/см) и установлено её среднее значение ~ 5 м/с.
2. На основании проведенных измерений предложен механизм медленного «теплового» разряда в проводящей воде (35–330 мкСм/см), состоящий из пяти этапов: нагрев жидкости начальными токами проводимости у острия анода, взрывное вскипание и образование паровых пузырьков; ионизация пара внутри пузырьков, достигших критического размера; протекание тока в ионизованных областях; развитие тепловой неустойчивости и образование термически ионизованной плазмы; образование в плазменной области основного канала и его прораствание к катоду.
3. Впервые экспериментально показано, что при снижении проводимости воды до уровня 90 мкСм/см медленный «тепловой» механизм развития электрического разряда сменяется на быстрый «стримерно-лидерный» при перенапряжении более 2.8 .
4. Обнаружено, что в слабопроводящей воде (35 мкСм/см) при напряжениях близких к пробойному микропузырьки в объеме жидкости приводят к смене медленного «теплового» механизма со временем пробоя ~ 1.5 мс на быстрый «стримерно-лидерный» с характерным временем пробоя 15–20 мкс при том же напряжении.
5. Показано, что развитие разряда во влажном песке, как и в проводящей воде, связано с развитием тепловой неустойчивости вблизи высоковольтного электрода, которая приводит к контракции тока и формированию плазменного канала. Предложен новый метод определения величины критической напряженности электрического поля образования и развития плазменного канала во влажном грунте, основанный на анализе вида динамических вольт-амперных характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе исследованы основные стадии развития импульсного миллисекундного электрического разряда в однофазных и двухфазных проводящих средах, 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 и гранулированных песчаных 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.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные данные о динамике «теплового» импульсного электрического разряда в проводящей воде (90–330 мкСм/см) при напряжениях, близких к пробойному, со средней скоростью распространения канала около 5 м/с.

2. Механизм развития медленного «теплового» электрического разряда в воде, включающий следующие этапы: а) интенсивный нагрев жидкости начальными токами проводимости, приводящий к локальному взрывному вскипанию; б) ионизация пара внутри образовавшихся пузырьков после достижения ими критического размера; в) протекание тока по областям с повышенной в результате ионизации проводимостью; г) развитие тепловой неустойчивости в областях с высокой плотностью тока и образование термически ионизованной плазмы; д) образование основного канала разряда из плазменной области и его дальнейший рост до замыкания промежутка.
3. Обнаруженный переход от медленного «теплового» механизма развития разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см к быстрому «стримерно-лидерному» с высокой скоростью распространения разрядного канала (до 7 км/с), при перенапряжении более 2.8 .
4. Экспериментальные данные о влиянии коэффициента поверхностного натяжения в смеси «вода-изопропиловый спирт» на «тепловой» механизм развития разряда, выражающемся в уменьшении времени роста начальной парогововой области до критического размера и уменьшении общего времени развития разряда при уменьшении величины коэффициента.
5. Экспериментальные данные о влиянии микропузырьков на поверхности электродов и в объёме воды на динамику и механизм развития электрического разряда.
6. Экспериментальные данные о величине снижения пробойного напряжения в смесях трансформаторного масла с пузырьками воздуха и элегаза.
7. Экспериментальные данные о развитии разряда во влажном песке и механизм формирования плазменного канала при возникновении тепловой неустойчивости вблизи высоковольтного электрода. Метод определения величины критической напряженности электрического поля образования и развития плазменного канала во влажном грунте.

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 работы

Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях:

1. 55-я научная конференция МФТИ, 19–25 ноября, 2012, Долгопрудный
2. 56-я научная конференция МФТИ, 25–30 ноября, 2013, Долгопрудный
3. 58-я научная конференция МФТИ, 23–28 ноября, 2015, Долгопрудный
4. 11-й Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах», 1–12 августа, 2013, Новый Афон
5. 2-я Всероссийская научная конференция «Механика наноструктурированных материалов и систем», 17–19 декабря, 2013, Москва
6. Всероссийская конференция «Современные проблемы физики плазмы», 25–27 октября, 2013, Махачкала
7. VIII Всероссийская конференция по физической электронике, 20–22 ноября, 2014, Махачкала
8. IX Всероссийская конференция по физической электронике, 19–22 октября, 2016, Махачкала
9. XXIX International conference on Equations of State for Matter, March 1–6, 2014, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia
10. XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1–6, 2015, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia

11. XXXI International Conference on Equations of State for Matter, March 1–6, 2016, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia
12. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1–6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia
13. Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014, 20–23 мая, 2014, Казань
14. VIII Всероссийская (с международным участием) научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» с элементами научной школы, 6–9 ноября, 2016, Казань
15. XXXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 26–31, 2015, Iași, Romania
16. XXXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 9–14, 2017, Estoril, Portugal

Личный вклад

Автором созданы экспериментальные электроразрядные ячейки для исследования пробоя в разных условиях, разработана и отлажена система синхронизованной диагностики разрядных процессов. С её помощью получены новые экспериментальные результаты и предложена физическая картина развития «теплого» пробоя в исследованных средах. Анализ, интерпретация и подготовка публикаций полученных результатов проведены коллективом соавторов при определяющем участии автора.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 печатных изданиях, из них 10 — в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в системах цитирования *Web of Science* и *Scopus*, 16 — в сборниках трудов конференций.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, кратко освещена степень разработанности темы, сформулирована цель и поставлены задачи работы, изложены научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** приведен обзор научной литературы, посвященной электрическому разряду в жидкости. Отмечены фундаментальные работы, положившие начало исследованиям механизмов развития разряда в жидкостях. На основе анализа дано представление о существующих возможных механизмах инициации и развития разряда преимущественно в жидкостях с низкой электропроводностью а также основных методах их экспериментального и численного исследования. Обнаружен пробел в систематических исследованиях механизмов развития разряда в жидкостях со значительной проводимостью. Обработаны и систематизированы результаты исследований, начиная с первой половины XX века, в результате чего были определены основные направления данной работы.

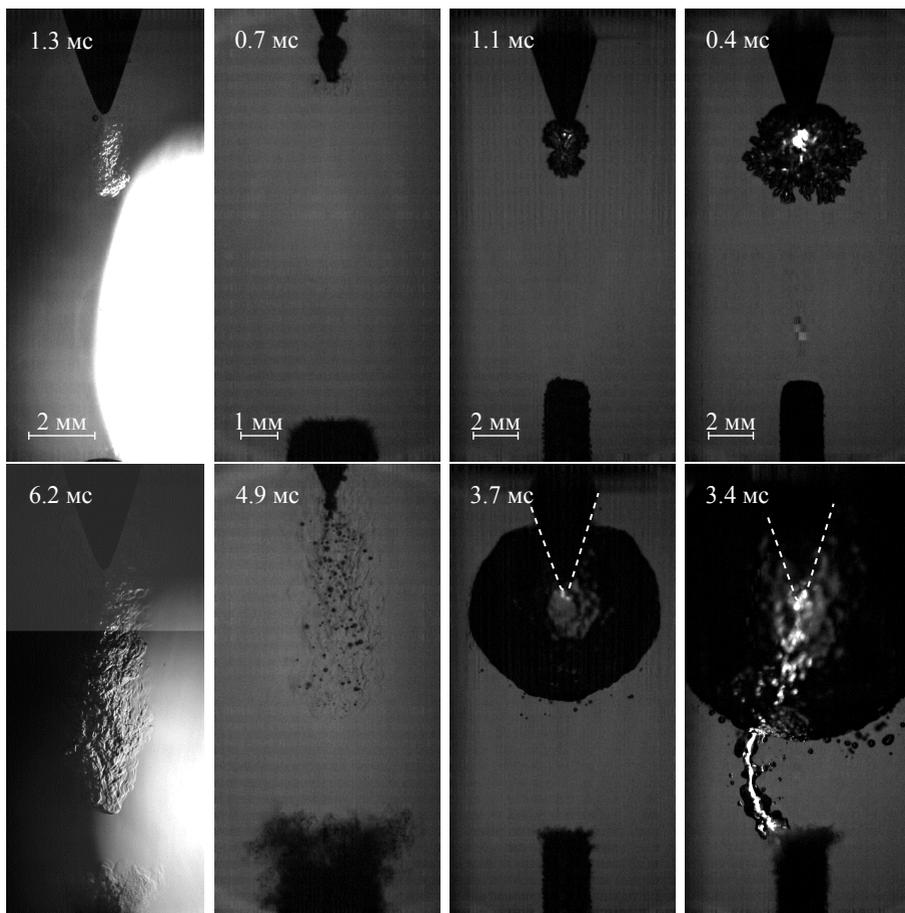
Во **второй главе** дано описание экспериментальной установки, созданной для исследования импульсного электрического разряда в однофазных и двухфазных средах. Приведены методики регистрации напряжения и тока на разрядном промежутке, проведены оценки погрешности измерений. Описан метод синхронизации электрических измерений с фоторегистрацией разряда, которая проводилась как для собственного свечения разряда, так и для получаемых теневых изображений при применении дополнительной подсветки.

В **третьей главе** изложены основные экспериментальные результаты.

Первый раздел главы посвящен исследованию импульсного разряда в воде с проводимостью 90–330 мкСм/см. Эксперименты проведены в межэлектродном промежутке длиной 10 мм, образованном острым анодом и цилиндрическим катодом диаметром 1.8 мм со скругленной кромкой рабочего торца.

Анализ допробойных явлений при проводимости 330 мкСм/см позволил определить начальные этапы развития разряда, которые оказались определяющими и при инициации завершеного пробоя при напряжениях, больших пробойного $U_{пр} = 6.1$ кВ. Видимые на осциллограммах и изображениях изменения появляются при напряжениях более $0.5U_{пр}$, при этом на теньевых изображениях становится видимым «тепловой след» у острия анода (рис. 1а), вызванный изменением плотности жидкости в результате прогрева токами проводимости, а вольт-амперная характеристика (ВАХ), оставаясь линейной, уменьшает свой наклон из-за увеличенной в результате нагрева проводимости. При повышении напряжения в диапазоне $(0.5–0.8)U_{пр}$ происходит образование стабильных парогазовых пузырьков у острия анода (рис. 1б), время формирования которых уменьшается при повышении плотности тока с анода, а наклон ВАХ продолжает уменьшаться (ход кривой 2 относительно 1 на рис. 2в). При высоких значениях плотности тока возможен перегрев жидкости, заход в метастабильную область и локальное взрывное вскипание жидкости. В диапазоне $(0.8–1)U_{пр}$ внутри парогазовой области спустя некоторое время после её образования возникает свечение (рис. 1в), сопровождающееся всесторонним расширением области, скорость которого падает с увеличением диаметра. На ВАХ возникновение свечения проявляется в появлении излома, за которым следует нелинейный участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

При напряжениях, равных и больших $U_{пр}$, одно или сразу несколько возмущений на поверхности плазменно-парогазовой области получают развитие в виде формирующихся в них продолжений разрядного канала. Таким образом в структуре разрядного канала появляется две составляющие: квазисферическая и «канальная» (рис. 1г). Анализ их динамики показал, что после возникновения свечения внутри начальной парогазовой области, т. е. зажигания разряда, рост разрядного канала обеспечивается увеличением размера квазисферической составляющей, а после выделения «канальной» составляющей её удлинение приводит к замыканию промежутка. В диапазоне напряжений до $2U_{пр}$ рост начальной парогазовой области до критического размера 0.1–0.5 мм, при котором внутри возникает свечение, длится 30–200 мкс, а общее время задержки пробоя уменьшается с 3.5 до 1 мс, что соответствует средней скорости распространения разрядного канала 3–12 м/с. Подробный анализ такого «теплого» механизма развития разряда проводится в четвертой главе.



а) 2.9 кВ

б) 4.2 кВ

в) 5 кВ

г) 6.1 кВ

Рис. 1 — Развитие предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см) в четырёх экспериментах с последовательно возрастающей амплитудой напряжения. Острийный анод вверху, катод — внизу. Неравномерность освещенности фона изображений на рисунке а) не связана с разрядными явлениями, а только с особенностями создания подсветки. Пунктиром на рисунках в) и г) обозначены контуры анода.

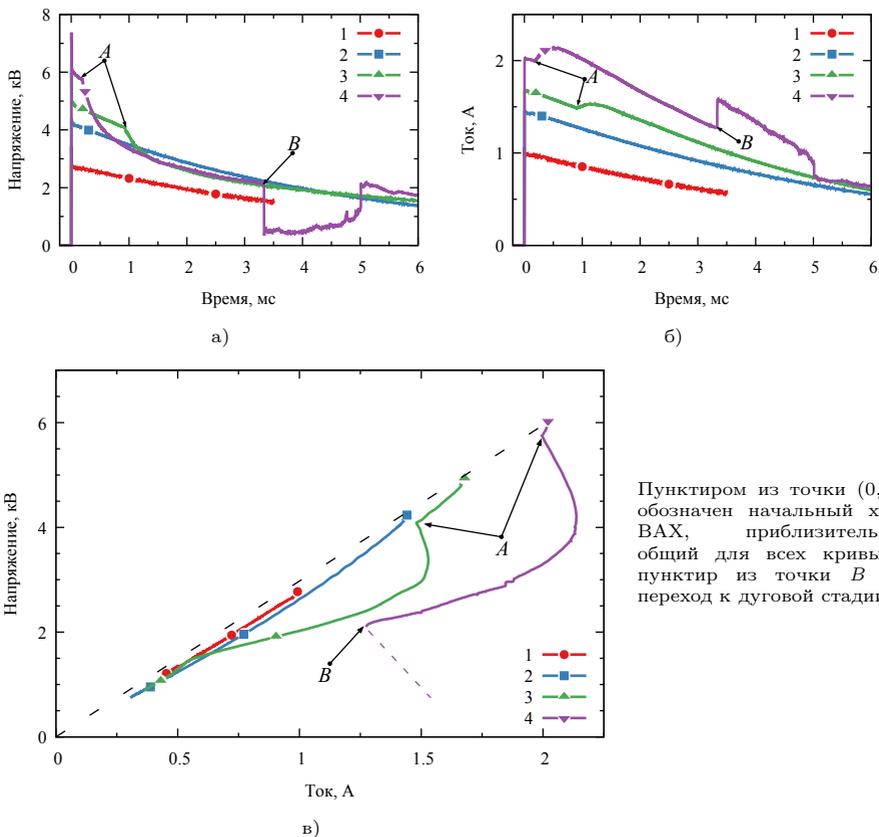
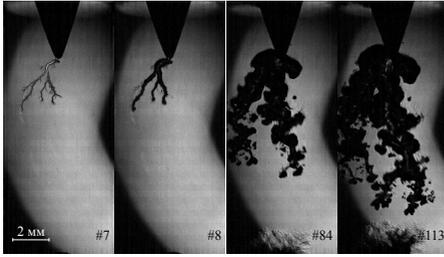


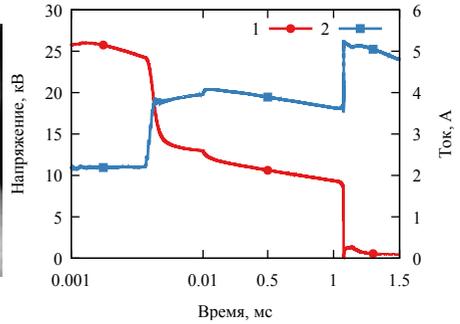
Рис. 2 — Осциллограммы напряжения (а), тока (б) и ВАХ (в) предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см) по мере увеличения амплитуды импульса напряжения от $0.5U_{\text{пр}}$ до $U_{\text{пр}}$. Нумерация кривых соответствует нумерации экспериментов в подписи к рис. 1. $U_0/U_{\text{пр}}$: 1) 0.5, 2) 0.7, 3) 0.8, 4) 1.0. Точки: *A* — появление свечения внутри начальной парогазовой области; *B* — замыкание каналом разрядного промежутка.

При снижении проводимости до 90 мкСм/см величина $U_{\text{пр}}$ увеличивается до 9.3 кВ, увеличивается время зажигания разряда (0.3–2.4 мс) и увеличивается критический размер начальной парогазовой области до 0.4–1.6 мм. Общая картина развития разряда остается той же, что и при 330 мкСм/см вплоть до перенапряжения ~ 2.8 . В диапазоне перенапряжений 2.8–3 зарегистрирован переход от медленного «теплового» механизма к одному из трёх, характеризующихся более высокими средними скоростями роста разрядного канала.

В первом случае развитие начинается по «стримерно-лидерному» механизму, но затем происходит возврат к медленному «тепловому» развитию разряда (рис. 3). Время задержки зажигания разряда по такому переходному механизму составило около 5 мкс, по истечении которого на аноде формируется «стримерно-лидерный» канал, который за несколько мкс проникает в промежуток на 2–3 мм а затем трансформируется в медленный «тепловой» канал со средней скоростью



а) 10^5 кадр/с, $t_{\text{эксп}} = 350$ нс, #7: 5.4 мкс, #8: 15.4 мкс, #84: 775 мкс, #113: 1065 мкс

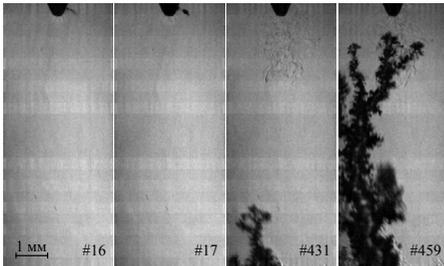


б) 1 — напряжение, 2 — ток

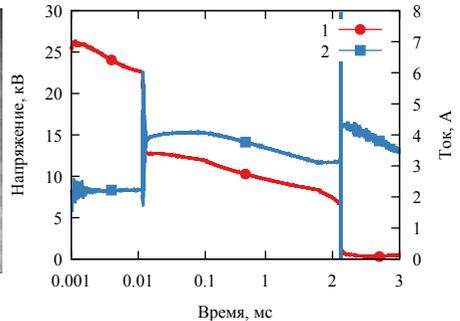
Рис. 3 — Теневые изображения (а) и осциллограммы напряжения и тока (б) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «стримерно-лидерное начало—тепловое продолжение». Шкала абсцисс на рисунке б) — комбинированная: на отрезке [0.001:0.01] масштаб логарифмический по основанию 10, на отрезке [0.01:1.5] — линейный. Излом на осциллограммах при $t = 0.01$ мс связан только с изменением масштаба.

около 10 м/с, рост которого через время ~ 1 мс приводит к замыканию промежутка.

Во втором случае примерно через 7 мкс (рис. 4а, кадр #16) появляется область оптической неоднородности в виде тонкой, короткой, не более 100 мкм, нити. Через несколько микросекунд происходит падение напряжения практически в два раза (рис. 4б), и образовавшийся канал теряет ножку, связывающую её с поверхностью анода, и приобретает форму ближе к сферической (рис. 4а, кадр #17), исчезая в течение следующих 50 мкс. После её исчезновения наступает длительный период «затишья», вплоть до времени 1.8 мс, когда из прикатодной области, окутанной мелкими пузырьками, стартует канал, внешний вид которого показан на кадрах #431 и #459. Появление канала с катода сопровождается изломом осциллограмм напряжения и тока (рис. 4б). Средняя скорость распространения канала составляет 30–50 м/с. При этом, в отличие от случая развития канала с анода, канал с катода не обладает собственным значительным свечением.



а) 2.1×10^5 кадр/с, $t_{\text{эксп}} = 350$ нс, #16: 11.6 мкс, #17: 16.4 мкс, #431: 1987 мкс, #459: 2121 мкс



б) 1 — напряжение, 2 — ток

Рис. 4 — Теневые изображения (а) и осциллограммы напряжения и тока (б) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «короткая инициация на аноде—развитие катодного канала». Шкала абсцисс на рисунке б) — комбинированная: на отрезке [0.001:0.1] масштаб логарифмический по основанию 10, на отрезке [0.1:1.5] — линейный. Излом на осциллограммах при $t = 0.1$ мс связан только с изменением масштаба.

ем, а его появление не вызывает значительного изменения сопротивления промежутка.

В третьем случае происходит «стримерно-лидерный» пробой, канал которого возникает на аноде через 30–40 мкс после подачи импульса напряжения и прорастает к катоду со скоростью до 7 км/с. Внешний вид канала и осциллограммы напряжения и тока разрядного промежутка приведены на рис. 5.

Обнаруженному переходу от «теплового» механизма развития разряда к «стримерно-лидерному» в четвёртой главе дано объяснение на основе представлений о распространении разрядного канала как волны ионизации.

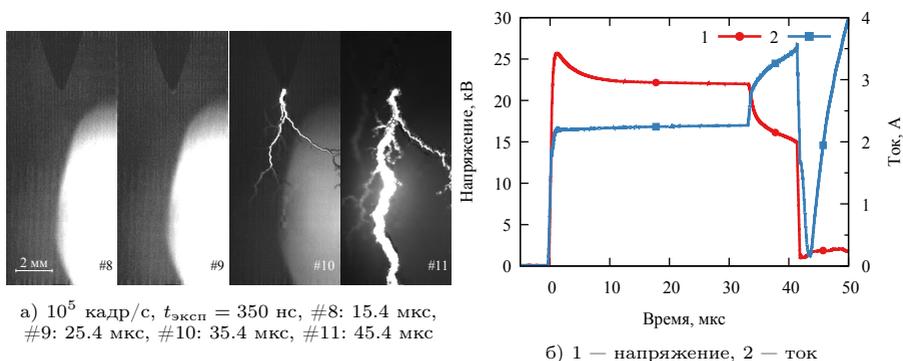


Рис. 5 — Теневые изображения (а) и осциллограммы напряжения и тока (б) разряда в воде с проводимостью 90 мксм/см при «быстром» механизме развития

Второй раздел главы посвящен исследованию развития электрического разряда в воде с предварительно созданными микропузырьками как на поверхности электродов, так и распределенными в объёме жидкости. Эксперименты проведены при двух значениях проводимости воды: 330 и 35 мксм/см.

Микропузырьки в воде получались методом её декомпрессии при атмосферном давлении после предварительного насыщения воздухом под давлением 7 атм в течение 10–30 мин, а распределение диаметров строилось на основе обработки их теневых изображений. Средний диаметр объёмных пузырьков составил (40 ± 10) мкм, диаметр поверхностных пузырьков — на уровне 500 мкм.

Эксперименты при проводимости 330 мксм/см с «чистыми», без видимых пузырьков, электродами показали отсутствие влияния объёмных микропузырьков на механизм разряда, который не отличался от «теплового», наблюдаемого в чистой проводящей воде.

Обнаружено, что на инициацию пробоя в проводящей воде в большей степени влияют пузырьки на поверхности электродов (рис. 6). В изначально покоящихся до подачи импульса напряжения пузырьках в первые несколько микросекунд происходит пробой (рис. 6а). При этом пробой анодных пузырьков выглядит как возникновение светящейся «перемычки» между поверхностями электрода и пузырька, проходящей практически по диаметру, а в катодных пузырьках возникает более равномерная засветка, которая уже через несколько микросекунд (рис. 6б) трансформируется в похожие «перемычки». Таким образом, наличие поверхностных пузырьков приводит к смене наблюдаемого механизма развития разряда. Инициация каналов происходит одновременно на обоих электродах (рис. 6в). На аноде она связана как с пробоем поверхностных пузырьков, из которых впоследствии развиваются боковые каналы, так и с ростом парагазового пузырька у острия и его дальнейшей ионизацией (рис. 6г), наблюдавшимся

ранее при исследовании пробоя проводящей воды без пузырьков. На катоде инициация и дальнейшее развитие канала происходят при пробое поверхностных пузырьков, находящихся в области максимальной напряжённости поля. После инициации каналов происходит их встречное движение, однако скорость канала с катода ~ 50 значительно превышает скорость анодного канала ~ 12 м/с, и перекрытие промежутка происходит в основном катодным каналом.

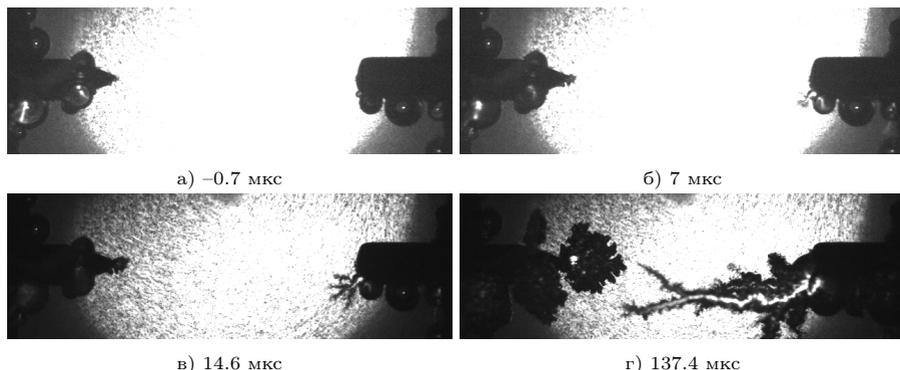


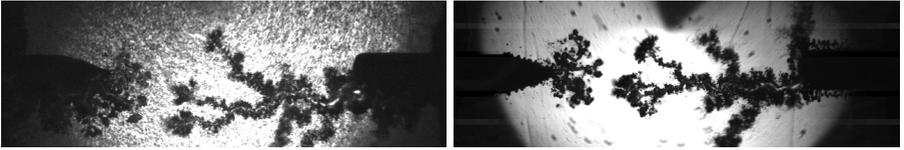
Рис. 6 — Развитие электрического разряда в проводящей воде с объёмными микропузырьками и поверхностными пузырьками на обоих электродах при напряжении $U_0 = 1.5U_{пр}$. Яркость изображений а) и б) увеличена относительно в) и г) искусственно с целью сделать видимыми процессы в поверхностных пузырьках. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время начала экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

В воде с низкой проводимостью (35 мкСм/см) влияние пузырьков на картину развития разряда более значительно. В исследованном диапазоне напряжений (до $1.5U_{пр}$, $U_{пр} \approx 20$ кВ) возможно развитие разряда как по медленному «тепловому» механизму при напряжениях $(1-1.3)U_{пр}$, так и по быстрому «стримерно-лидерному» механизму при более высоких напряжениях.

При перенапряжении 1.5 и отсутствии поверхностных пузырьков объёмные микропузырьки не оказывают заметного влияния на временные характеристики реализующегося «стримерно-лидерного» механизма. Наблюдаемая сквозь завесу микропузырьков структура канала не отличается от наблюдавшейся при сходных условиях без пузырьков. Полное время пробоя при этом составляет ~ 15 мкс.

При напряжениях, близких к пробойному, одновременное присутствие объёмных и поверхностных пузырьков приводит, как и в воде с проводимостью 330 мкСм/см, к инициации разряда в пузырьках на обоих электродах (рис. 7а). Время развития такого разряда с большой точностью совпадает для случаев обеих проводимостей и составляет ~ 160 мкс. При этом присутствие только поверхностных пузырьков приводит к механизму, наблюдаемому в аналогичных условиях при проводимости 330 мкСм/см и перенапряжении 1.5 : инициация на обоих электродах, перекрытие промежутка преимущественно катодным каналом, время пробоя ~ 160 мкс (рис. 7б).

Таким образом, можно сделать вывод о доминирующем влиянии на вид разряда поверхностных пузырьков над объёмными при наличии обоих типов в промежутке. Поверхностные пузырьки способствуют развитию основного канала с катода и замыканию промежутка за время ~ 160 мкс, которое находится между временем замыкания по «стримерно-лидерному» механизму (~ 15 мкс) и временем развития по «тепловому» механизму (~ 1.5 мс).

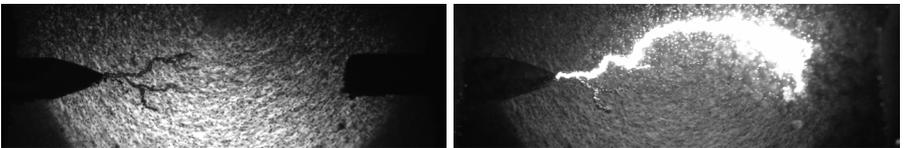


а) 153.5 мкс, поверхностные+объёмные пузырьки б) 148 мкс, только поверхностные пузырьки

Рис. 7 — Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде с пузырьками. $U_0 \approx U_{пр}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время начала экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

В [7] показано, что при заданном напряжении не любые пузырьки должны приводить к инициации разряда. Данный факт подтверждается и экспериментально. Для этого при $U_0 \approx U_{пр}$ были проведены эксперименты, в которых пузырьки диаметром ~ 1 мм поочередно помещались только на анод и только на катод. После подачи напряжения пузырек, изначально располагавшийся на конической поверхности вблизи острия анода, удлиняется в направлении её нормали, затем возникает перетяжка, которая приводит к делению пузырька на два: один отрывается, уходит в объём и далее не участвует в формировании разряда, а второй «сползает» по конусу к острию. При этом второй пузырёк во время движения к острию также делится на два, и в ближайшей к острию части происходит инициация разряда. Крупный катодный пузырёк к инициации разряда не приводит. Таким образом, можно предположить, что для данной электродной системы и диапазона напряжений критический размер поверхностных пузырьков, приводящих к инициации разряда, лежит в диапазоне 0.4–0.6 мм.

Для определения влияния на механизм разряда при пониженной проводимости воды именно объёмных микропузырьков была проведена серия экспериментов, в которых электроды оставались изолированными от газированного объёма жидкости до момента подачи напряжения, исключая, таким образом, возможность образования поверхностных пузырьков. Было установлено, что присутствие объёмных микропузырьков приводит к сокращению времени пробоя на два порядка: ~ 15 мкс в присутствии микропузырьков (рис. 8) против ~ 1.5 мс в чистой воде с той же проводимостью ~ 35 мкСм/см. Понижение объёмного газосодержания приводит к незначительному увеличению времени пробоя (до ~ 20 мкс). В первые 5 мкс после подачи напряжения у острия возникает едва различимая «паутинка» из тонких тёмных каналов, проникающая примерно на 2 мм вглубь промежутка. В последующие несколько микросекунд (рис. 8а) несколько ветвей «паутинки» получают развитие, и образуется «кисть» с видимым диаметром 150–200 мкм, рост которой приводит к замыканию (рис. 8б).



а) 7 мкс б) 14.7 мкс

Рис. 8 — Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде только с объёмными микропузырьками. $U_0 \approx U_{пр}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время начала экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

Анализ изображений показал, что развитие канала при этом происходит, преимущественно, в направлении ближайших пузырьков и через них.

Третий раздел главы посвящен исследованию электрической прочности микропузырьковой смеси трансформаторного масла с воздухом и элегазом.

В первой части приведены полученные экспериментальные данные об ослаблении акустических волн и волн давления конечной амплитуды при их распространении в генерируемой микропузырьковой среде на основе трансформаторного масла, воздуха и элегаза. В результате была установлена способность указанной среды ослаблять интенсивность акустического сигнала на 60–70 дБ и волны конечной амплитуды на 10 дБ при объёмном газосодержании более 0.02 %.

Во второй части приведены экспериментальные данные о величине снижения пробойного напряжения для двух смесей: 1) трансформаторное масло марки ГК, бывшее в эксплуатации, с пузырьками воздуха при газосодержании до 10 %; 2) новое масло той же марки с пузырьками элегаза при том же газосодержании. Квазиоднородное поле в промежутке длиной 8 мм создаётся парой одинаковых полусферических электродов с радиусом кривизны рабочей поверхности 25 мм. Постоянное регулируемое напряжение до 140 кВ подается на электроды в квазипульсном режиме при коммутации первичной цепи повышающего трансформатора и при необходимости повышается до пробойного. Газосодержание достигало 10 %, кривая естественной дегазации через открытую поверхность и растворения газа в жидкости приведена на рис. 9а. В результате проведенных экспериментов установлено:

- наличие пузырьков воздуха при объёмном газосодержании не более 10 % снижает напряжение пробоя на 30–35 %, с уровня 100–110 кВ до 65–75 кВ;
- при естественной дегазации от воздушных пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, через 5 минут после остановки генератора пузырьков она составляет 90 кВ против 100–110 кВ без пузырьков (рис. 9б, кривая 1);
- наличие пузырьков элегаза при объёмном газосодержании не более 10 % снижает напряжение пробоя на 25–30 %, с уровня 110–120 кВ до 80–90 кВ;
- при естественной дегазации от элегазовых пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, через 4 минут после остановки генератора пузырьков она составляет 100–110 кВ против 110–120 кВ без пузырьков (рис. 9б, кривая 2).

Эффект неполного восстановления напряжения пробоя при визуальном отсутствии пузырьков элегаза в масле ТМ2, по-видимому, имеет ту же природу, что и неполное исчезновение затухания акустических волн, и вероятнее всего, связано с высокой растворимостью элегаза в трансформаторном масле.

В результате установлено, что при газосодержании более 0.02 % можно одновременно достичь хороших демпфирующих свойств при сохранении электрической прочности смеси.

Использование в пузырьках газа с более высокой электрической прочностью приводит к меньшему снижению пробойного напряжения в масляной пузырьковой среде. Эффект снижения напряжения будет зависеть не только от электрической прочности газа, но и от размеров пузырьков, так как инициация разряда начинается внутри пузырька, а возможность дальнейшего перехода разряда в жидкость зависит, в том числе, от формирования лавинно-стримерного перехода, т. е. скорости роста концентрации носителей заряда внутри пузырька.

Для газов с высоким значением коэффициента диффузии зарядов их более быстрый уход на стенку в пузырьках меньшего размера будет приводить к более высокой фактической электрической прочности среды, а демпфирующие свойства изменятся незначительно, что является важным условием использова-

ния таких сред в качестве электроизоляционных и демпфирующих для защиты высоковольтного маслонаполненного оборудования от разрушения в нештатных ситуациях, вызванных возникновением короткого замыкания.

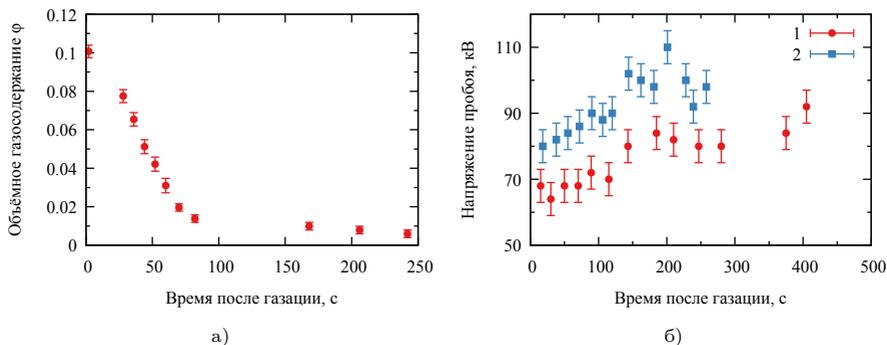


Рис. 9 — Зависимость газосодержания (а) и напряжения пробоя (б) в смеси трансформаторного масла с пузырьками воздуха (1) и аргонгаза (2) от времени после газации

В **четвертой главе** приведено описание предложенного «теплого» механизма развития разряда в проводящей воде, а также представлены результаты исследования развития разряда во влажном проводящем грунте и их сравнение с изложенным «тепловым» механизмом.

Предложенный «тепловой» механизм развития разряда включает в себя пять основных этапов:

1. интенсивный нагрев жидкости начальными токами проводимости, приводящий к её локальному взрывному вскипанию вблизи кончика анода;
2. ионизация пара под действием усиленного на острие анода поля внутри образовавшихся пузырьков после достижения ими некоторого критического размера;
3. протекание тока и тепловыделение преимущественно в областях с повышенной в результате ионизации проводимостью;
4. развитие тепловой неустойчивости в двухфазной среде в областях с высокой плотностью тока и образование термически ионизованной плазмы;
5. выделение и рост основного канала разряда из начальной плазменной области.

Проведены аналитические и численные оценки плотности энерговыведения и распределения температуры жидкости вблизи острия анода, свидетельствующие в пользу взрывного механизма вскипания. Оценено время, необходимое для появления парогазовых пузырьков, оказавшееся на уровне 100 мкс. Полагая справедливость закона Пашена для парогазовой смеси внутри пузырьков и их таунсендовский механизм пробоя, получено критическое значение радиуса, при достижении которого происходит пробой пузырька. Оценка проведена для прианодной области, в которой также учтена электрострикционная добавка к давлению, которая влияет на величину критического радиуса. Показан возможный механизм влияния добавок изопропилового спирта на развитие пробоя через добавочное Лапласово давление и величину первого коэффициента ионизации Таунсенда. Для оценки проводимости плазмы, образующейся внутри пузырьков, рассмотрено равновесие процессов ионизации паров воды электронным ударом и рекомбинации, наиболее интенсивно протекающей с комплексными положительными

ионами вида $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_m$, m : 1–5. Полученным значениям концентрации электронов соответствует проводимость 0.3–1 См/см, что на три порядка превышает проводимость окружающей жидкости. Такое отличие в проводимости обеспечивает преимущественное тепловыделение в прианодной области в ионизованных пузырьках и создаёт условия для развития в них тепловой неустойчивости и формирования термически ионизованной плазмы. Время её развития было оценено как время высвобождения энергии, запасённой в колебательных уровнях молекул воды, через V–T релаксацию при условии, что время накачки колебательных уровней меньше времени релаксации, и составило несколько наносекунд. Таким образом было установлено, что время запаздывания зажигания разряда определяется в основном временем нагрева и испарения жидкости у острия.

После возникновения первичной плазменной области вблизи анода вся запасенная энергия идет на рост и распространение плазменного канала. Данная стадия занимает существенно большее время и может достигать нескольких миллисекунд в условиях проведенных экспериментов. Измеренная скорость распространения составила от 3 до 15 м/с в зависимости от приложенного напряжения. Вблизи анода самоподдерживающаяся термическая ионизация и растущая концентрация электронов обеспечивают высокую проводимость канала и вынос высокого потенциала на кончик канала, а скорость его распространения можно принять равной отношению размера области возмущенного поля на кончике канала, принимаемой равной радиусу канала, ко времени нагрева и развития тепловой неустойчивости до хорошо проводящего состояния. Оцененная таким образом скорость близка к измеренной экспериментально при радиусе канала ~ 1 мм.

Возможность распространения стримера в проводящей среде ограничена, и переход от «теплового» механизма к «стримерному» наблюдался только при пониженной проводимости. Развитие стримера с ударной ионизацией под действием сильного электрического поля на головке может происходить только в том случае, когда проводимость среды ниже определенного уровня. Если среда имеет повышенную проводимость, то волну ионизации обгоняет диффузия потенциала и тока из области головки стримера. В диффузионной волне электрического поля не происходит ионизации по причине его малой величины. Начальная проводимость среды приводит к уменьшению и расплыванию перед фронтом стримера электрического поля, локализованного в области головки, и уменьшению скорости распространения волны ионизации. В этом случае задача о распространении стримера аналогична задаче о движении волны ионизации в проводящей среде, когда стример и его проводящий канал рассматриваются как участок длинной линии. Скорость диффузии потенциала, который связан с электрическим полем на головке стримера соотношением $U = 2r_c E$, определяется отношением χ/r_c , где $\chi = 1/RC$ — коэффициент диффузии потенциала, r_c — радиус головки стримера, $1/R = \pi r_c^2 \sigma$, $C = 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 / \ln(L/r_c)$ — погонные сопротивление и емкость стримерного канала, σ — проводимость, ε — диэлектрическая проницаемость среды, L — длина стримера. Стример с сильным электрическим полем на головке может распространяться в проводящей среде, если скорость диффузии потенциала на его переднем фронте меньше скорости стримера $\chi/r_c < v_c$. Вследствие того, что зависимость $\gamma_i(E)$ частоты ионизации от величины напряженности поля, которая входит в выражение для скорости стримерного канала, при напряженностях электрического поля, характерных для стримера, носит квазипороговый характер, переход от «теплового» механизма пробоя в проводящей жидкости в неоднородном электрическом поле к «стримерному» при увеличении напряжения на разрядном промежутке должен происходить достаточно резко, пороговым образом.

Исследования электрического разряда во влажном песке, который представляет собой систему из твердых частиц, жидкости и газовых пор, показали значительное его сходство с развитием разряда в проводящей воде. При растекании импульсного тока, так же как и в воде, на осциллограммах появляется максимум тока, который всегда сдвинут относительно максимума напряжения на сторону больших времен. Такое поведение тока свидетельствует о начале ионизационных процессов и наблюдается при достижении критической плотности тока, равной $j_c \approx 0.1 \text{ А/см}^2$.

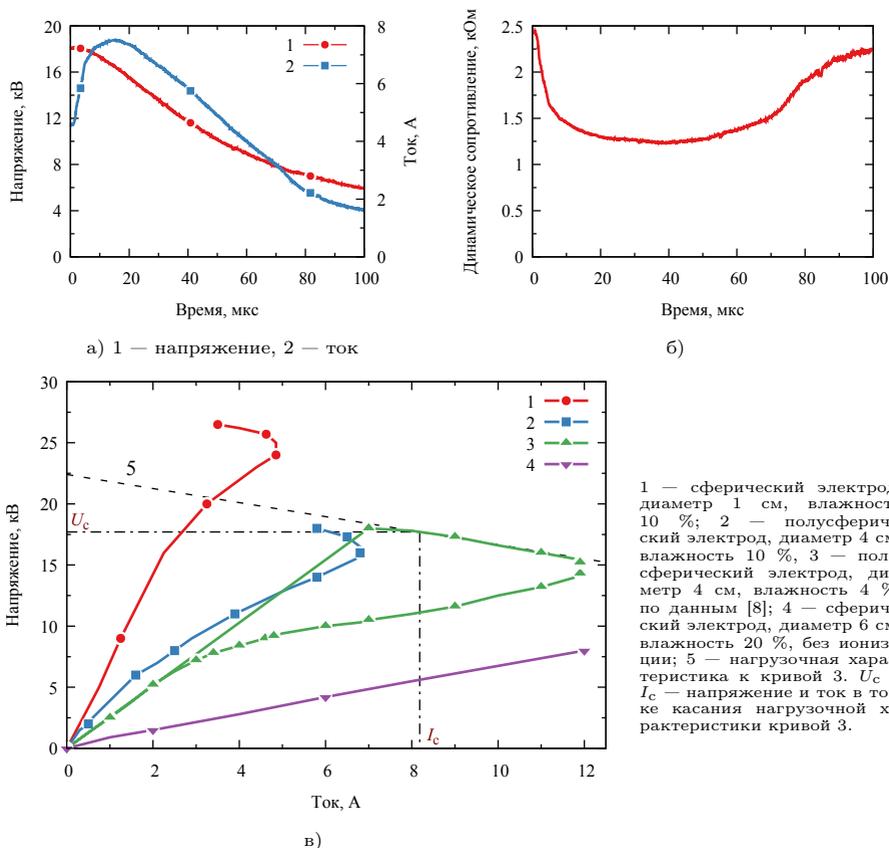


Рис. 10 — Характерные осциллограммы напряжения и тока (а), динамического сопротивления (б) при влажности 10 % и ВАХ (в) при растекании импульсного тока в песке

Новый, наиболее последовательный с физической точки зрения метод определения соответствующей критической величины напряженности поля E_c основан на анализе петлеобразных вольт-амперных характеристик, которые образуются при начале ионизационных процессов. Начальный участок ВАХ, на котором выполняется закон Ома вплоть до точки перегиба и сопротивление заземлителя слабо отличается от сопротивления при слабом стационарном токе, отвечает росту напряжения на переднем фронте высоковольтного импульса и начальному периоду его приблизительно постоянного значения. Появление участка падаю-

щей ВАХ ($dU/dI < 0$) указывает на развитие неустойчивости по отношению к малым флуктуациям тока. При выполнении условия $-dU/dI > R_6$ вблизи поверхности электрода развивается тепловая неустойчивость, которая приводит к контракции тока в песке. Данный критерий позволил однозначно определить критическую напряженность поля ионизации E_c по кривым $U(I)$. На рис. 10в к кривой 3 пунктиром проведена нагрузочная характеристика $U = U_0 - IR_6$, где U_0 — зарядное напряжение на емкости генератора. Точка касания нагрузочной кривой и ВАХ определяет напряжение U_c , которое соответствует полю ионизации E_c .

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработан и создан экспериментальный стенд для исследования электрического разряда в однофазных и двухфазных средах, обеспечивающий импульсное напряжение с регулируемой амплитудой до 40 кВ, общей длительностью до 3 мс, длительностью фронта ~ 0.4 мкс и фоторегистрацию, синхронизированную с регистрацией электрических характеристик разряда.
2. Проведено экспериментальное исследование электрического разряда в воде с повышенной (330 мкСм/см) и пониженной (35–90 мкСм/см) проводимостью, в воде с микропузырьками воздуха при тех же проводимостях, в смесях трансформаторного масла с пузырьками воздуха и элгаса, а также во влажном песке, и определены реализующиеся механизмы электрического разряда.
3. Для проводящей воды при напряжении, близком к пробойному, установлены основные этапы развития разряда и предложен «тепловой» механизм, включающий:
 - интенсивный нагрев жидкости начальными токами проводимости, приводящий к её локальному взрывному вскипанию вблизи кончика анода;
 - рост пузырьков до критического размера, при котором происходит ионизация пара внутри пузырьков под действием электрического поля, усиленного на острие анода;
 - протекание тока и тепловыделение преимущественно в областях с повышенной в результате ионизации проводимостью;
 - развитие тепловой неустойчивости в двухфазной среде в областях с высокой плотностью тока и образование термически ионизованной плазмы;
 - выделение и рост основного канала разряда из начальной плазменной области.
4. При уменьшении начальной проводимости до 90 мкСм/см и перенапряжении более 2.8 экспериментально зарегистрирован переход от «теплого» механизма развития разряда к трём другим, с более высокими средними скоростями распространения разрядного канала:
 - появление разрядной «кисти» у анода, быстро проникающей на несколько миллиметров вглубь промежутка в первые несколько микросекунд после подачи напряжения, которая затем трансформируется в плазменный канал, прорастающий со средней скоростью до 20 м/с;
 - возникновение короткого канала на аноде, сопровождающееся падением напряжения на промежутке более чем в два раза, после чего анодный канал перестает развиваться и схлопывается примерно через 20 мкс; через несколько миллисекунд после этого на катоде возникает плазменный канал, который распространяется по направлению к аноду со средней скоростью нескольких сотен м/с и при достижении анода замыкает промежуток;
 - полное развитие разряда по «стримерно-лидерному» механизму с анода со средней скоростью распространения канала несколько км/с.

Переходу от «теплового» механизма к полному развитию по «стримерно-лидерному» механизму дано объяснение на основе представлений о распространении разрядного канала как о волне ионизации, заключающееся в пороговом характере зависимости частоты ионизации жидкости электронным ударом и в условии на скорость диффузии потенциала на переднем фронте головки канала, связывающем величину проводимости с ожидаемой скоростью распространения канала.

5. Установлено влияние объёмных и поверхностных пузырьков на развитие разряда в воде с различной проводимостью:
 - в проводящей воде (330 мкСм/см) объёмные микропузырьки не оказывают заметного влияния на время развития разряда, механизм и структуру разрядного канала при напряжениях $(1-1.5)U_{пр}$.
 - в слабопроводящей воде (35 мкСм/см) объёмные микропузырьки приводят к смене «теплового» механизма пробоя при $U_0 = U_{пр}$ со временем пробоя $\sim 1.5 \text{ мс}$ «стримерно-лидерным» механизмом с характерным временем пробоя $15-20 \text{ мкс}$ при том же напряжении;
 - наличие поверхностных пузырьков на электродах нивелирует влияние объёмных микропузырьков в слабопроводящей воде и приводит к инициации разряда на обоих электродах с преимущественным развитием катодного канала.
6. Для микропузырьковых смесей на основе трансформаторного масла марки ГК с воздухом и элегазом получены зависимости демпфирующих и электроизоляционных свойств от объёмного газосодержания:
 - ослабление акустической волны составляет величину от 50 до 70 дБ при газосодержании более 0.02%
 - ослабление волн давления конечной амплитуды составляет до 10 дБ при объёмном газосодержании элегаза более 0.02%
 - наличие пузырьков воздуха при объёмном газосодержании не более 10% снижает напряжение пробоя на $30-35 \%$;
 - при естественной дегазации от воздушных пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, через 5 минут после остановки генератора пузырьков она составляет 90 кВ против $100-110 \text{ кВ}$ без пузырьков;
 - наличие пузырьков элегаза при объёмном газосодержании не более 10% снижает напряжение пробоя на $25-30 \%$;
 - при естественной дегазации от элегазовых пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, через 4 минут после остановки генератора пузырьков она составляет $100-110 \text{ кВ}$ против $110-120 \text{ кВ}$ без пузырьков.

Фоторегистрация разряда при подаче более крупных (диаметром до 1 мм) одиночных пузырьков в разрядный промежуток в масле показала, что инициация разряда может происходить из объёмного пузырька, в отличие от «теплового» механизма пробоя в проводящей воде. Использование в пузырьках газа с более высокой электрической прочностью приводит к меньшему снижению пробойного напряжения в масляной пузырьковой среде на его основе.

7. Сравнение результатов для проводящей воды и влажного песка показало, что развитие разряда в них происходит по схожим механизмам, а при повышенной влажности песка динамика разряда определяется процессами в жидкости. Процесс растекания импульсных токов при плотностях тока, превышающих критические, приводит к резкому нелинейному уменьшению сопротивления заземления в результате ионизации и искрообразования в грунте вблизи электрода. Обнаружено, что вблизи электрода развивается тепловая неустойчи-

вость, которая приводит к контракции тока и образованию плазменных каналов. Предложен метод определения пороговой напряженности электрического поля, при которой начинается ионизация в грунте, исходя из зависимости тока от напряжения на заземляющем электроде. Обнаружено, что пробой в мокром песке развивается по разным механизмам в коротких (~3 см) и длинных (более 10 см) промежутках. В коротких промежутках пробой аналогичен пробую в воздухе и развивается, вероятно, по стримерному механизму. В длинных промежутках пробой развивается с большим временем задержки (~1 мс) и аналогичен «тепловому» пробую.

Список литературы

1. *Комельков В. С.* Механизм импульсного пробоя жидкостей // ДАН СССР. — 1945. — Т. 47, вып. 4. — С. 269—272.
2. *Комельков В. С.* Развитие импульсного разряда в жидкости // ЖТФ. — 1961. — Т. 31, вып. 8. — С. 948—960.
3. *Lesaint O.* Prebreakdown phenomena in liquids: propagation ‘modes’ and basic physical properties // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2016. — Vol. 49, no. 14. — P. 144001.
4. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / В. Я. Ушаков [и др.] ; под ред. В. Я. Ушаков. — Томск : Изд-во НТЛ, 2005. — 488 с.
5. *Куржескин И. П.* Исследование пробоя жидкости в неоднородном поле при прямоугольных волнах напряжения // ЖТФ. — 1966. — Т. 36, вып. 12. — С. 2125—2130.
6. *Nakao Y., Sakamoto S.* Researches on Underwater Spark Discharge // The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan. — 1967. — Vol. 87, no. 944. — P. 974—982.
7. *Babaeva N. Y., Tereshonok D. V., Naidis G. V.* Initiation of breakdown in bubbles immersed in liquids: pre-existed charges versus bubble size // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2015. — Т. 48, № 35. — С. 355201.
8. В.-Н. Lee [et al.] // Journal of Electrical Engineering & Technology. — 2009. — Vol. 4. — P. 98.

Список работ по теме диссертации

1. *Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е.* Электрический пробой при растекании импульсного тока в песке // Прикладная физика. — 2014. — № 4. — С. 20—25
2. *Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е.* Нелинейное растекание импульсного тока и электрический пробой в грунте // ТВТ. — 2014. — Том 52, вып. 6. — С. 825—831
3. *Panov V. A., Kulikov Y. M., Son E. E., Tyuftyaev A. S., Gadzhiev M. Kh., Akimov P. L.* Electrical Breakdown Voltage of Transformer Oil with Gas Bubbles // High Temp. — 2014. — Vol. 52, No. 5. — P. 770—773
4. *Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V.* Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2015. — Vol. 48. — 28520

5. *Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Danilin A. N., Ivonin V. V., Kolobov V. V., Kuklin D. V., Selivanov V. N.* Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 653. — 012151
6. *Panov V. A., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Kulikov Yu. M., Son E. E.* Evolution of electrical discharge channel in isopropyl alcohol solution // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 653. — 012157
7. *Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E.* Spark channel propagation in a microbubble liquid // *Plasma Phys. Rep.* — 2016. — Vol. 42 (11). — P. 1074–1077
8. *Vetchinin S. P., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Panov V. A., Son E. E.* Spark discharge in conductive liquid with microbubbles // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 774. — 012183
9. *Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E.* Pulsed electrical discharge in conductive solution // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2016. — Vol. 49. — 385202
10. *Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С.* Влияние распределенной фазы газовых пузырьков на импульсный электрический разряд в воде // *Прикладная физика.* — 2017. — №5. — С. 5–9

Панов Владислав Александрович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ
В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 20.01.2018

Печать офсетная

Тираж 100 экз.

Уч.-изд.л. 1,16

Заказ №

Формат 60×84/16

Усл.-печ.л. 1,25

Бесплатно
