

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи
УДК 537.528

Панов Владислав Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ
СРЕДАХ**

Специальность 01.04.08 —
«Физика плазмы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Москва — 2017

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Механизмы развития импульсного электрического разряда в однофазных и двухфазных средах (обзор)	10
1.1 Однофазные жидкости	10
1.1.1 Механизмы инициации разрядов	10
1.1.2 Развитие разряда в диэлектрических жидкостях	16
1.1.3 Особенности развития разряда в жидкостях с повышенной проводимостью	25
1.2 Двухфазные среды с мелкодисперсными твердыми частицами	33
Выводы по Главе 1	36
Глава 2. Экспериментальная установка	37
2.1 Схема установки	37
2.2 Разрядные камеры	39
2.3 Схема синхронизации регистрирующей аппаратуры	41
2.4 Методика измерений импульсных напряжения и тока	42
2.5 Прочие измерения	44
Выводы по Главе 2	45
Глава 3. Экспериментальные результаты	46
3.1 Развитие электрического разряда в проводящей воде	46
3.1.1 Анализ допробойных явлений	46
3.1.2 Развитие разряда при напряжениях выше пробойного	51
3.1.3 Динамика канала разряда	55
3.1.4 Влияние перенапряжения	56
3.1.5 Влияние проводимости жидкости	59
3.1.6 Влияние коэффициента поверхностного натяжения	66
3.2 Влияние объёмных и поверхностных микропузырьков на развитие разряда в воде с различной начальной проводимостью	68
3.2.1 Микропузырьки в проводящей воде	70
3.2.2 Микропузырьки в слабопроводящей воде	72
3.3 Пробой трансформаторного масла с пузырьками газа	75
3.3.1 Затухание акустических волн и волн конечной амплитуды	75
3.3.2 Электрический пробой смеси	83
Выводы по Главе 3	86

	Стр.
Глава 4. Обсуждение экспериментальных результатов	90
4.1 Тепловой механизм развития импульсного электрического разряда в проводящей жидкости	90
4.1.1 Образование пузырьков в прианодной области	91
4.1.2 Ионизация пузырьков вблизи анода	93
4.1.3 Проводимость плазмы в пузырьках	95
4.1.4 Развитие тепловой неустойчивости	95
4.1.5 Распространение плазменного канала	96
4.2 Влияние перенапряжения на смену механизма пробоя в воде	97
4.3 Развитие электрического разряда во влажном песке	100
Выводы по Главе 4	106
Заключение	108
Список сокращений и условных обозначений	111
Список литературы	112
Список рисунков	122
Список таблиц	127
Приложение А. Дополнительный иллюстративный материал	128
Приложение Б. Расчет напряженности и температуры в межэлектродном промежутке	132
Б.1 Моделирование электростатического поля в межэлектродном промежутке . . .	132
Б.2 Моделирование прогрева жидкости начальными токами проводимости	133
Приложение В. Многопиновая ячейка для плазмо-химической очистки загрязнённой жидкости	136

Введение

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, 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], О. 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 проводимо-

стью и «электротеплового 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 объёмном газосодержании;
- 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 объёме 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 средней 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 парогазовой 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 «теплового» 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.

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. — 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

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трёх приложений. Полный объём диссертации составляет 139 страниц, включая 79 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 131 наименование.

Глава 1. Механизмы развития импульсного электрического разряда в однофазных и двухфазных средах (обзор)

1.1 Однофазные жидкости

1.1.1 Механизмы инициации разрядов

Текущее фундаментальное представление о многообразии механизмов инициации разряда в жидкостях представлено в монографии [4]. Большая часть теоретических и экспериментальных работ, выполненных после её выхода, следует терминологии и изложена в рамках моделей, описанных в [4]. В настоящий момент выделяется четыре возможных механизма инициации разряда в жидкости: пузырьковый, микровзрывной, ионизационный и электротепловой. Ниже приведены основные характеристики перечисленных механизмов. Если не указано иное, речь идет о жидкостях с низкой начальной проводимостью.

В сущности, три из четырех ниже описываемых модели предполагают образование области пониженной плотности среды, в которой происходит зажигание разряда. Отличие моделей состоит в механизмах, которые приводят к появлению свободных носителей зарядов вблизи электродов, ток которых и обеспечивает формирование областей пониженной плотности, а также в предлагаемых механизмах дальнейшего развития разряда.

Первый механизм инициации разряда — пузырьковый, в котором главную роль играют пузырьки, существовавшие в жидкости и на электродах до подачи импульса напряжения. Согласно основной пузырьковой модели, предложенной С. М. Коробейниковым в работах [7; 8], пузырьки диаметром до нескольких десятков микрон присутствуют, в основном, на электродах. В случае, если амплитуда приложенного напряжения достаточна для наведения на противоположных полюсах пузырька некоторой критической разности потенциалов, в них начинается процесс ионизации, аналогичный процессу ионизации в коротком газовом промежутке (частичный разряд). После разряда результирующее поле внутри пузырька ослабевает вследствие его экранировки зарядами, осевшими на поверхности пузырька, и процесс ионизации либо ослабевает, либо прекращается полностью. Под действием внешнего электрического поля осевшие заряды направляются вглубь жидкости, приводя таким образом к деформации пузырьков. Скорость перемещения при этом определяется подвижностью носителей зарядов. Процесс продолжается периодически до тех пор, пока напряженность электрического поля на полюсе пузырька в жидкости не достигнет критического значения для зажигания разряда в жидкости.

Таково качественное представление механизма. Количественно модель направлена, во-первых, на оценку времени пробоя приэлектродного пузырька, а во-вторых, на оценку общего времени развития разряда (от момента подачи импульса до момента замыкания промежут-

ка хорошо проводящим каналом) с целью иметь возможность верифицировать модель по существующим экспериментальным данным, которые, в большинстве случаев, приводятся именно для полного времени пробоя.

Для оценки времени пробоя воздушного пузырька в первую очередь проводится анализ механизма его пробоя на основе теории газового разряда. Известно [9], что лавинно-стримерный переход реализуется при αd в диапазоне 18–20, где α — коэффициент ударной ионизации, d — межэлектродное расстояние (в нашем случае — диаметр пузырька). Для оценки характерных значений αd в [4] задаются следующими величинами: средняя напряженность E поля в промежутке 100–1000 кВ/см, давление p , близкое к атмосферному, диаметр d пузырька от единиц до десятков микрон. При этих значениях величина $E/p \sim (100\text{--}1000)$ В/см·Торр, а коэффициент ударной ионизации описывается соотношением $\alpha/p = A \cdot \exp[-B/(E/p)]$, $A = 15$ (см·Торр) $^{-1}$, $B = 365$ В/см·Торр). Из этих оценок следует величина $\alpha \sim (700 - 8000)$ см $^{-1}$, а $\alpha d \sim (2\text{--}3)$, что указывает на таунсендовский механизм пробоя пузырька с критерием пробоя $\gamma \cdot (\exp(\alpha d) - 1) = 1$, фактически задающим кривую Пашена, где γ — вторичный коэффициент ударной ионизации, определяющий появление вторичных лавин в пузырьке за счет фотонов или положительных ионов [4]. Для оценки непосредственно времени пробоя, которое связано со временем дрейфа ионов (подвижностью b) и коэффициентом умножения числа электронов $\beta = \gamma \cdot (\exp(\alpha d) - 1) > 1$ используется формула [9]:

$$\tau = \frac{d}{bE(\beta - 1)}.$$

Делая оценки для $(\beta - 1)$ при напряженностях, несколько превышающих величину, задаваемую кривой Пашена (на которой $\beta = 1$), авторы [4] приходят к значению $\tau \sim 2$ нс при $b = 1$ см 2 /В·с, $E = 100$ кВ/см и $d = 20$ мкм.

Оценка общего времени задержки пробоя и её верификация экспериментальными данными проводилась авторами [4] для следующих условий: однородное или слабонеоднородное электрическое поле в разрядном промежутке, короткий промежуток, существующие на электродах зародыши пузырьков. Это давало основания в составе общего времени развития разряда пренебречь такими составляющими, как время роста пузырька от зародышевого состояния до размера, при котором возможен его пробой, и временем формирования разряда (т. е. временем между достижением ионизованным пузырьком критического для зажигания разряда размера) ввиду его малости из-за коротких длин разрядного промежутка и высокой скорости разряда в жидкости. Тогда общее время определяется только временем роста ионизованного пузырька до некоторого критического размера, при котором происходит зажигание разряда и его переход из пузырька в жидкость. Для его вычисления в модели используется классическое уравнение Рэлея–Плессета, описывающее динамику стенки пузырька под действием перепада давления, в которое введены дополнительные члены, связанные с давлением электрического поля и электрострикционным давлением.

Проведенная авторами верификация на основе данных для гексана, жидкого азота и воды показала хорошее совпадение в мегавольтном диапазоне напряженностей (МВ/см), когда полное время задержки пробоя находится в субмикросекундном—микросекундном диапа-

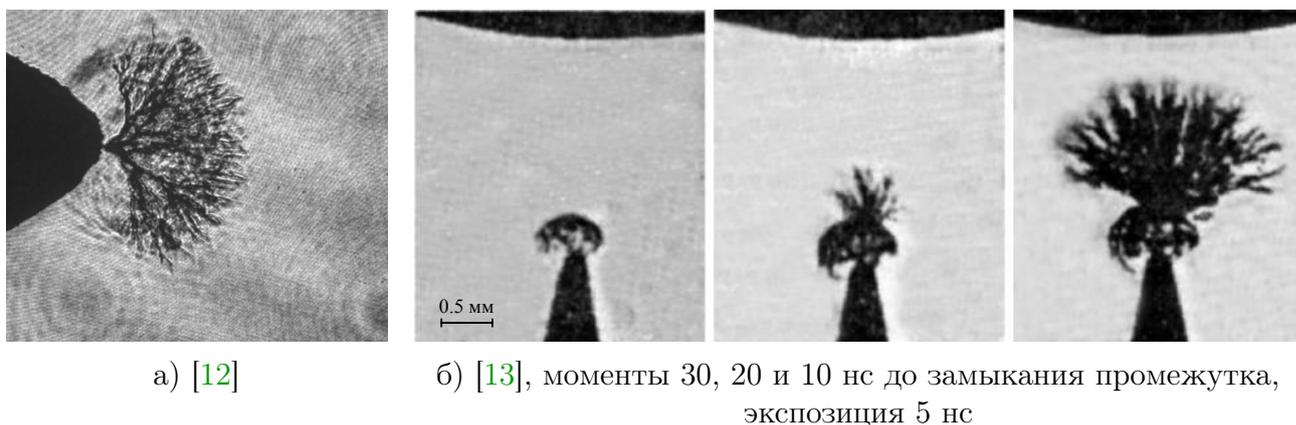
зоне. Такой механизм инициации разряда наиболее вероятен для недегазированных жидкостей при приложении импульсов напряжения длительностью от десятых долей до десятков микросекунд.

Второй механизм инициации — микровзрывной, характеризуется следующими этапами его развития: эмиссия электронов (в случае инициации на катоде) или ионизация молекул жидкости (при инициации на аноде); сильный локальный разогрев жидкости токами появившихся носителей заряда и её взрывное вскипание; образование ударной волны; взрывное вскипание жидкости за фронтом ударной волны; ионизация в парогазовых пузырьках; инициация канала разряда. Наиболее подробно микровзрывная модель изложена в работах Е.Е. Kunhardt и Н.М. Jones [10; 11], а её последующий анализ — в [4]. Данный механизм реализуется при высоких значениях напряженности электрического поля вблизи поверхности высоковольтного электрода, малых радиусах скругления электрода, и, как правило, в коротких межэлектродных промежутках.

Количественные оценки полного времени задержки пробоя основываются на оценке времени появления хотя бы одного парового пузырька, возникающего при взрывном вскипании жидкости вблизи поверхности электрода. Для его оценки используется формула Деринга-Фольмера, связывающая частоту зародышеобразования среди прочего с температурой перегретой жидкости и внешним давлением. Именно эти два параметра являются основными и рассчитываются в модели с привлечением экспериментальных данных для давления. Расчет температуры производится на основе скорости энерговыделения в приэлектродной области, которая определяется плотностью тока носителей заряда. Появление самих носителей заряда объясняется в модели туннельным эффектом, вероятность которого рассчитывается отдельно для обеих полярностей разряда. Количественным критерием оценки возможности реализации такого механизма служит величина объемного энерговклада, необходимого для реализации взрывного вскипания.

Однако регистрируемые экспериментально токи несколько превышают возможные токи автоэмиссии, что требует поиска и введения дополнительных механизмов проводимости. Одним из них может быть «протонный» механизм проводимости, в котором протон H^+ образует с молекулой воды ион гидроксония — комплекс H_3O^+ , а далее происходит его обмен между «правильно» ориентированными молекулами воды как некоторое подобие «дырочной» проводимости в полупроводнике.

Говоря о первых двух механизмах инициации следует отметить, что к появлению начального пузырька, из которого в обоих механизмах происходит дальнейшее развитие разряда, может приводить и кавитация, вызванная электрострикционными силами. В экспериментах [14] в деионизованной воде наблюдалась ситуация, когда к концу действия короткого импульса напряжения (30 нс) положительной полярности с крутым передним фронтом (1–2 нс) вблизи тонкого острия анода (радиус острия 2 мкм) образовывался пузырек с видимым диаметром порядка 5 мкм, динамика роста которого затем фиксировалась во времени. Феноменологическое объяснение [14] дано с позиции электрострикционных сил, возникающих в воде вблизи острия при столь коротких временах воздействия. По собственным оценкам авторов энергии, вложенной к моменту появления пузырька, вполне достаточно



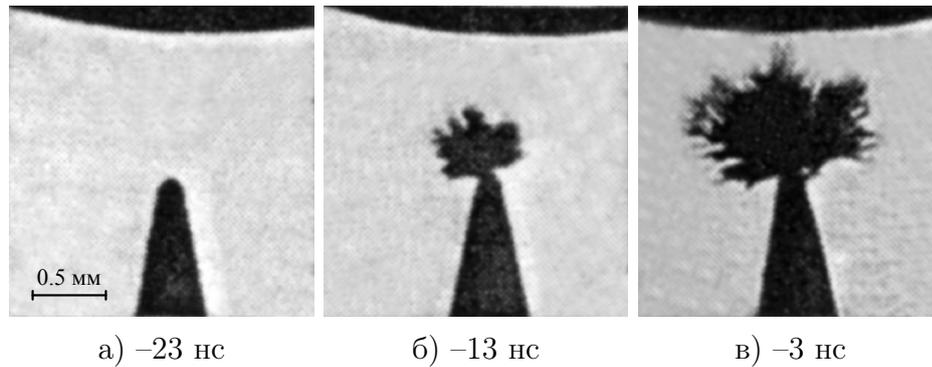
Рост канала с анода.

Рисунок 1.1 — Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как микровзрывная

для вскипания жидкости в наблюдаемом объёме, однако отсутствие ударных волн на временах, меньших гидродинамических, которые всегда сопровождают появление «вскипающих» пузырьков [15; 16], говорит в пользу иного механизма формирования пузырька, например электрострикционного. Для количественной оценки возможности образования кавитационной полости под действием электрострикционных сил в [17] проведен расчет, в том числе, величины возникающего отрицательного (растягивающего) давления в прианодной области. Полученные значения (25–35 МПа) согласуются со средним экспериментально определенным значением 24 МПа ([18]) давления, необходимым для нарушения сплошности воды. В [17] также численно продемонстрировано влияние зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля на распределения давления и скоростей возникающих течений (по направлению к электроду) и амплитуды их максимальных значений.

Третий механизм инициации разряда — ионизационный. Для его реализации перенапряжение на электродах должно быть сверхвысоким, а время нарастания напряжения очень коротким, порядка 10^8 В/см и 10^{-9} с соответственно. При этом происходит ионизация непосредственно молекул жидкости (за счет ударной или автоионизации) и не наблюдается предварительного фазового перехода. Внешнее отличие развившихся каналов разрядов, инициация которых предполагается по смешанному и чисто ионизационному механизмам, продемонстрировано, например, в [13] (рисунки 1.1 и 1.2). Кроме внешнего вида, развитие по ионизационному механизму отличается крайне высокой скоростью распространения каналов — до 200 км/с [13].

Ионизационный механизм — один из самых сложных как для экспериментального наблюдения, так и для расчетно-теоретических исследований. Качественное влияние данного механизма на форму уже развившегося канала было также показано в [13] (рисунок 1.2), а новаторские попытки зарегистрировать ионизационные процессы на стадии до возникновения фазовых переходов при экстремальных условиях (220 кВ, длительность переднего фронта напряжения 150 пс, длительность импульса не более 12 нс) были предприняты в [19] (рисунок 1.3).

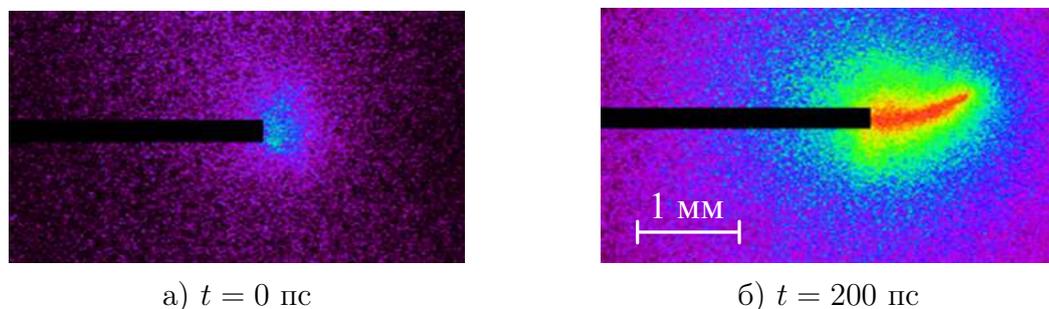


Рост канала с анода, межэлектродное расстояние 1 мм, интервал между кадрами 10 нс, в подписях время указано относительно момента замыкания промежутка.

Рисунок 1.2 — Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как ионизационная [13]

Качественного совпадения основных тенденций (ветвление канала, его фрактальная структура, зависимость структуры от напряжения) удалось добиться с развитием флуктуационной модели [20—22]. В ней авторами задавался пороговый критерий пробоя, т. е. считалось, что развитие канала в следующую точку межэлектродного пространства происходит, если напряженность поля в ней $E > E_0 + \delta$, где E_0 — некоторое характерное для вещества критическое значение, а δ — флуктуирующая добавка, отражающая стохастический характер пробоя диэлектрических жидкостей. В этой добавке математически учитываются разнообразные случайные процессы: локальные неоднородности жидкости, микрополя, связанные с ориентацией молекул и т. п.. Развитие структуры канала моделировалось при помощи «клеточных» автоматов. В настоящий момент флуктуационная модель дает качественное совпадение без возможности расчета подробной кинетики и свойств вещества в разрядных каналах, однако в приведенных работах авторы развивают и дополняют свою модель все новыми параметрами, что, в конечном счете, может привести к развитию полного представления и динамике ионизационного процесса.

Другой подход к моделированию ионизационного механизма развивается из представлений о стримере как о волне ионизации, т. е. сводится к решению транспортных уравнений, учитывающих механизмы зарождения и гибели носителей заряда в канале разряда.



Развитие разряда с анода. Скорость роста области с наибольшей интенсивностью свечения 5000 км/с. Фото самосвечения (без подсветки) получены при помощи камеры 4Picos (*Stanford Computer Optics*) со встроенным микроканальным усилителем изображения.

Рисунок 1.3 — Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как ионизационная [19]

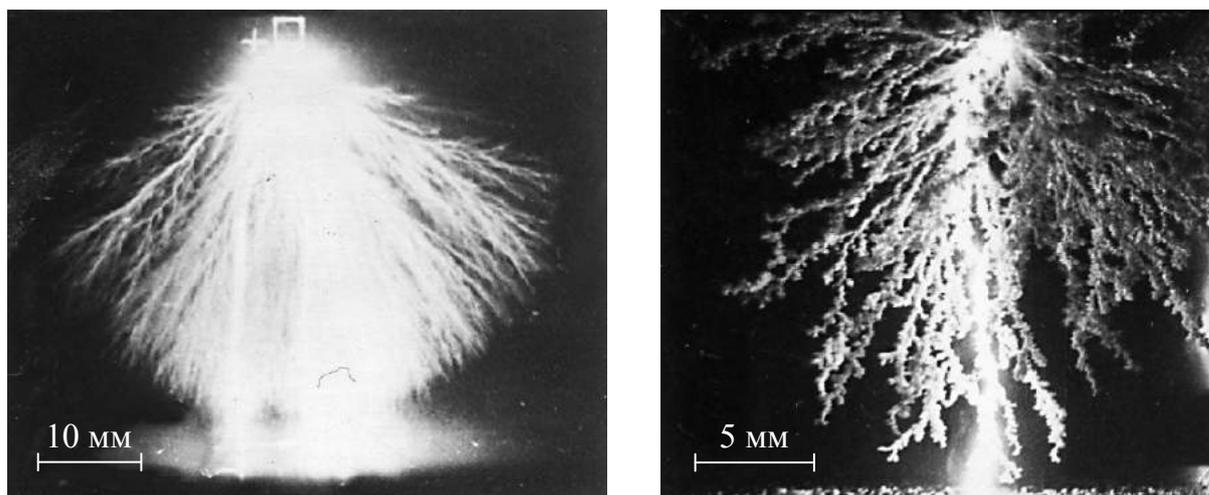
Поскольку жидкость, с одной стороны, гораздо плотнее газа и в этом смысле ближе к твердому веществу, а с другой — не обладает регулярной структурой, как и газ, то в русле этой двойственности возникло два подхода к моделированию стримера в качестве волны ионизации, которые отличаются закладываемыми механизмами возникновения носителей заряда. К первой группе относятся работы [23–25], в которых используется газовая аналогия ударной ионизации с поправочными коэффициентами, ко второй — работы [26–29], в которых появление носителей заряда обеспечивается туннельным эффектом на основе теории пробоя твердых диэлектриков Зеннера [30]. При получении количественных данных по обоим подходам большое значение играет выбор поправочных коэффициентов, а также коэффициентов рекомбинации. В [25] также удалось учесть влияние фазового перехода в основной части стримерного канала (позади головки стримера) на длину прорастания стримера, скорость и диаметр канала.

Четвертый, электротепловой механизм инициации, как правило, реализуется следующим образом: локальный разогрев жидкости вблизи высоковольтного электрода токами проводимости; фазовый переход в этой области; ионизация в образовавшейся парогазовой области; образование начального плазменного канала разряда. Такой механизм обычно реализуется при больших значениях произведения времени воздействия импульса напряжения и электропроводности жидкости. Поскольку длительность импульса напряжения редко превышает миллисекунду, проводимость жидкости должна быть достаточно большой для развития разряда по электротепловому механизму.

Исследованию разряда в жидкостях с повышенной проводимостью посвящено значительно меньше работ [5; 31–34]. Наиболее достоверные данные относятся к диапазону проводимости 100–10000 мкСм/см [31]. В качестве рабочей среды в [31] были выбраны водопроводная вода и водные растворы хлорида натрия. Показано, что с увеличением проводимости раствора (более 100 мкСм/см) ступенчатый процесс распространения (удлинения) канала разряда переходит в непрерывный. Остальные внешние признаки канала (структура, проводимость, интенсивность самосвечения) остаются схожими со случаем слабопроводящих жидкостей. Впервые был показан эффект полярности для проводящих жидкостей в резко неоднородном поле (геометрия электродов «острие–плоскость»). Оказалось, что в случае положительной полярности острия увеличение проводимости практически не сказывается на скорости распространения лидерного канала (имеется лишь слабая тенденция к уменьшению). Для отрицательной полярности этот эффект выражается, наоборот, в увеличении скорости распространения плазменного канала. Помимо эффекта полярности для скорости анодо- и катодонаправленные разряды отличают внешний вид и геометрическая структура лидерных каналов (рисунок 1.4).

Внешний вид анодонаправленного лидера представляет собой «пузырьковую» структуру, в отличие от «гладких» сильно ветвящихся каналов катодонаправленного разряда. Свечение катодонаправленного канала обладает существенно большей интенсивностью свечения.

Основываясь на [5; 32–34], описание разряда в проводящих растворах можно дополнить следующим: 1) замыкание разрядного промежутка при проводимости раствора



а) разряда с анода

б) разряд с катода

Рисунок 1.4 — Внешний вид анодо- и катодонаправленных лидеров в водном растворе NaCl, проводимость 14 мСм/см [4]

20–2000 мкСм/см в неоднородном поле и длинных промежутках происходит без образования сплошного предварительного газового мостика между электродами даже при воздействии длинными импульсами напряжения; 2) с увеличением проводимости падает вероятность наблюдения «быстрой» лидерной стадии, появлению плазмы в межэлектродном промежутке чаще всего предшествует образование парогазовой области, а при высоких значениях проводимости обычной лидерной картины разряда авторами [32; 33] не наблюдалось вовсе.

Отличительной особенностью механизма, который подразумевает возможность протекания больших предразрядных токов, является принципиальная возможность развития разряда с низкими скоростями роста канала. Однако работ, в которых бы они наблюдались, немного, их более подробный анализ приведен ниже, в разделе 1.1.3.

1.1.2 Развитие разряда в диэлектрических жидкостях

Говоря о структуре канала разряда в очищенной (дистиллированной или деионизованной) воде, следует выделять две характерные стадии разряда, каждая из которых характеризуется собственной структурой канала. Наибольшей воспроизводимостью структуры обладает разряд, развивающийся с положительного острия. Дальнейшее описание дано для этого случая. На начальной стадии инициации разряда в основном регистрируются образования, состоящие из большого числа отдельных тонких каналов. Огибающая этого образования напоминает конус («куст» или «гриб»). Каналы развиваются с дозвуковой скоростью. Диапазон напряжений и длин разрядных промежутков, в котором наблюдается развитие только обозначенной первичной фигуры и не происходит замыкание разрядного промежутка, лежит ниже прямой 1 на рисунке 1.5 [35]. Область графика между кривыми 1 и 2 соответствует области переходного режима, когда существует ненулевая вероятность развития первичной

формы канала в нитевидную, характеризуемую малым количеством боковых ответвлений и малой плотностью самих структур. Такая неплотная фигура, состоящая из нитевидных каналов, получила определение кустообразной разреженной. При увеличении амплитуды прикладываемого напряжения, в диапазоне между прямыми 2 и 3, форма разрядного канала не меняется качественно, однако возрастает плотность нитевидных структур, их боковые ответвления обозначаются более явно. Структура характеризуется как густая кустообразная. Качественное изменение происходит при переходе через прямую 3. При повышении напряжения в большей степени начинают сказываться различия длины и проводимости нитевидных структур. Один (реже несколько) из нитевидных каналов с наиболее благоприятными условиями (повышенной проводимостью и близостью его головки к противоположному электроду) получает развитие. Его проводимость растет, за счет чего увеличивается поле на головке канала и скорость продвижения к катоду. Такая форма канала получила название «древовидная».

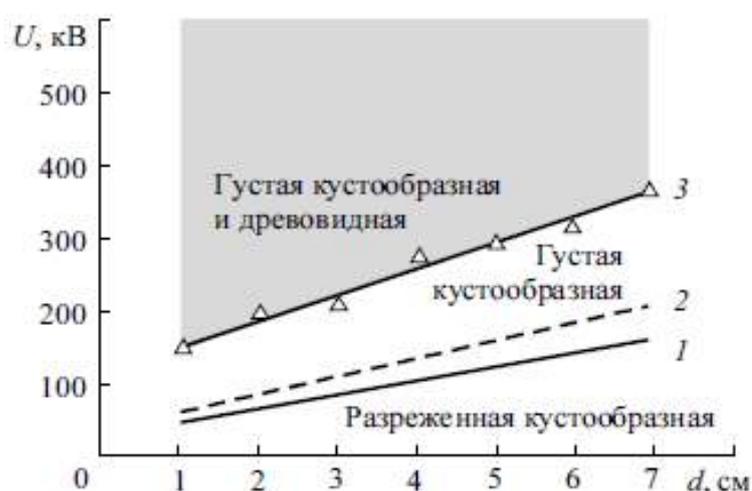


Рисунок 1.5 — Области формирования различных форм разрядного канала. Ось абсцисс – длина разрядного промежутка, ось ординат – напряжение на промежутке [4]

Описанные выше структурные образования являются общими для очищенной воды и большинства диэлектрических жидкостей. Однако следует упомянуть и другие наиболее важные формы разряда, характерные, в основном, для изоляционных органических жидкостей.

Разрядные структуры в диэлектрических жидкостях

Основная классификация разрядных структур была предложена французским коллективом под руководством О. Lesaint [36–38]. В самых общих чертах предпробойные явления в жидкости могут быть описаны как распространение светящихся каналов со скоростями от 100 м/с до 100 км/с. Их внешнее сходство с аналогичными структурами при разряде в газах привело к использованию «газовой» терминологии при описании наблюдаемых разрядных

структур уже в первых работах [1; 2]. Однако отсутствие понимания физических процессов, происходящих при образовании тех или иных разрядных структур в жидкости, которые сами авторы называли «стримерами», «лидерами», «короной», привело к разрастанию спектра реальных процессов, которые те или иные авторы обсуждали, используя одинаковую «газовую» терминологию. Здесь и далее до конца раздела будет использоваться термин «стример» для обозначения всех разрядных структур, наблюдаемых до момента замыкания промежутка. Однако в зависимости от внешнего вида и условий реализации к термину будет добавляться порядковый номер, обозначающий условный тип стримера, как это сделано в наиболее современной классификации, представленной в [3]. При этом не следует упускать из виду тот факт, что последовательность реальных физических процессов, приводящих к образованию структуры, напоминающей стример в газе, существенно отличается от аналогичной в газе и до конца еще не изучена.

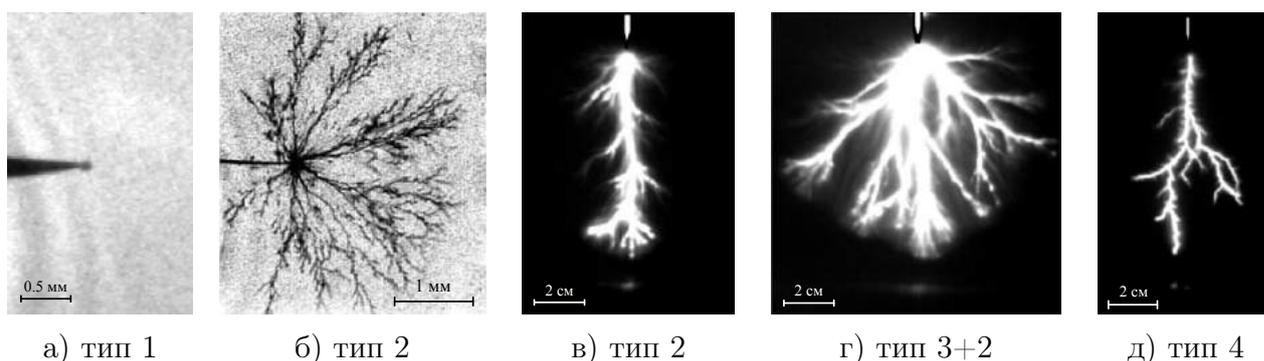
Несмотря на обширный накопленный экспериментальный материал до сих пор не удалось сформулировать физическую модель, на основе которой можно было бы с достаточной долей уверенности рассчитывать критические пробойные поля, как это делается в газе на основе закона Пашена. Не в последнюю, а возможно даже и в первую очередь это связано с возможностью фазового перехода в жидкости, которая и составляет одно из главных отличий. Образование областей с пониженной плотностью является обязательным условием распространения стримеров в жидкости (по крайней мере для стримеров, распространяющихся со скоростями до 10 км/с). Таким образом, учет термо- и гидродинамических явлений является обязательным для построения адекватной модели. Дополнительную сложность вносит неравновесность процесса фазового перехода с окружающей жидкостью при наносекундном масштабе времени, характерном для образования и распространения стримеров. В этом смысле исследование ударной ионизации, образования электронных лавин и транспортных явлений для газов существенно упрощалось при понижении давления — то есть при подходе, недоступном в жидкости.

Несмотря на всю сложность задачи описания и разработки физической модели в целом, существенный прогресс был достигнут в части классификации основных видов предразрядных стримеров, определения условий их реализации, а также в части их поиска в различных по своему химическому составу и физическим свойствам жидкостях.

Излагаемая ниже классификация была впервые предложена О. Lesaint в [38], получила активное развитие в работах под его руководством, а также была включена в наиболее современную монографию [4], посвященную разрядным явлениям в жидкостях. Она касается, в первую очередь, случаев положительных стримеров, развивающихся с анода. В основу положены экспериментальные наблюдения скорости и структуры распространяющегося канала.

Всего в классификации представлено четыре типа (режима) распространения стримеров. На рисунке 1.6 представлены характерные изображения для каждого из них, полученные в трансформаторном масле в широком диапазоне напряжений (от 6 до 424 кВ) и межэлектродных расстояний (от 6 мм до 10 см). В зависимости от условий скорость распространения стримеров менялась в диапазоне от 100 м/с на начальном этапе (рисунок 1.6a) при низком

напряжении и малой длине канала до 100 км/с в сильных электрических полях (рисунок 1.6д).



Значения средних скоростей, напряжений, и длин промежутков: а) 100 м/с, 6 кВ, 6 мм; б) 2 км/с, 30 кВ, 6 мм; в) 2 км/с, 160 кВ, 10 см; г) 10 км/с, 304 кВ, 10 см; д) 100 км/с, 424 кВ, 10 см.

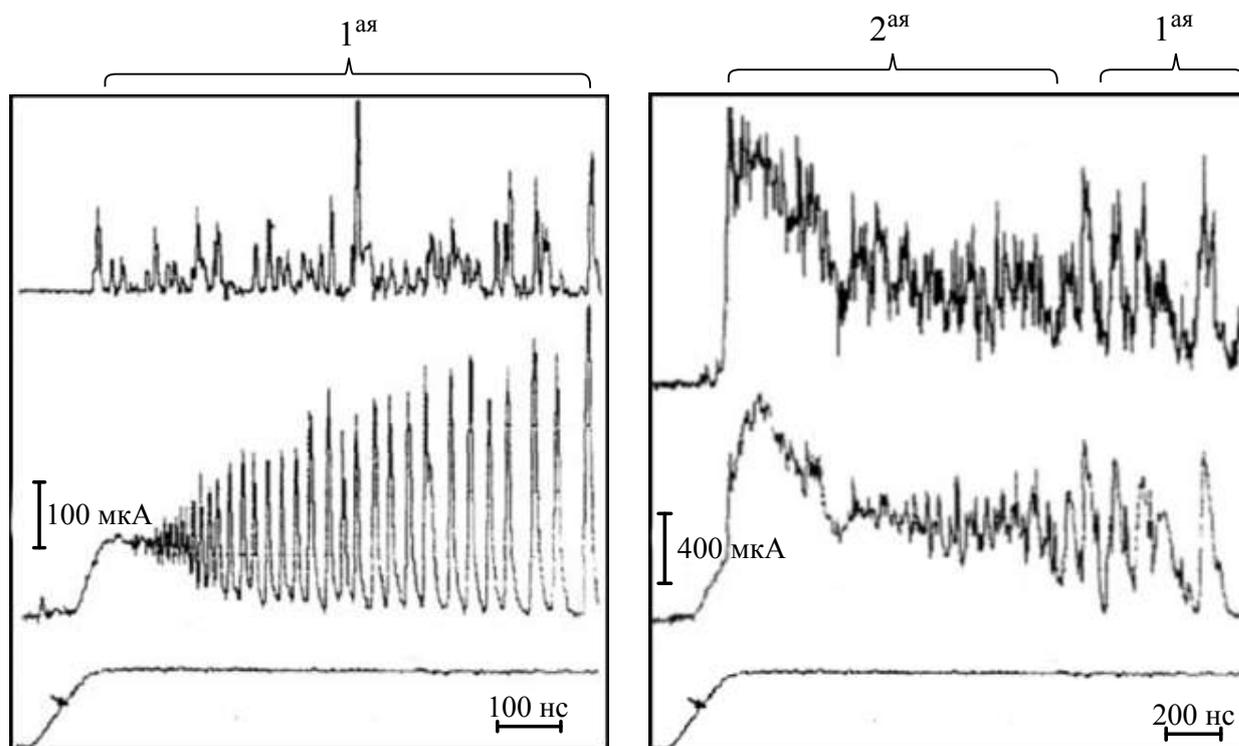
Рисунок 1.6 — Типы стримеров, реализующиеся при пробое жидких диэлектриков [3]

Фотографии в)–д) получены с применением усилителей изображения, экспозиция кадров соответствовала временам распространения стримеров. На шпирен-фотографиях а)–б) показаны газовые области, образованные зарождающимися и распространяющимися стримерами. Все типы стримеров обладают собственным свечением, однако его интенсивность существенно зависит от внешних условий (в первую очередь — прикладываемого напряжения). Для стримеров второго типа в зависимости от величины напряжения характерны две пространственные структуры. Структура первого типа обладает слабым собственным свечением, и её исследование невозможно без использования теневых методов. Структура второго типа преобладает в более длинных промежутках при, соответственно, большем напряжении но практически той же средней напряженности. Более быстрые стримеры (типы 3 и 4) наблюдаются в длинных промежутках. Свечение их центральных каналов существенно превышает свечение боковых, делая их, таким образом, неразличимыми при таком режиме съемки.

Характеристика стримеров 1-го и 2-го типов

Первый и второй тип стримеров а также переход между ними изучались авторами [39–41] в углеводородах. При низких напряжениях с острейшего электрода (радиус кончика порядка 1 мкм) развивается дозвуковой стример 1-го типа (скорость менее 1 км/с). Типичные осциллограммы напряжения, тока и интегрального свечения приведены на рисунке 1.7.

Инициация стримеров первого типа происходит при постоянном токе порядка 100 мкА, дальнейшее развитие стримера сопровождается наносекундными колебаниями тока с нарастающей амплитудой (рисунок 1.7а, средняя кривая). Свечение стримера слабое, на уровне шумов фотоумножителя (рисунки 1.7а, верхняя кривая, и 1.8а). При такой интенсивности излучения фоторегистрация структуры первого типа возможна только теневыми методами.

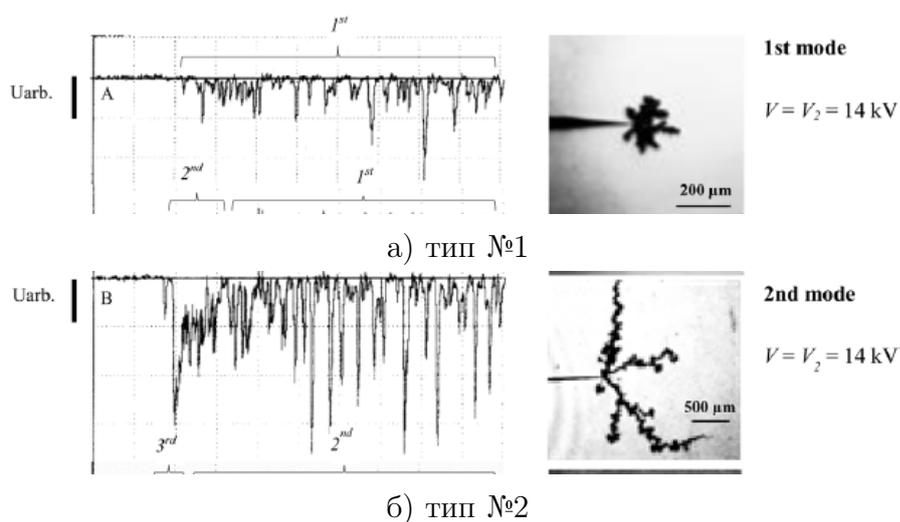


а) тип №1, напряжение 12 кВ

б) тип №2, напряжение 20 кВ

Рисунок 1.7 — Пример осциллограмм интенсивности свечения (верхняя кривая), тока (средняя кривая) и напряжения (нижняя кривая), характерных для различных типов положительных стримеров в циклогексане (межэлектродное расстояние 1.8 мм, радиус острия 1.2 мкм) [40]

Наблюдаемую форму, а вместе с ней и стример, в литературе ещё называют «медленной», «кустообразной», «дозвуковой» или «первичной».

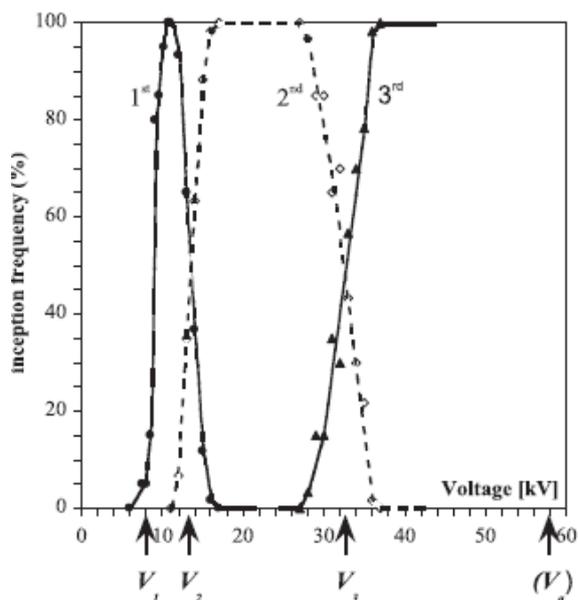


а) тип №1

б) тип №2

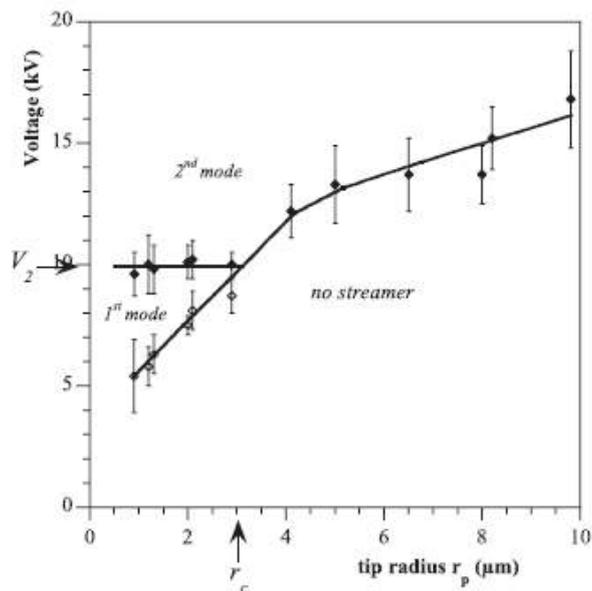
Рисунок 1.8 — Осциллограммы интенсивности свечения и пространственная структура стримеров различных типов в циклогексане (межэлектродное расстояние 6 мм, радиус острия 1 мкм) [3]

При увеличении напряжения происходит резкий переход к структуре второго типа. Появляются довольно длинные тонкие нитевидные каналы (рисунки 1.66 и 1.86) диаметром несколько единиц — десятков микрометров с характерной скоростью распространения



Длина промежутка 5 мм

Рисунок 1.9 — Распределение вероятности возникновения стримеров типа 1, 2 и 3 в циклогексане [3]



Геометрия электродов «острие–плоскость», длина межэлектродного промежутка 2.5 мм, длительность переднего фронта импульса напряжения 10 нс.

Рисунок 1.10 — Области существования стримеров типа 1 и 2 на диаграмме «напряжение–радиус электрода» [40]

на уровне 1–3 км/с. Ток, сопровождающий распространение более быстрых стримеров второго типа, существенно выше и имеет высокочастотные осцилляции на фоне постоянной составляющей, достигающей 1 мА. Интегральная светимость также существенно выше (рисунки 1.76 и 1.86). Переход по напряжению от первого типа ко второму носит вероятностный характер (рисунок 1.9)

Напряжение перехода, по данным [40–42], оказывается очень чувствительным к таким параметрам эксперимента, как радиус электрода и время нарастания напряжения. Проведенные авторами измерения позволили обозначить границы реализации 1-го и 2-го типов стримеров для напряжения и радиуса электрода (рисунок 1.10). Минимальное напряжение для инициации стримеров возрастает с увеличением радиуса. Стримеры первого типа наблюдаются в очень узком диапазоне напряжений и только вблизи очень острых электродов. Примечательно, что при значениях напряжения, больших V_2 , происходит переход ко второму типу вне зависимости от радиуса электрода, при этом существует критический радиус r_c , после которого не наблюдается стримеров первого типа.

Характерный продольный размер стримеров второго типа проявляет сильную обратную зависимость от гидростатического давления. Показательные результаты представлены для пентана [41] на рисунке 1.11. Пороговое напряжение V_2 (около 10 кВ), определяемое точкой пересечения аппроксимирующей прямой с осью абсцисс, и скорость распространения (порядка 3 км/с) остаются постоянными.

Таким образом, при использовании одной и той же геометрии электродов (острие–плоскость), параметр V_2 может рассматриваться как определяющий для механизма распростра-

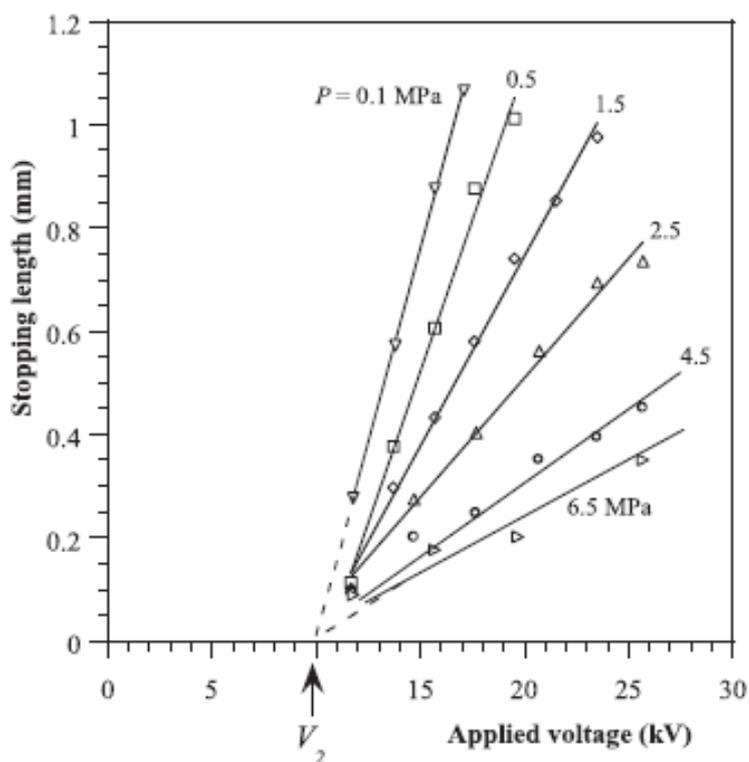


Рисунок 1.11 — Зависимость длины стримера типа 2 от амплитуды приложенного напряжения и гидростатического давления в незавершенном разряде в пентане [41]

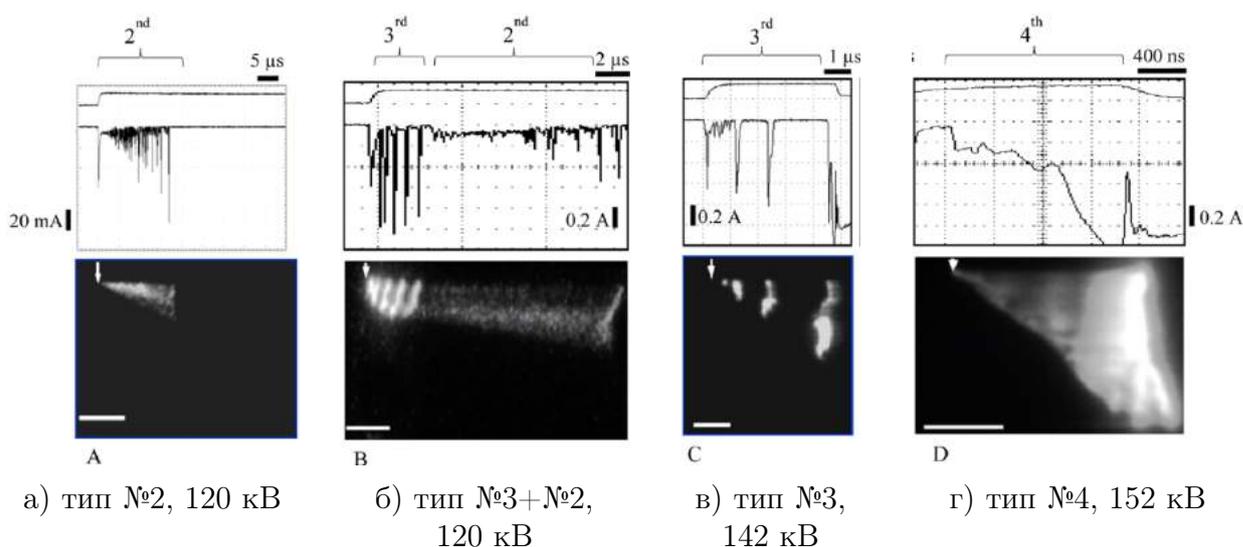
нения канала разряда, а также может выступать в качестве оценочного для исследования влияния тех или иных химических добавок к жидкости.

Характеристика стримеров 2-го, 3-го и 4-го типов в длинных промежутках

Второй тип стримеров наиболее часто реализуется в экспериментах и наблюдается в широком диапазоне длин промежутков (1–400 мм) в среднем диапазоне напряжений. Впервые он наблюдался в минеральном масле в работах [43; 44], а позднее и в эфирах [45–47].

На рисунке 1.12 представлены характерные осциллограммы тока и стрик-изображения для стримеров 2-го, 3-го и 4-го типов в рапсовом масле и его эфирах по данным [45] для разрядного промежутка длиной 10 см. Интерес к таким биоразлагаемым изоляционным жидкостям, обладающим повышенной пожаробезопасностью, вызван перспективностью их применения в качестве альтернативы минеральному трансформаторному маслу.

Стрик-изображения масштабированы таким образом, чтобы начало и масштаб по времени совпадали с осциллограммами тока. На рисунке 1.12a показан незавершенный разряд стримерами 2-го типа. Скорость их распространения оставалась постоянной (2 км/с) во время роста до максимальной длины (3 см). Первоначальный ток (порядка 5 мА) держится постоянным в течение нескольких микросекунд и далее сменяется серией коротких импульсов с нарастающей амплитудой. Такая осциллограмма тока (аналогичная представленной на



На осциллограммах: верхняя кривая — напряжение, нижняя кривая — ток.

Рисунок 1.12 — Распространение стримеров типов 2, 3 и 4 в рапсовом масле и его эфирах в промежутке 10 см [3; 45]

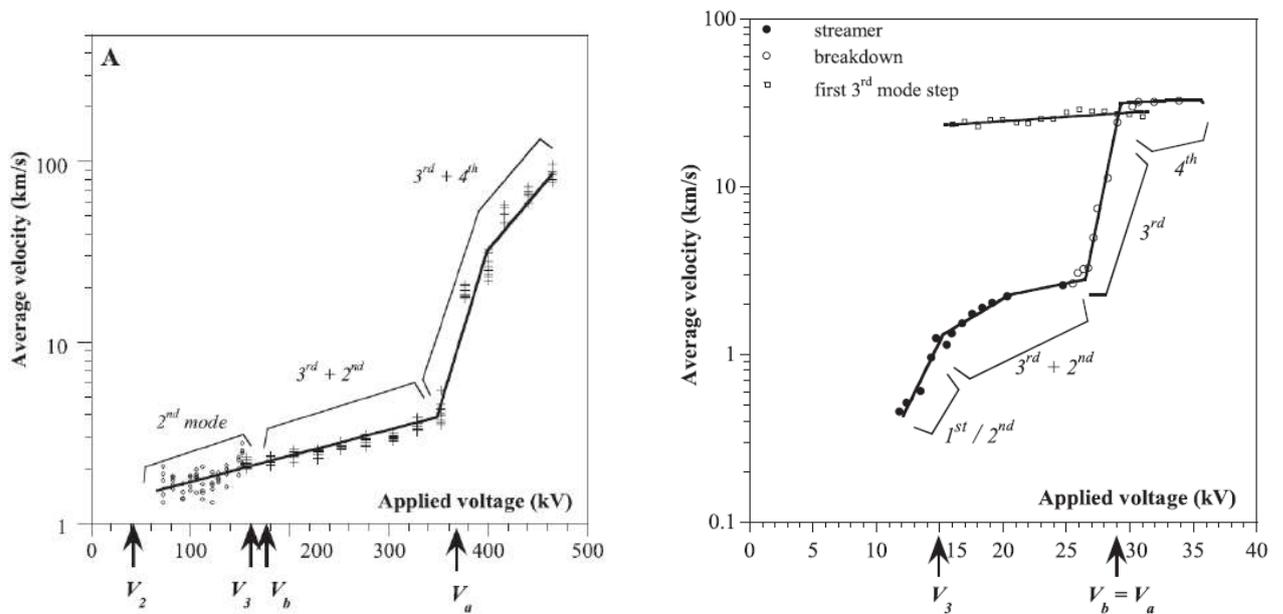
рисунке 1.76) характерна именно для второго типа, несмотря на существенные отличия в условиях эксперимента, и повторяется для широкого спектра жидкостей.

Начиная со значения напряжения V_3 , 3-й тип предшествует 2-му на начальном участке развития разряда (рисунок 1.126). На осциллограммах токах наблюдаются хорошо различимые импульсы с гораздо большей амплитудой (до 1 А), коррелирующие с яркими вспышками на стрик-изображениях. Удлинение светящейся области носит ступенчатый характер, а средняя скорость роста канала в таком режиме составляет более 10 км/с. После его остановки происходит трансформация ко второму типу и дальнейший рост осуществляется с дозвуковой скоростью.

Дальнейший рост напряжения приводит к исключению второго режима из предразрядных процессов. Развитие стримера происходит только по третьему типу (рисунок 1.12в), при этом на стрик-изображениях хорошо различимы менее яркая «ножка» канала, образовавшаяся на предыдущем импульсе тока, и более яркий участок нового стримера, соответствующий текущему токовому импульсу. Моментальная скорость роста во время токового импульса достигает 100 км/с, а средняя скорость растет с уменьшением интервалов «ожидания» между импульсами тока и увеличением прироста длины за один импульс.

При увеличении напряжения на $\sim 10\%$ относительно V_3 ступенчатый механизм 3-го типа трансформируется в непрерывный рост канала со скоростью ~ 120 км/с, которая слабо зависит от величины перенапряжения, входя, таким образом, в некоторое «насыщение».

Описанные типы стримеров наиболее различимы в сложных эфирах, но наблюдаются и в других неполярных жидких диэлектриках. Например, в трансформаторном масле все типы стримеров дополняются большим количеством ветвлений, что, усложняет процедуру их идентификации на стрик-изображениях. Напряжения перехода к 3-му и 4-му режимам превышают аналогичные значения для эфиров более чем в два раза. Скорость отличается не так сильно, и для 4-го режима составляет порядка 140 км/с [43]. На рисунке 1.13а при-



а) минеральное трансформаторное масло [44]

б) дистиллированная вода [48]

Рисунок 1.13 — Зависимость средней скорости распространения и типа стримера от амплитуды напряжения

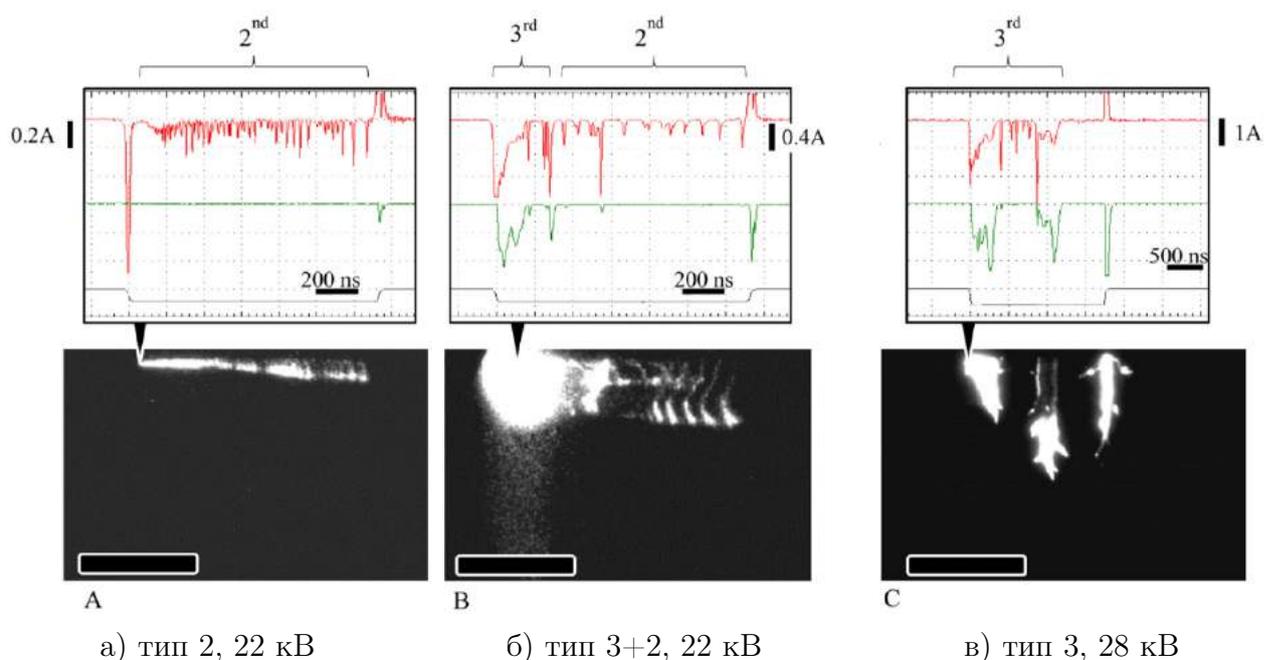
веден график зависимости средней скорости распространения стримеров разных типов от напряжения в минеральном трансформаторном масле на основе данных [44].

В воде, обладающей гораздо более высоким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon_v = 80$) и существенной, по сравнению с неполярными диэлектрическими жидкостями, низковольтной проводимостью, при определенных условиях также наблюдаются описанные выше типы стримерных структур. Систематические исследования были проведены авторами [4; 49; 50], однако спектр наблюдаемых разрядных структур оказался в целом шире, и связано это, по всей видимости, с большим количеством физических процессов, вовлеченных в развитие разряда.

На рис. 1.14 приведены изображения стримерных структур в деионизованной воде. В целом развитие стримеров в воде происходит при меньших значениях напряженности электрического поля по сравнению с углеводородами. Развитие стримеров 2-го типа (рисунок 1.14а) наблюдалось при напряжении 22 кВ. Переход от 2-го типа к 3-му менее выражен по напряжению и чаще встречается их совместное проявление, чем только 2-го типа отдельно. При повышении напряжения 3-й режим носит ярко выраженный ступенчатый характер (рисунок 1.14в). Примечательно, что в воде после прекращения импульса напряжения наблюдается «обратный» разряд вследствие нескомпенсированного объемного заряда головки стримера, который остаётся в жидкости. Общий вид зависимости скорости стримеров от напряжения (рисунок 1.13б) остаётся аналогичным случаю диэлектрических неполярных жидкостей.

В [48; 51] также отмечается эффект «насыщения» для скорости стримеров 4-го типа в воде при напряжениях свыше 30 кВ.

Несмотря на обширный экспериментальный материал, количественных измерений параметров плазмы внутри стримерных каналов по-прежнему не хватает. Единственным источником подобных данных становится математическое моделирование, которое активно ведется



Межэлектродное расстояние 3 см, радиус острия 1 мкм. На осциллограммах: верхняя кривая – ток, средняя кривая – интенсивность свечения разрядного канала, нижняя – напряжение на промежутке.

Рисунок 1.14 – Распространение стримеров разных типов в деионизованной воде [3; 49]

несколькими коллективами преимущественно из США, Европы и России. Наиболее глубокая проработка физических процессов, вовлеченных в распространение стримеров, таких как ударная ионизация в газовой части канала, перенос зарядов в жидкость, рекомбинационные процессы в газовой и жидкой фазах, дана в работах Г. В. Найдиса, Н. Ю. Бабаевой, М. J. Kushner [25; 52].

Трудоёмкость экспериментов и критическое влияние внешних условий на стримерную картину приводят к тому, что до сих пор нет набора достоверных и непротиворечивых данных о влиянии отдельных параметров при фиксированных или контролируемых прочих.

1.1.3 Особенности развития разряда в жидкостях с повышенной проводимостью

В [4] указывается на явный недостаток данных по развитию разряда в проводящих средах и по электротепловому механизму:

«Под электротепловым механизмом инициирования разряда будем подразумевать следующую совокупность явлений: протекание под действием приложенного поля тока высоковольтной проводимости – разогрев жидкости в приэлектродных областях с максимальной напряженностью поля – вскипание жидкости – ионизация паро-газовых полостей – формирование зачатка плазменного канала.»

Этот механизм может реализовываться при больших значениях произведения удельной электропроводности жидкости на длительность воздействия напряжения. Поскольку

при импульсных воздействиях напряжения длительность воздействия обычно не превосходит нескольких сотен микросекунд, то такой механизм иницирования наиболее вероятен в жидкостях с большой проводимостью – прежде всего в электролитах.

В соответствии с предлагаемой классификацией и, следуя логике, подсказываемой самой природой этого явления, попытаемся дать последовательное количественное (где это удалось сделать нам или другим исследователям) описание предразрядных и разрядных процессов либо ограничимся их физической интерпретацией. Исключение сделано для электротеплого механизма зажигания и развития разряда, ... Объясняется это тем, что авторы монографии практически не исследовали пробой жидкостей в режимах, отвечающих условиям электротеплого пробоя. Не обнаружены и соответствующие публикации за последние 15 – 20 лет. Расчетные модели и экспериментальные данные были опубликованы в ранних работах.»

В отличие от жидких диэлектриков, в которых протекание токов возможно только после начала ионизационных или автоэмиссионных процессов, выделение тепла в проводящей среде возможно под действием токов, обусловленных только начальной проводимостью. Таким образом, характерная для диэлектриков последовательность «ионизация и образование проводящей области под действием поля → протекание предпробойных токов → развитие разрядного канала» в проводящих жидкостях будет начинаться с протекания предпробойных токов, величина которых пропорциональна начальной проводимости. Дальнейший механизм развития разряда в значительной степени зависит от величины прикладываемого напряжения.

Сравнительно небольшое число работ посвящено исследованию механизмов электрического разряда в проводящих жидкостях. Так, количественные характеристики этого процесса даны в работах Руденко с соавторами, Кужекина, Ушакова [5; 31; 53], в работах зарубежных авторов Henry, Nakaо, Bernardes, Jones, Laubicki, Bruggeman [6; 54–58], а первые изображения были получены Мельниковым с соавторами [33].

Сводная информация об имеющихся в литературе данных приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Сводная таблица работ по пробую в проводящих жидкостях с указанием основных полученных результатов

Источник	Геометрия электродов	σ , мкСм/см	Основные характеристики									Варьируемые параметры					
			$d_{мэ}$, (мм)	$v_{ср}$, м/с	$U_{пр}$	Изобр.	$U(t)$	$I(t)$	$l(t)$	$D(t)$	T	U_0	σ	$d_{мэ}$	p		
Henry, [56]		1000–5000, (CuSO ₄)	15–80	$(2-3) \times 10^3$	–	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	–	$v_{ср}$	–
Мельников и др., [33]		60, 1000, 50000	5	1.5×10^3	–	✓	–	–	–	✓	–	–	–	–	–	–	–
Руденко и др., [53]		100–500 (техн. вода)	0.05–0.5	$(10-100) \times 10^3$	✓	–	✓	–	–	–	–	–	–	$\tau_{пр}$	–	–	–
Кужекин, [5]		250	10–300	$10-10^5$	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	$\tau_{пр}$	–	–	–
Naкао <i>et al.</i> , [6]		20–80000 (NaCl)	0.2–2	2–20	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	$U_{пр}$	–	–
Ушаков и др., [31]		1–20000 (NaCl)	0.15, 10	10×10^3	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	$U_{пр}, v_{ср}$	–	–
Bernardes <i>et al.</i> , [54]		10–66600 (NaCl)	1.14, 3	0.1–285	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	–	$U_{пр}, \tau_{пр}$	–	–
Jones <i>et al.</i> , [57]		150–1500 (NaCl)	1.1	$(20-60) \times 10^3$	–	–	–	✓	–	–	–	–	–	$\tau_{пр}$	$\tau_{пр}$	–	$\tau_{пр}$
Lubicki <i>et al.</i> , [58]		20–580 (CuSO ₄)	10	10×10^3	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–	$U_{пр}, \tau_{пр}, v_{ср}$	–	–
Bruggeman <i>et al.</i> , [59]		1–700 (KCl)	∞	–	–	✓	✓	✓	–	–	–	✓	–	–	$U_{ср}$	–	–

✓ – наличие соответствующих названию столбца данных в работе, указанной в столбце «Источник»

«–» – отсутствие соответствующих названию столбца данных

$v_{ср}$ – средняя скорость распространения канала разряда в направлении противоположного электрода, приводится авторами, либо рассчитывается по известным $d_{мэ}$ и $\tau_{пр}$

Изобр. – изображения разрядного промежутка во время действия напряжения

$U(t)$ – осциллограммы напряжения на разрядном промежутке

$I(t)$ – осциллограммы тока в цепи разрядного промежутка

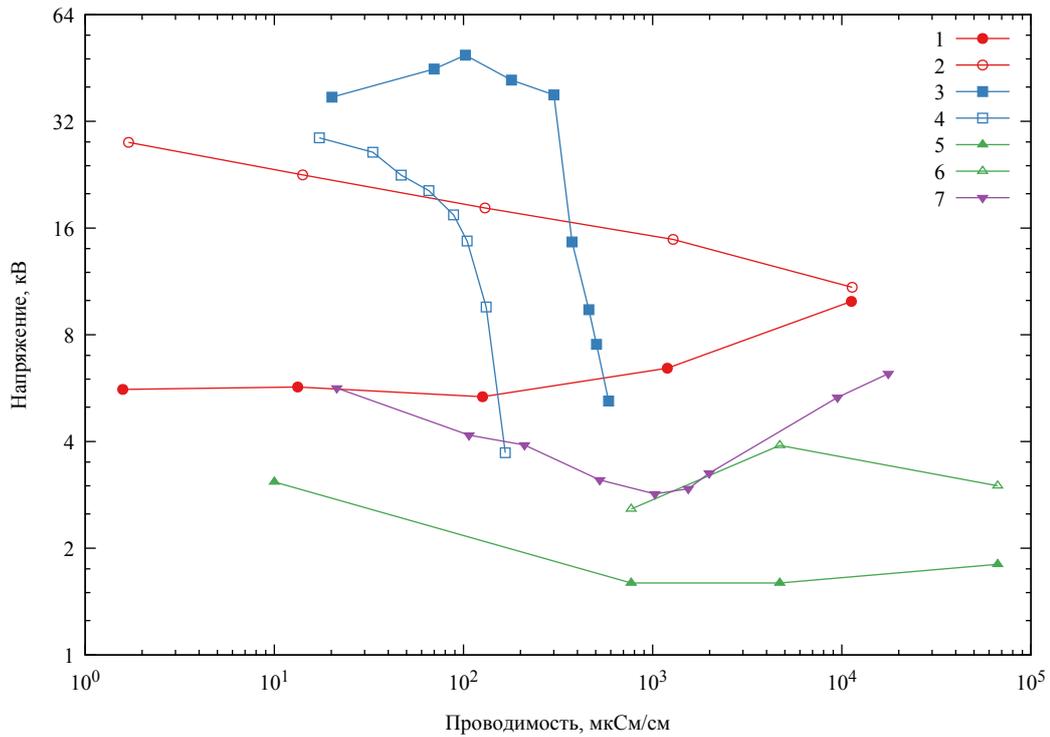
$l(t)$ – зависимость видимого размера канала разряда вдоль линии, соединяющей электроды (продольного размера)

$D(t)$ – зависимость видимого размера канала разряда поперек линии, соединяющей электроды (поперечного размера)

T – температура среды в канале разряда

U_0 – амплитуда импульса напряжения

p – давление в жидкости (без учета электрострикционной составляющей)



1. $d_{\text{мэ}} = 0.1$ мм, +О-П, по данным [31] 2. $d_{\text{мэ}} = 0.1$ мм, -О+П, по данным [31]
 3. $d_{\text{мэ}} = 10$ мм, +О-П, по данным [58] 4. $d_{\text{мэ}} = 10$ мм, -О+П, по данным [58]
 5. $d_{\text{мэ}} = 1.14$ мм, +ПС-П, по данным [54] 6. $d_{\text{мэ}} = 3$ мм, +ПС-П, по данным [54]
 7. $d_{\text{мэ}} = 1$ мм, -О+П, по данным [6]
 +О – положительное острие, +П – положительная плоскость, +ПС – положительная полусфера

Рисунок 1.15 — Зависимость $U_{\text{пр}}(\sigma)$ напряжения пробоя от проводимости раствора, по данным [6; 31; 54; 58]

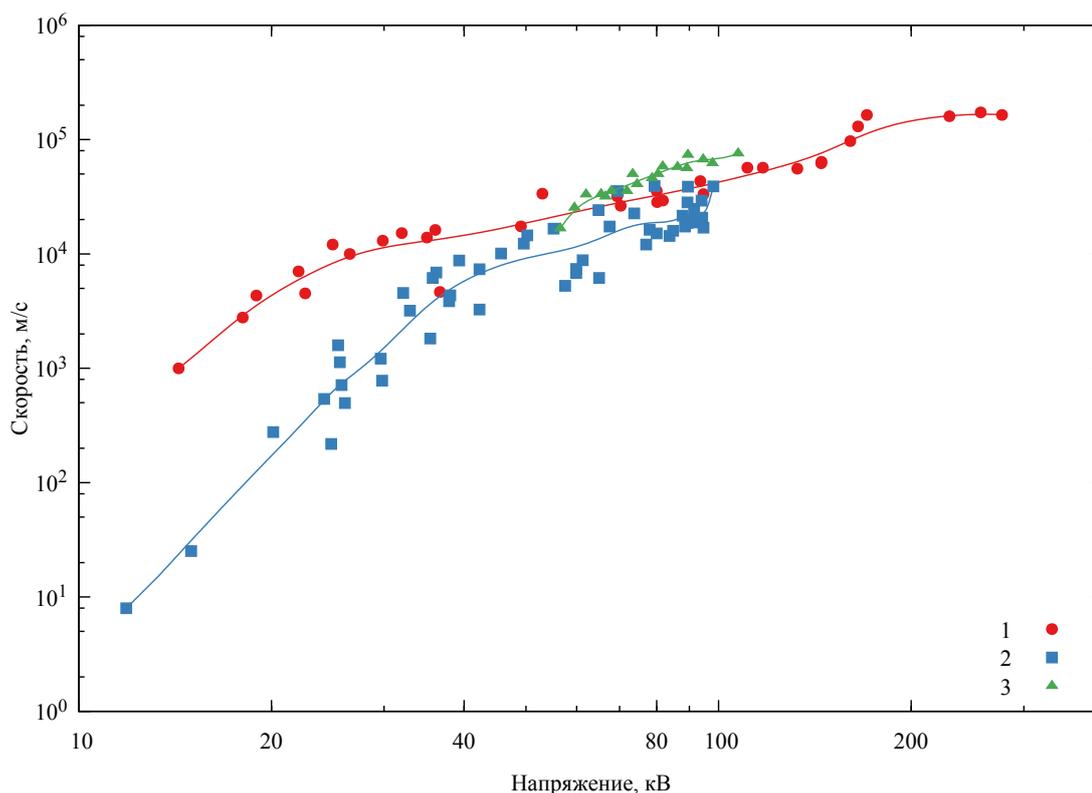
Рассмотренный в литературе диапазон значений проводимости растворов довольно широк — от единиц до десятков тысяч мкСм/см. При этом влияние проводимости на основные характеристики разряда изучалось только в работах [6; 31; 54; 57; 58]. Сравнение полученных данных о влиянии проводимости на напряжение пробоя $U_{\text{пр}}(\sigma)$ возможно только для геометрии «острие-плоскость» (рисунок 1.15) и не свидетельствует в пользу какой-либо одной формы зависимости. Можно отметить следующее:

- при отрицательной полярности острия (кривые 2, 4 и 7) в диапазоне значений проводимости 10–200 мкСм/см всеми авторами зарегистрировано снижение пробойного напряжения при увеличении проводимости;
- авторы [31] объясняют наблюдаемое снижение (кривая 2) интенсификацией образования газообразного водорода на катоде вследствие электролиза, которое приводит к усилению поля вблизи катода из-за образующегося после ударной ионизации водорода положительного объёмного заряда, в свою очередь авторы [6] никак не комментируют снижение напряжения (кривая 7), а зарегистрированный минимум с последующим ростом относят к особенностям использованной в экспериментах электрической схемы с ёмкостным накопителем энергии (0.5 мкФ), в которой скорость спада на-

пряжения увеличивается вместе с проводимостью, что приводит к необходимости увеличения напряжения;

- в [58] (кривые 3 и 4) значения пробойного напряжения в диапазоне $\sigma > 100$ мкСм/см несколько отличаются по смыслу от аналогичных при $\sigma < 100$ мкСм/см т. к. считывались с осциллограмм в точках непосредственно перед замыканием разрядного промежутка когда напряжения уже существенно ниже начального, в следствие чего могут считаться несколько заниженными и в целом повторяют аналогичные значения из [31] (кривая 2), несмотря на два порядка разницы в длине промежутков; механизм влияния проводимости на пробойное напряжение не обсуждается, а лишь предполагается уменьшение числа свободных электронов вследствие увеличения концентрации положительных ионов диссоциировавшей соли;
- кривые 1–4 для стримерно-лидерного механизма развития ожидаемо лежат выше кривых 5–7, соответствующих тепловому механизму развития разряда;
- при тепловом механизме развития эффект полярности, по-видимому, нивелируется, о чем свидетельствует аналогичный ход кривых 5–7;
- несовпадение кривых 5 и 7, несмотря на близкие значения $d_{мэ}$, может быть связано со значительным отличием величин ударной ёмкости (0.5 мкФ в [6] и 4–35 мкФ в [54]), тем более, что в [6] наглядно показано её влияние на $U_{пр}$.

Представленные в литературе изображения разрядных структур в целом не противоречат друг другу, однако не позволяют получить представление о хронологии развития разряда по тепловому механизму. Для стримерно-лидерного механизма при развитии разряда с положительного острия [31; 33] канал разряда представляет собой систему из центрального канала и набора боковых ответвлений, число которых увеличивается с ростом проводимости (60 мкСм/см в [33] против 100 мкСм/см в [31]). Разряд, развивающийся с отрицательного острия ([5; 31; 58]), демонстрирует обратную зависимость числа боковых ответвлений от проводимости, хотя в целом их количество остаётся значительно большим по сравнению с разрядом, развивающимся с положительного острия. При очень высоких значениях проводимости ($\sigma > 2000$ мкСм/см [56]) формирование центрального канала затруднено, по-видимому, быстрой релаксацией заряда на переднем крае развивающего канала, обусловленной сильной проводимостью среды. Таким образом, канал представляет собой светящуюся область (квазисферическую) с несколькими боковыми ответвлениями. В [5] автором были зарегистрированы времена задержки пробоя, соответствующие средней скорости распространения канала ~ 10 м/с, что значительно меньше значений, характерных для стримерно-лидерного механизма. Остальные значения скоростей (рисунок 1.16), рассчитанные автором настоящей работы на основе данных о $\tau_{пр}$, скорее всего, являются сильно заниженными, т. к. данные о времени запаздывания зажигания разряда приведены автором [5] для ограниченного набора экспериментальных условий. Тем не менее, изображения даны только для «быстрых» разрядов. Представленные в [6] изображения и временные характеристики также не дают однозначного представления о возможном механизме разряда. На рисунке 1.17 приведены распределения времен задержки пробоя $\tau_{пр}$ при разных значениях величины ударной ёмкости, построенные на основе данных [6]. Методика анализа подобных распределений приведена,



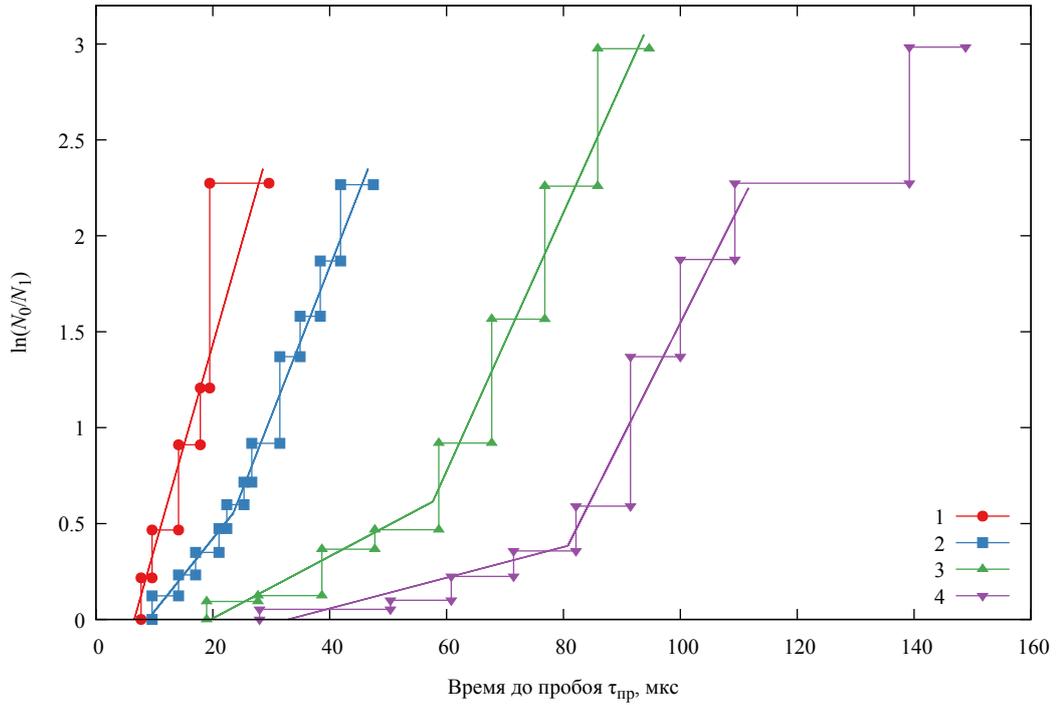
1 — проводимость 100–500 мкСм/см, промежуток 50–500 мкм [53]; 2 — проводимость 250 мкСм/см, промежуток 1–30 см [5]; 3 — проводимость (дистилл.)–1500 мкСм/см, промежуток 1.1 мм [57].

Рисунок 1.16 — Зависимость средней скорости распространения разрядного канала в воде от напряжения при проводимости до 1500 мкСм/см

например, в [4]. Результаты анализа, проведенного автором настоящей работы, приведены в таблице 2. Полученные значения скоростей лежат в диапазоне от 3 до 20 м/с, в котором невозможно развитие по стримерно-лидерному механизму. Однако на приведенных в [6] изображениях четко виден центральный канал, развивающийся из прианодной светящейся области (рисунок А.2 Приложения А). Динамика развития канала разряда при низких скоростях его распространения не представлена ни в одной работе. Полный набор изображений из [5; 6; 31; 33; 56; 58; 59] представлен на рисунке А.2 Приложения А.

Осциллограммы тока и напряжения на разрядном промежутке представлены в [6; 53; 54; 57–59]. Во всех работах эксперименты проводились без ограничения величины тока через разрядный промежуток, следствием чего являются малые времена развития разряда а также «переходный» вид осциллограмм. Отсутствие синхронизации с изображениями не позволяет сделать выводы о разграничении стадий развития разряда на осциллограммах. Сходством обладают осциллограммы в [54] и [58] (рисунок А.3 Приложения А). В обоих случаях наблюдаются начальная спадающая полка напряжения и значительный начальный ток.

В работах [5; 53; 57] исследовано влияние величины пробойного напряжения на время задержки пробоя $\tau_{пр}$ для жидкостей с проводимостью 150–1500 мкСм/см (рисунок 1.18). Точки массива 1 лежат в диапазоне времен, на один–два порядка превышающих времена для точек 2, что объясняется аналогичным отличием в длине разрядных промежутков. В [53; 57] исследования проведены в квазиоднородном поле, что позволяет получить зависимость



1 — 1 мкФ, 2 — 0.75 мкФ, 3 — 0.5 мкФ, 4 — 0.25 мкФ. Электродная система «полусфера–полусфера».

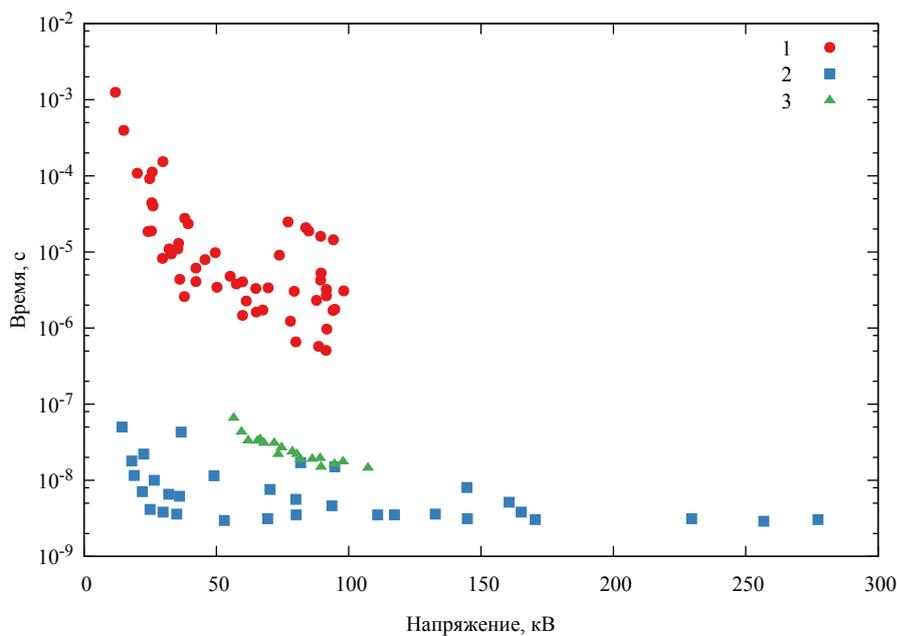
Рисунок 1.17 — Зависимость распределения полного времени задержки пробоя в координатах Лауэ от величины ударной ёмкости, построено по данным [6]

Таблица 2 — Результаты обработки графиков распределения времен задержки пробоя $\tau_{пр}$, построенных на основе данных [6]

Ударная ёмкость, мкФ	Коэффициенты первой аппроксимирующей линейной функции вида $y_1 = a + b \cdot x$		Коэффициенты второй аппроксимирующей линейной функции вида $y_2 = c + d \cdot x$		Время запаздывания зажигания $\tau_{зз}$, мкс	Время $\tau_{ф}$ формирования разряда, мкс	Средняя скорость распространения КР (на основе $\tau_{ф}$), м/с
	a	b	c	d			
	(std. ошибка, %)	(std. ошибка, %)	(std. ошибка, %)	(std. ошибка, %)			
1	-0.698 (40.2)	0.107 (16.0)	—	—	9.4	15.9	18.8
0.75	-0.337 (22.8)	0.038 (10.7)	-1.277 (18.7)	0.078 (8.8)	26.4	29.2	10.3
0.5	-0.318 (41.8)	0.016 (20.1)	-3.271 (22.7)	0.067 (14.5)	61.9	63.4	4.7
0.25	-0.263 (40.6)	0.008 (21.7)	-4.490 (22.9)	0.060 (17.7)	124.7	91	3.3

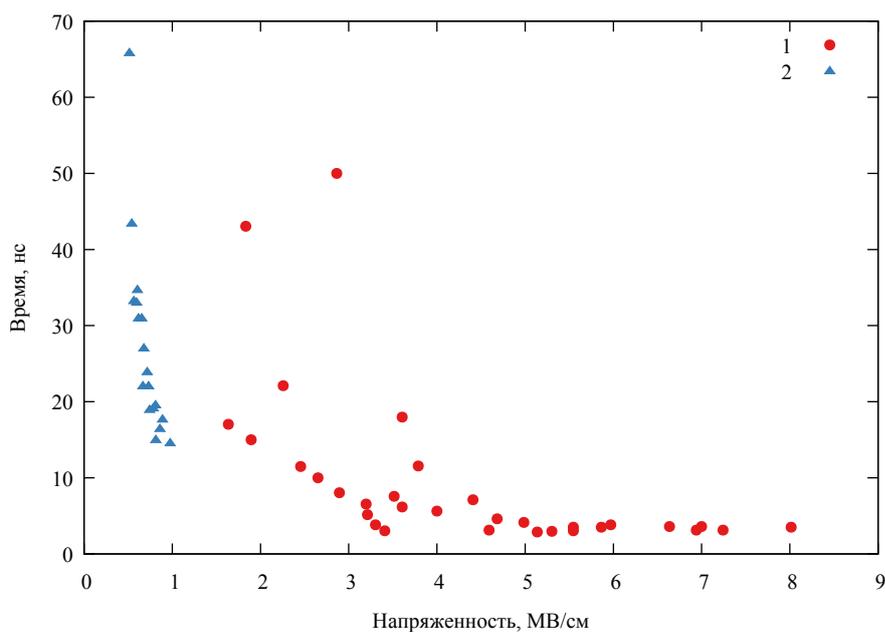
времени задержки пробоя $\tau_{пр}$ от напряженности поля (рисунок 1.19). При увеличении $d_{мэ}$ от 50 мкм до 1.1 мм величина $E_{пр.мин}$ уменьшается (при фиксированном $\tau_{пр}$), что, вероятнее всего, связано с увеличением времени $\tau_{зз}$ в коротких промежутках.

Анализ приведенных данных указывает на малую изученность медленного (теплового) механизма развития электрического разряда в проводящих жидкостях (электролитах). Остаётся неисследованной динамика очень медленного теплового пробоя и процессы, происходящие как в объеме жидкости, так и на электродах. В литературе не представлены



1 — проводимость 250 мкСм/см, промежуток 1–30 см [5]; 2 — проводимость 100–500 мкСм/см, промежуток 50–500 мкм [53]; 3 — проводимость (дистилл.)–1500 мкСм/см, промежуток 1.1 мм [57].

Рисунок 1.18 — Зависимость времени до пробоя от напряжения



1 — проводимость 100–500 мкСм/см, промежуток 50–500 мкм [53]; 2 — проводимость (дистилл.)–1500 мкСм/см, промежуток 1.1 мм [57].

Рисунок 1.19 — Зависимость времени до пробоя от напряженности в промежутке с квазиоднородным полем

основные электрические характеристики таких разрядов, а также изображения динамики развития разрядного канала.

1.2 Двухфазные среды с мелкодисперсными твердыми частицами

ИЛИ развитие разряда во влажном песке.

Основной интерес к исследованию развития электрического разряда в гранулированных средах обусловлен потребностью в эффективных системах заземления. Промышленные системы заземления разрабатываются и устанавливаются с целью отведения перенапряжений и вызванных ими токов на землю. Однако исследования предыдущих лет показывают, что поведение заземляющих систем существенно отличается от расчетного [60], например, в случае перенапряжений при попадании молнии. Плотность наведенного тока у поверхности заземляющего электрода при этом настолько высока, что в грунте начинаются процессы ионизации.

Первым исследованием в этой области, вероятно, следует считать работу [61], выполненную в 1920-х годах. В работе исследованы вольт-амперные характеристики заглубленных в грунт стержней. В качестве тестовой нагрузки использовались трубки, заполненные водой, гальванизированные железные трубчатые электроды, а также импульсные ограничители напряжения (разрядники), соединенные последовательно с заземляющим электродом, которые подвергались импульсному воздействию.

Амплитуда импульсных токов достигала 1500 А, длительность фронта нарастания порядка 20–30 мкс. Для случая водной нагрузки ВАХ подчинялась линейному закону Ома. Однако в случае ограничителя напряжения ВАХ носила петлеобразный характер, импульсное сопротивление оказалось значительно ниже сопротивления протеканию переменного (50 Гц) тока. Эта разница объяснялась увеличением эффективной площади заземляющего электрода вследствие прорастания от него искровых каналов вглубь грунта. Это предположение получило развитие в последующих исследованиях поведения характеристик грунта под действием сильных токов.

Исследования были продолжены в лабораторных и полевых условиях, а также методами математического моделирования. Результаты основных полевых исследований приведены в работах [62–69]. Условно их можно разделить на четыре категории по видам использованных заземляющих электродов: вертикальные стержни, горизонтальные электроды, сеточные и других видов. Было обнаружено, что импульсное сопротивление уменьшается с увеличением амплитуды импульсного тока и всегда меньше сопротивления протеканию переменного (50 Гц) тока, величина отношения импульсного сопротивления к 50 Гц-ому сопротивлению (импульсный коэффициент) не зависит от времени роста импульса тока, а определяется только типом грунта и конфигурацией электродов. Импульсное сопротивление меняется слабо в случае хорошо проводящих грунтов, а импульсный коэффициент в них значительно меньше.

При протекании больших токов значительную роль начинает играть индуктивность. При горизонтальном расположении электродов глубина установки, как правило, меньше по сравнению с вертикальными электродами. Уменьшение сопротивления наблюдается уже при значениях тока порядка 150 А [70]. Ионизация в грунте, приводящая к уменьшению сопротивления заземляющего тракта, наблюдается как для горизонтально, так и для вертикаль-

но расположенных электродов. Этот эффект определяется, в основном, плотностью тока с электродов, которая, в свою очередь, зависит от проводимости грунта. Эффект уменьшения сопротивления наблюдается также и для сетчатых электродов, но в меньшей степени. Общей для всех типов электродов тенденцией является уменьшение импульсного сопротивления при уменьшении стационарного сопротивления. Таким образом, импульсное сопротивление практически не зависит от амплитуды тока. Это вполне укладывается в соотношение $E = \rho J$, где ρ — удельное сопротивление грунта. Пороговая напряженность электрического поля, необходимая для начала ионизации, выше для грунта с пониженным удельным сопротивлением. Для объяснения явления уменьшения сопротивления были предложены две основные модели увеличения проводимости грунта: за счет тепловых процессов и за счет ионизационных процессов [71—76]. В модели теплового разогрева грунта предполагается, что ток распространяется по жидкости (воде), содержащейся на поверхности частиц грунта. При этом происходит омический прогрев жидкости, рост её проводимости и уменьшение удельного сопротивления среды в целом. В зависимости от состава грунта и процента содержания воды значительный вклад может давать ионная проводимость. Как предполагается в [73; 74], при определенных условиях может происходить вскипание жидкости, приводящее к уменьшению проводимости грунта. Однако накопленный экспериментальный материал свидетельствует о том, что только описанный тепловой механизм не может приводить к наблюдаемым результатам. Большинство исследователей склоняется к ионизационной модели увеличения проводимости в грунте [72; 77], а ионизацию часто объясняют усилением поля в пустотах между гранулами грунта, в том числе из-за разницы величин диэлектрической проницаемости среды и воздушных пустот. Механизмы возникновения электрического пробоя и развития разряда в сложной дисперсной среде, которой является влажный грунт, могут отличаться от традиционного стримерно-лидерного механизма. Эффект воздействия электрического поля на вещество в диспергированном состоянии, намного выше, чем в однородном состоянии, из-за усиления поля на границах раздела фаз. Диэлектрические частицы существенным образом влияют как на инициирование электрического пробоя, так и на растекание больших импульсных токов. Знание и понимание этих процессов необходимо для совершенствования систем молниезащиты и для защиты оборудования передающих сетей от перенапряжений. Решение данной проблемы особенно актуально в настоящее время в связи с массовым внедрением в энергетику информационных и управляющих систем на основе микроэлектроники и микропроцессорной техники, которые имеют повышенную чувствительность к возникающим перенапряжениям. Другим важным направлением, для которого необходимы знания о механизмах нелинейного протекания тока и электрического пробоя в грунте, являются исследования строения земной коры с помощью мощных импульсов тока, генерируемых, например, взрывомагнитным генератором [78]. Величина перенапряжения на заземлителе непосредственно зависит от сопротивления системы «заземлитель-грунт». В настоящее время при оценке параметров перенапряжений за базовые значения принимаются расчетные и опытные данные по сопротивлению заземления, полученные при растекании низкочастотных слабых токов. При проектировании систем молниезащиты используется модель однородного распределения протекающих токов в грунте, а искрообразование учитывается по простей-

шей модели увеличения эффективного размера заземлителя [79]. Однако при возникновении в грунте плазменных каналов величина тока на защищаемых элементах может многократно превышать значения, рассчитанные по модели однородного растекания тока. Испытания заземлителей проводились при токах, в той или иной степени имитирующих ток молнии, в полевых условиях в различных грунтах [64; 80–82]. В зависимости от типа грунта при росте амплитуды импульса тока наблюдается заметное снижение удельного сопротивления грунта ρ и импульсного сопротивления заземления по сравнению с величиной ρ_0 , полученной при слабом постоянном токе [60; 83; 84]. Импульсное сопротивление заземления при токах несколько килоампер может уменьшаться более чем на порядок. При увеличении амплитуды импульсного тока начинается ионизация в грунте вблизи заземлителя, переходящая в искрообразование. Причиной ионизации является достаточно сильное электрическое поле $E = \rho j$, которое возникает при растекании в грунте импульсного тока с плотностью j . Упрощенная модель связывает уменьшение сопротивления заземлителя с увеличением его эффективного радиуса из-за процессов ионизации в грунте [79] при однородном растекании тока. Такой подход используется в настоящее время при расчете сопротивления заземления различных устройств. Задача о растекании импульсного тока аналитически решена только для линейных сред и электродов простейшей конфигурации. При больших токах вдоль поверхности грунта может распространяться плазменный канал, аналогично распространению скользящего поверхностного разряда [68]. Такой поверхностный разряд, как правило, возникает в слабопроводящих грунтах, и его длина может достигать нескольких сотен метров. До настоящего момента, развитие плазменных каналов в объеме грунта исследовалось мало. Характеристики заземлителей на нелинейной стадии растекания импульсного тока, когда начинается ионизация, зависят от плотности тока в грунте [68; 79]. Лабораторные исследования процессов растекания импульсных токов в грунте, характерных для токов молнии, возможны в случае сохранения плотности тока у поверхности заземлителя. Это позволяет при существенно меньших токах изучить физические процессы, характерные при реальном растекании тока молнии в грунте. В настоящее время исследовано изменение удельного сопротивления при искрообразовании в грунте вблизи заземлителя, определены критическая напряженность электрического поля и ток, при которых начинается ионизация [83; 84]. В существующей теории им в соответствие ставится радиус ионизации почвы. Современные представления о режимах работы заземляющих устройств, как отмечалось в [68], более чем скромные. Теория не может объяснить рассогласование между теоретическими значениями импульсных сопротивлений, вычисленных на основе радиуса ионизации, и опытными данными. Одной из причин этого является нелинейная зависимость напряженности электрического поля в грунте от плотности тока, даже в том случае, когда искрообразование не наблюдается. Этот эффект наиболее сильно проявляется в глинистых и торфяных грунтах [79; 83]. В песчаных грунтах начальный участок вольт-амперной характеристики практически линейный, что позволяет изучить влияние ионизационных процессов на импульсное сопротивление заземления. Во влажном грунте, обладающем начальной проводимостью, обусловленной содержащейся в нём водой, инициация разряда будет определяться процессами в воде. Это

позволяет объединить задачи исследования развития разряда в проводящей воде и во влажном грунте и предположить общность в механизмах их инициации.

Выводы по Главе 1

До настоящего времени не сформулировано единой теории пробоя жидкости. Рассматриваются либо пробой по газовому механизму, либо прямая ионизация в жидкой фазе.

Анализ литературных данных показал, что при больших напряженностях поля порядка МВ/см представления о механизмах инициации и развития электрического разряда в жидкости в основном развиты для наносекундных и микросекундных разрядов в диэлектрических жидкостях, в которых разрядный канал распространяется с большой скоростью по стримерно-лидерному механизму, характерному для газовых разрядов.

Тепловой механизм развития разряда, характерный для жидкости с повышенной проводимостью, сопровождающийся фазовым переходом практически не исследован.

В настоящее время ведется активное численное моделирование разрядов в жидкости с искусственными микропузырьками для прикладных задач (в том числе для медицины), которое позволяет лучше понять механизмы инициирования разрядов в диэлектрических жидкостях по микропузырьковому механизму, однако не даёт представлений о переходе разряда из пузырьков в жидкость и дальнейшем развитии канала а также не позволяет оценить интегральные характеристики микропузырьковой среды с повышенной концентрацией газовых включений.

Глава 2. Экспериментальная установка

2.1 Схема установки

Для решения поставленных задач была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.1. В её состав входят следующие компоненты:

1. источник высоковольтный постоянного напряжения регулируемый, *Spellman SL100PN300*;
2. ключ механический высоковольтный маслонаполненный;
3. батарея конденсаторная $C_{уд}$;
4. разрядник газовый коммутирующий;
5. сопротивление балластное R_6 ;
6. делитель напряжения;
7. пробник высоковольтный пассивный, *Tektronix P6015A* (1000:1);
8. камера разрядная;
9. шунт токовый $R_{ш}$;
10. блок поджига газового разрядника;
11. генератор задержек/синхроимпульсов, *Berkeley Nucleonics BNC575*;
12. осциллограф цифровой запоминающий, *LeCroy HDO4054*;
13. фотокамера скоростная, *RedLake MotionPro X3*, *Photron SA-Z* или *Phantom v2012*;

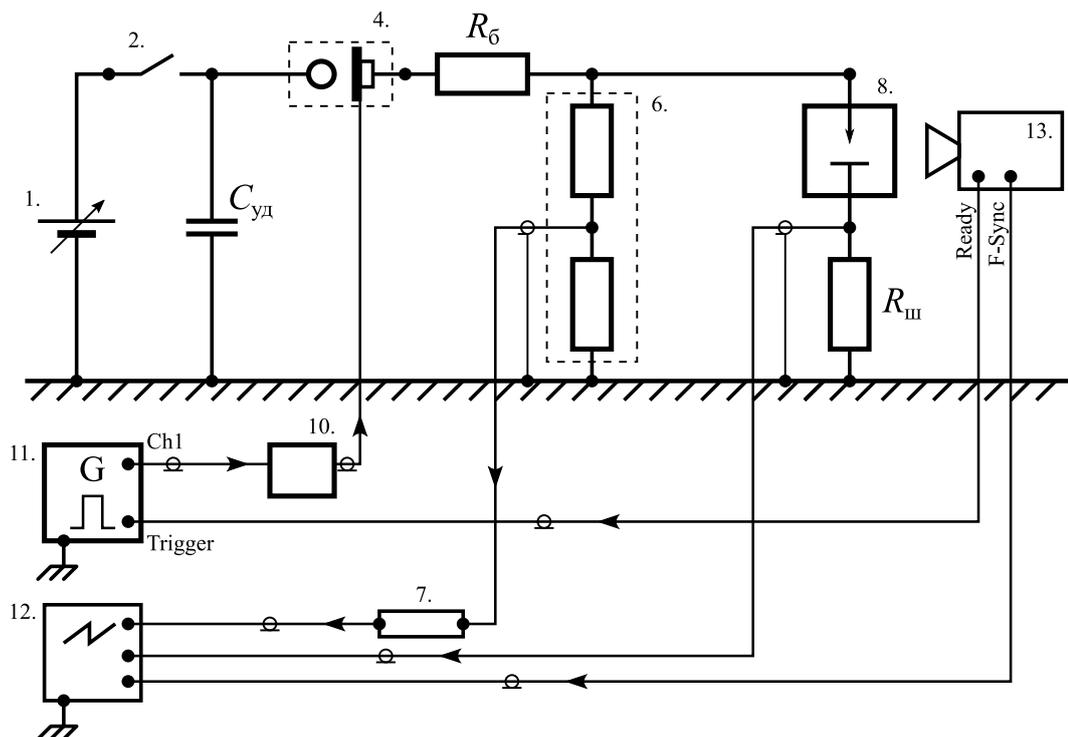


Рисунок 2.1 — Принципиальная схема экспериментальной установки

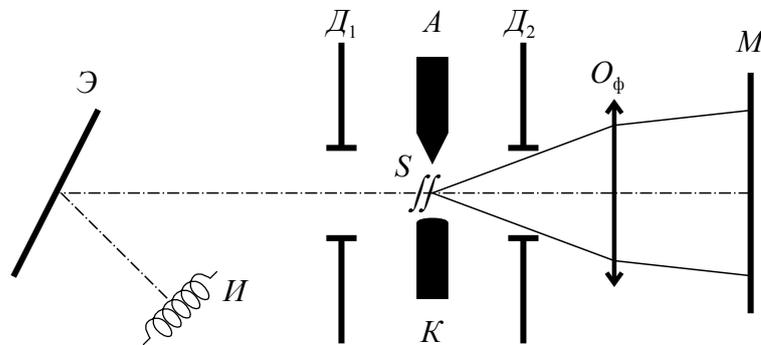
14. микроскоп (в качестве объектива камеры, на схеме не отмечен).

В зависимости от исследуемой среды в разрядный контур включалась одна из разрядных камер, описанных ниже в разделе 2.2.

Установка работает по следующему принципу. На первом этапе происходит зарядка конденсаторной батареи ёмкостью $C_{уд} = (0.8 \pm 0.1)$ мкФ до напряжения U_3 при помощи высоковольтного источника при замкнутом ключе (2). Зарядка происходит постоянным током. Затем источник отключается от разрядного контура ключом (2) с целью защиты выходных цепей источника. На втором этапе происходит синхронизированная инициация разряда в ячейке и запуск регистрирующей аппаратуры. Длительность фронта нарастания импульса напряжения составляет ~ 0.4 мкс.

В ходе эксперимента осциллографом регистрируются сигналы тока и напряжение на разрядном промежутке. Ток регистрируется косвенно, по величине напряжения на токовом шунте $R_{ш}$. Напряжение регистрируется на нижнем плече резистивно-ёмкостного делителя напряжения (6) с использованием дополнительного пассивного пробника напряжения (7).

С целью визуализации разрядных явлений проводилась фоторегистрация собственного свечения разряда. Предразрядные явления в жидкости, не обладающие собственным свечением, регистрировались теневым методом, в качестве источника света применялась нить накала лампы мощностью 100 Вт. Теневой метод исследования с использованием различных (импульсных и постоянных) источников подсветки зарекомендовал себя в качестве одного из основных для регистрации оптических неоднородностей, образующихся во время развития электрического разряда [4]. Поскольку основное внимание при проведении экспериментов уделялось регистрации фазовых переходов, возникающих при формировании канала разряда, и не ставилась задача регистрации слабых возмущений плотности, использовалась одна из простейших оптических схем (рисунок 2.2), в которой световой поток, создаваемый нитью накала I и рассеиваемый белым матовым экраном \mathcal{E} , через дополнительную прямоугольную диафрагму D_1 направлялся в межэлектродную область для освещения слаборасходящимся пучком света формирующейся оптической неоднородности S . Объектив фотокамеры O_ϕ (микроскоп) при этом сфокусирован на оси электродов. Для увеличения контрастности



I — нить накала; \mathcal{E} — экран матовый рассеивающий белый; D_1, D_2 — диафрагмы прямоугольные, установленные, соответственно, перед и за разрядной ячейкой; A — анод; K — катод; S — оптическая неоднородность; O_ϕ — объектив фотокамеры; M — КМОП матрица.

Рисунок 2.2 — Оптическая схема получения изображений разрядного промежутка с задней подсветкой

изображения использовалась дополнительная диафрагма D_2 , ограничивающая прохождение света вне области визуализации.

2.2 Разрядные камеры

В зависимости от исследуемой среды применялась одна из двух специально созданных разрядных камер.

Камера для исследования разрядов в жидких средах

Камера предназначена для исследования электрических разрядов в проводящей жидкости, в водо-спиртовых растворах, а также в жидкости с пузырьками газа. Камера выполнена из органического стекла и представляет собой кубическую ёмкость с внутренним объёмом $7 \times 7 \times 7 \text{ см}^3$. Электроды располагаются в центре камеры вертикально соосно. Один из них жестко закреплен на нижней стенке, а другой закрепляется в держателе на трехкоординатной подвижке, предназначенной для точной установки межэлектродного расстояния. На рисунке 2.3 представлена фотография камеры с закрепленным в держателе высоковольтным электродом (сверху) и заземленным электродом в нижней части камеры.

Основная часть экспериментов в жидкостях и газо-жидкостных средах была проведена с парой электродов «острие–штырь» (рисунок 2.4). «Острие» представляет собой латунный пруток с диаметром рабочей части 3 мм. Рабочий конец заточен на конус с полным углом при вершине 30° . Радиус скругления острия r_a после кондиционирования составляет (100 ± 30) мкм. Для закрепления в диэлектрическом держателе в верхней части электрод имеет резьбу $M5 \times 0.8$. «Штырь» представляет собой медный пруток диаметром 1.8 мм. Кромка рабочего торца скруглена небольшим радиусом. Полная длина изолированной части электрода, имеющей контакт с жидкостью, составляет 25 мм.

Камера для исследования разрядов во влажном грунте

Исследование разряда во влажном грунте в условиях, приближенных к реальным при попадании молнии в заземляющее устройство, требует значительно больших размеров и другого устройства разрядной камеры по сравнению с исследованием разряда в жидкости.

Принципиальная схема камеры и её фотография представлены на рисунке 2.5. В качестве ёмкости, заполняемой влажным песком, использовался цилиндрический бак диаметром

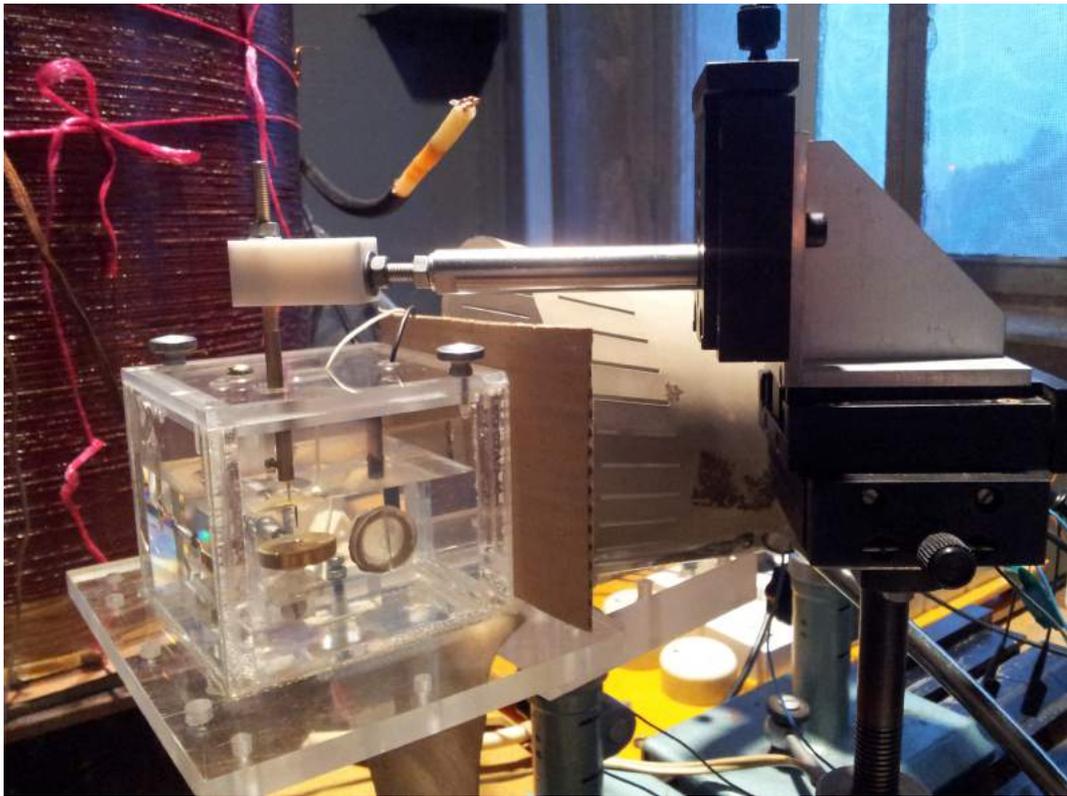
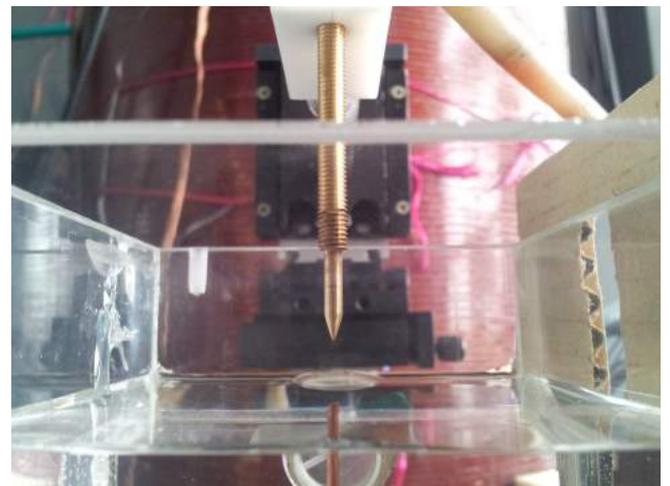


Рисунок 2.3 — Фото разрядной камеры для исследования ЭР в проводящих жидкостях и трех-координатного держателя ВВ электрода



а) теньевая фотография в воде, видны рабочие концы электродов

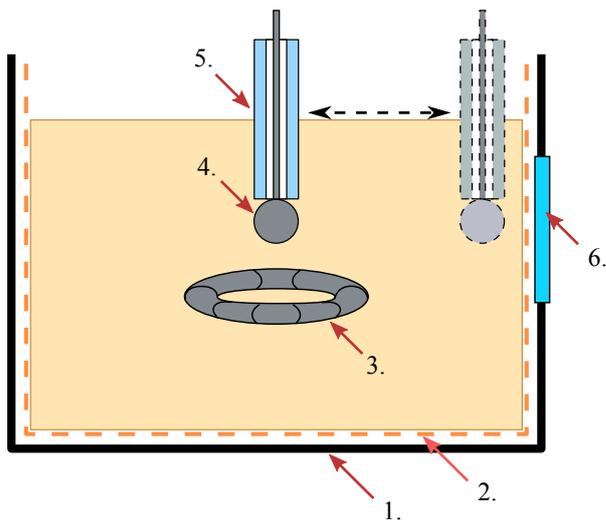


б) вид сбоку РК, анод над поверхностью воды, катод полностью погружен, справа видна часть диафрагмы D_1

Анод — в верхней части изображений, катод — в нижней.

Рисунок 2.4 — Электроды в разрядной камере для исследования ЭР в жидкости

60 см и высотой 80 см, выполненный из диэлектрического материала. Внутренняя поверхность бака покрыта латунной сеткой, соединенной через токовый шунт с шиной заземления и служащей в качестве одно из электродов при разряде. Высоковольтный электрод имеет составную конструкцию и закреплен в диэлектрической планке на верхнем торце бака. Рабочая часть электрода является сменной и закрепляется на конце стального стержня-держателя. С целью исследования влияния плотности тока на развитие разряда в работе использовались



а) принципиальная схема



б) фотография (сделать приличное фото с ВВ электродом)

На схеме: 1 — диэлектрический бак, 2 — латунная сетка, 3 — стальное кольцо, 4 — наконечник ВВ электрода, 5 — стеклянная трубка, 6 — смотровое окно.

Рисунок 2.5 — Разрядная камера для исследования ЭР во влажном грунте

стальные сферические наконечники различных диаметров: 1, 2, 3, 4 и 6 см. Стержень-держатель заключён в стеклянную трубку, изолирующую его от прямого электрического контакта с песком и окружающими элементами установки.

При исследовании завершенного разряда для ограничения области возможных направлений развития канала в качестве дополнительного низковольтного электрода использовалось стальное кольцо, устанавливаемое на необходимой глубине в грунте. В зависимости от размера области диаметр кольца варьировался в диапазоне 6–18 см.

Для фоторегистрации разрядных процессов в грунте стенка бака снабжена плоским смотровым окном, а электрод при этом располагается на минимальном расстоянии от него для достижения приемлемого уровня яркости изображения (рисунок 2.5а).

2.3 Схема синхронизации регистрирующей аппаратуры

Синхронизированный запуск фотокамеры, осциллографа и разряда реализуется следующим образом. Перед началом эксперимента фотокамера переводится в режим готовности начать запись. При этом на логическом ТТЛ выходе фотокамеры «Ready» устанавливается логический уровень «1» (+5 В). Команда на запуск эксперимента поступает с управляющего персонального компьютера на фотокамеру по интерфейсу Ethernet, при этом уровень сигнала «Ready» переходит в нижнее положение. Данный переход является запускающим событием для генератора задержек, запускающий вход («Trigger In») которого соединен с камерой через выход «Ready». После запуска генератор задержек с заданной задержкой Δt_s устанавливает на своём выходе «ChA» высокий логический уровень, являющийся запускающим событием для газового коммутирующего разрядника. Величина задержки Δt_s выбирается

таким образом, чтобы момент коммутации лежал в пределах времени экспозиции первого регистрируемого фотокамерой кадра. Для регистрации моментов экспозиции кадров выход фотокамеры «F-Sync» соединен с одним из входов запоминающего осциллографа. Взаимное расположение сигналов во времени иллюстрируется рисунком 2.6.

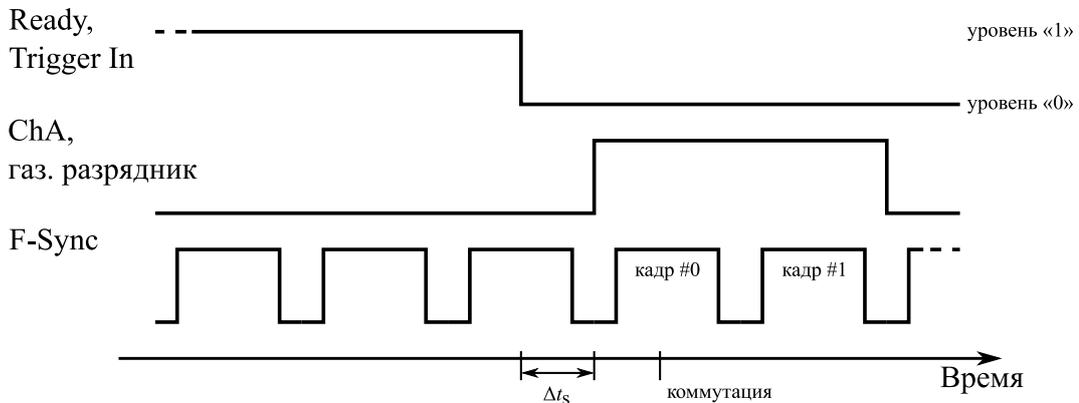
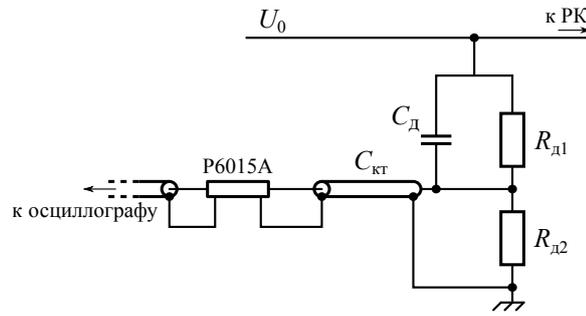


Рисунок 2.6 — Последовательность синхроимпульсов при запуске элементов системы регистрации и ЭР

При соотнесении изображений, полученных скоростной фотокамерой, с осциллограммами напряжения и тока также необходимо учитывать, что реальная экспозиция матрицы камеры может не совпадать во времени с сигналом «F-Sync». Для фотокамер, использованных в настоящей работе, эта неопределенность не превышает 500 нс.

2.4 Методика измерений импульсных напряжения и тока

Регистрация напряжения на разрядном промежутке велась при помощи резистивно-ёмкостного делителя напряжения, включенного в электрическую цепь параллельно разрядной камере. (см. схему на рисунке 2.7). Резистивная часть делителя собрана из безындуктивных резисторов типа ТВО. Верхнее плечо ёмкостной части состоит из двух одинаковых конденсаторов C_1 и C_2 типа КВИ-2 100 пФ $\pm 20\%$, нижнее плечо образует ёмкость коаксиального кабеля марки РК50-7-11, подводящего измеряемое напряжение к точке подключения пассивного пробника P6015A, длина $l_{\text{кн}}$ которого составляет 3.4 ± 0.1 м и измеряется рулеткой. При погонной ёмкости $C_{\text{кн}} = 100 \pm 7$ пФ, определяемой волновым сопротивлением $Z_{\text{к}} = 50 \pm 3$ Ом (согласно [85]) общая ёмкость кабеля $C_{\text{кн}}$ составляет 340 ± 17 пФ. Ёмкость кабеля может считаться сосредоточенной, т. к. предварительные тестовые эксперименты показали, что характерные времена наблюдаемых в эксперименте переходных процессов, таких как коммутация газового разрядника, спад напряжения во время формирования разрядного канала и т. п., много больше времени распространения сигнала по такому кабелю в оба конца, которое составляет $2l_{\text{кн}}/(1.52c) \approx 35$ нс (коэффициент укорочения волны 1.52 [86]). Контроль величин $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$ осуществлялся поверенным цифровым мультиметром *Fluke* 289. Величина $C_{\text{д}}$ и её максимальное отклонение определялись на основе данных производителя. В табли-



- $R_{д1}$ — сопротивление высоковольтного плеча делителя
 $R_{д2}$ — сопротивление низковольтного плеча делителя
 $C_{д}$ — ёмкость высоковольтного плеча
 $C_{кт}$ — ёмкость коаксиального кабеля, составляющая низковольтное плечо
 P6015A — пассивный высоковольтный пробник напряжения *Tektronix* P6015A
 ПК — разрядная камера

Рисунок 2.7 — Схема для измерения импульсного напряжения на разрядной камере с помощью резистивно-ёмкостного делителя напряжения

це 3 приведены параметры резистивно-ёмкостного делителя напряжения и их погрешности: $K_{д1}$ — коэффициент деления ёмкостной части делителя напряжения, $K_{д2}$ — коэффициент деления резистивной части делителя напряжения.

Погрешность измерения амплитуды сигнала напряжения, вносимая пробником P6015A, согласно паспорту изделия не превосходит $\delta_{шт} = \pm 3\%$ для сигнала постоянного напряжения. При измерении амплитуды переходных процессов с длительностью менее 1 мкс дополнительно необходимо учитывать, что величина входного импеданса пробника падает на три порядка (до 100 кОм) при частоте 1 МГц, а фазовый сдвиг не превосходит $-\pi/2$, что эквивалентно 2.5 мкс. Погрешность измерения постоянного напряжения осциллографом *LeCroy* HDO4054, указанная в паспорте изделия, составляет $\delta_{осц} = \pm 0.5\%$.

Таким образом, при обработке осциллограмм напряжения использован следующий подход:

- время между двумя переходными процессами (быстрыми изменениями сигнала) определяется с точностью не хуже 1 мкс;
- при определении установившегося значения напряжения (например, на отдельных стадиях развития ЭР) используется следующее выражение: $U = \langle \text{показания осциллографа} \rangle / K_{д2}$. Погрешность измерения принимается равной $\delta_n = \pm \sqrt{(\Delta K_{д2} / K_{д2})^2 + \delta_{осц}^2 + \delta_{шт}^2} = \pm 3\%$ и определяется, в основном, погрешностью пробника напряжения.

Регистрация тока в цепи разрядного промежутка велась при помощи токового шунта, включенного последовательно с разрядной камерой, с низковольтной стороны 2.8. Шунт представляет собой резистор типа ТВО с сопротивлением $R_{шт} = (2.2 \pm 0.1)$ Ом. Шунт подключен к осциллографу коаксиальным кабелем марки РК50-2-11 длиной $l_{кт} = (5.4 \pm 0.1)$ м с погонной ёмкостью $C_{кп} = (100 \pm 8)$ пФ. Общая ёмкость кабеля $C_{кт}$ составляет (540 ± 40) пФ. Характерное время нарастания сигнала определяется временем зарядки $C_{кт}$ через балластное сопротивление $R_б$ и сопротивление разрядной камеры $R_{рк}$, заполненной исследуемой жидко-

Таблица 3 — Параметры резистивно-ёмкостного делителя напряжения

Величина	Значение	Формулы расчета величины и её погрешности
$R_{д1}$	(87.03 ± 0.06) кОм	—
$R_{д2}$	(10.120 ± 0.007) кОм	—
$C_{д}$	(50 ± 7) пФ	$C_{д} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ $\Delta C_{д} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C_{д}}{\partial C_1}\right)^2 (\Delta C_1)^2 + \left(\frac{\partial C_{д}}{\partial C_2}\right)^2 (\Delta C_2)^2}$
$C_{к}$	(340 ± 30) пФ	$C_{к} = C_{кп} \cdot l_{кн}$ $\Delta C_{к} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C_{к}}{\partial C_{кп}}\right)^2 (\Delta C_{кп})^2 + \left(\frac{\partial C_{к}}{\partial l_{кн}}\right)^2 (\Delta l_{кн})^2}$ $C_{кп} = \frac{10^4 \sqrt{\epsilon_{пэ}}}{3Z_{к}}$ $\Delta C_{кп} = \pm C_{кп} \frac{\Delta Z_{к}}{Z_{к}}$
$K_{д1}$	(0.17 ± 0.02)	$K_{д1} = \frac{C_{д}}{C_{д} + C_{к}}$ $\Delta K_{д1} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial K_{д1}}{\partial C_{д}}\right)^2 (\Delta C_{д})^2 + \left(\frac{\partial K_{д1}}{\partial C_{к}}\right)^2 (\Delta C_{к})^2}$
$K_{д2}$	(0.10417 ± 0.00009)	$K_{д2} = \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}}$ $\Delta K_{д2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial K_{д2}}{\partial R_{д1}}\right)^2 (\Delta R_{д1})^2 + \left(\frac{\partial K_{д2}}{\partial R_{д2}}\right)^2 (\Delta R_{д2})^2}$

стью, и составляет порядка 5 мкс. Погрешность измерения амплитуды сигнала складывается из погрешности измерения R_6 и погрешности осциллографа: $\delta_T = \pm \sqrt{(\Delta R_6 / R_6)^2 + \delta_{осц}^2} = \pm 5 \%$.

Таким образом, при расчете динамического сопротивления, как отношения моментальных значений напряжения и тока, погрешность его значения составляет: $\delta_{дс} = \pm \sqrt{\delta_H^2 + \delta_T^2} = \pm 6 \%$.

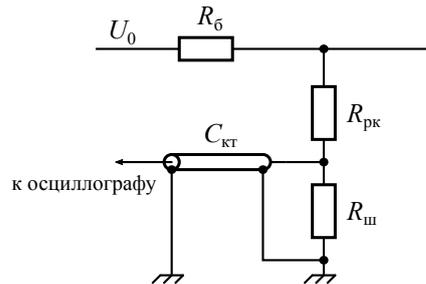


Рисунок 2.8 — Схема для измерения импульсного тока в цепи разрядной камеры с помощью токового шунта

2.5 Прочие измерения

Во время проведения экспериментов проводимость растворов измерялась кондуктометром *WTW VARIO Cond*. Точность измерений составляет $\pm(0.5\% + \text{один младший разряд})$.

При исследовании ЭР во влажном грунте его влажность регулировалась путем добавления воды с проводимостью ~ 300 мкСм/см к изначально сухому грунту в известной массовой пропорции. Для изменения влажности песок высушивался и процедура повторялась для нового значения массовой пропорции.

При работе с растворами изопропилового спирта величина коэффициента поверхностного натяжения измерялась при помощи тензиометра *KRÜSS K20*.

Выводы по Главе 2

Разработана и создана экспериментальная установка для исследования импульсного электрического разряда положительной полярности, обеспечивающая возможность проведения синхронизированной регистрации электрических параметров и фоторегистрации развивающегося разряда. Для работы с жидкими/газожидкостными и гранулированными (песчаными) средами создано две разрядные камеры. Для использованных методик измерения проведена оценка погрешностей.

Глава 3. Экспериментальные результаты

3.1 Развитие электрического разряда в проводящей воде

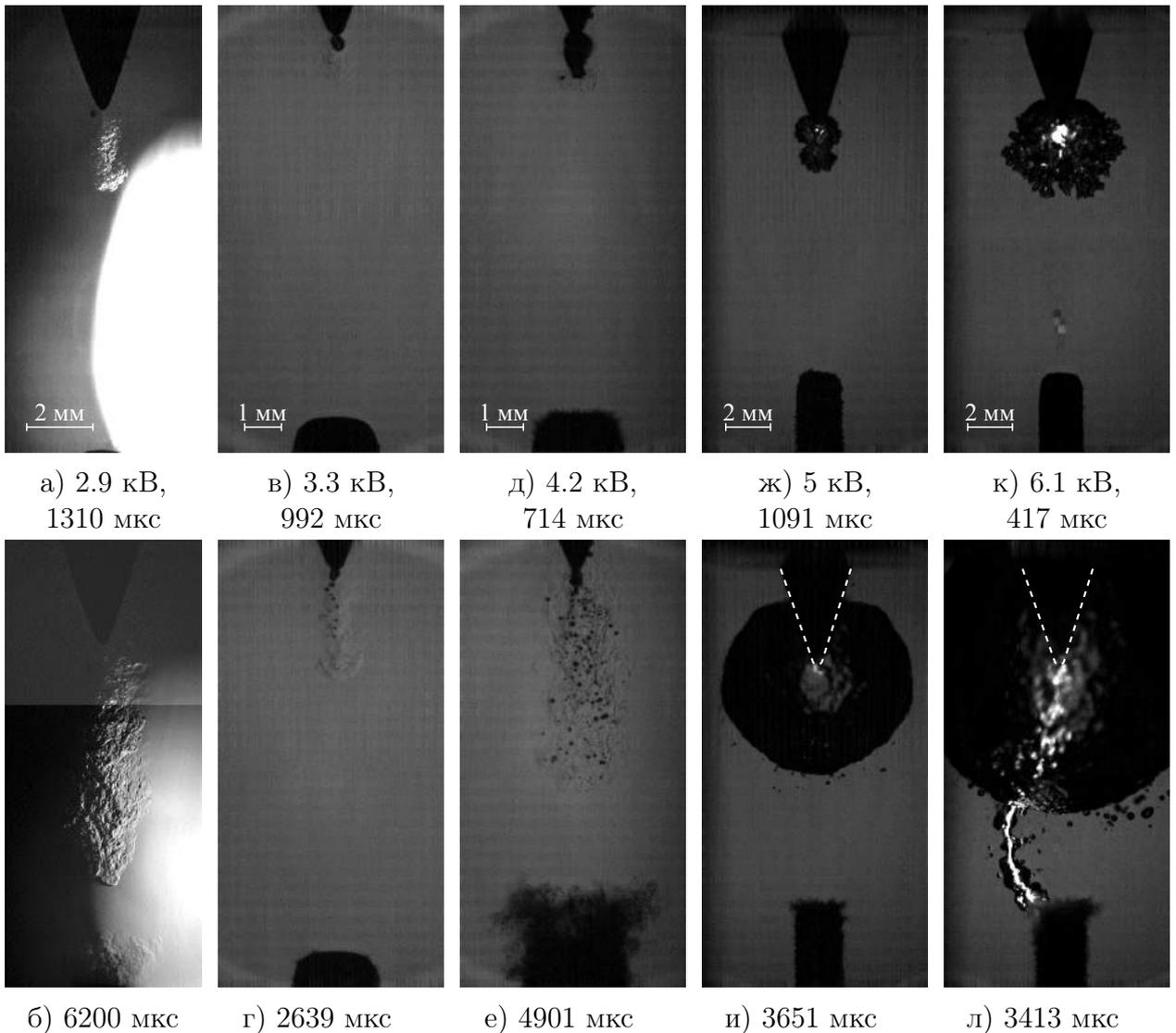
В первую очередь были проведены исследования допробойного диапазона напряжений в проводящей воде с целью выяснить, какие процессы предшествуют замыканию межэлектродного промежутка разрядным каналом. Определено напряжение пробоя $U_{пр}$. Затем исследованы основные этапы развития разряда и величины, количественно их характеризующие, при напряжениях, близких к пробойному. Рассмотрено влияние перенапряжения на установленные основные характеристики разряда. Проведена аналогичная серия экспериментов в воде с пониженной проводимостью для оценки её влияния на установленные стадии развития разряда в проводящей воде. Рассмотрено влияние коэффициента поверхностного натяжения на характеристики разряда.

3.1.1 Анализ допробойных явлений

Для выяснения набора явлений, сопровождающих развитие разряда в воде при различных значениях напряжения, была проведена серия экспериментов в воде с проводимостью 330 мкСм/см. В экспериментах использована геометрия электродов «острие–штырь», описанная в разделе 2.2, межэлектродное расстояние $d_{мэ}$ было установлено равным 10 мм и оставалось неизменным для представленных в настоящем разделе результатов.

Установлено, что в допробойном диапазоне напряжений по мере его увеличения наблюдается развитие пяти последовательно появляющихся и хорошо различимых явлений (рисунок 3.1).

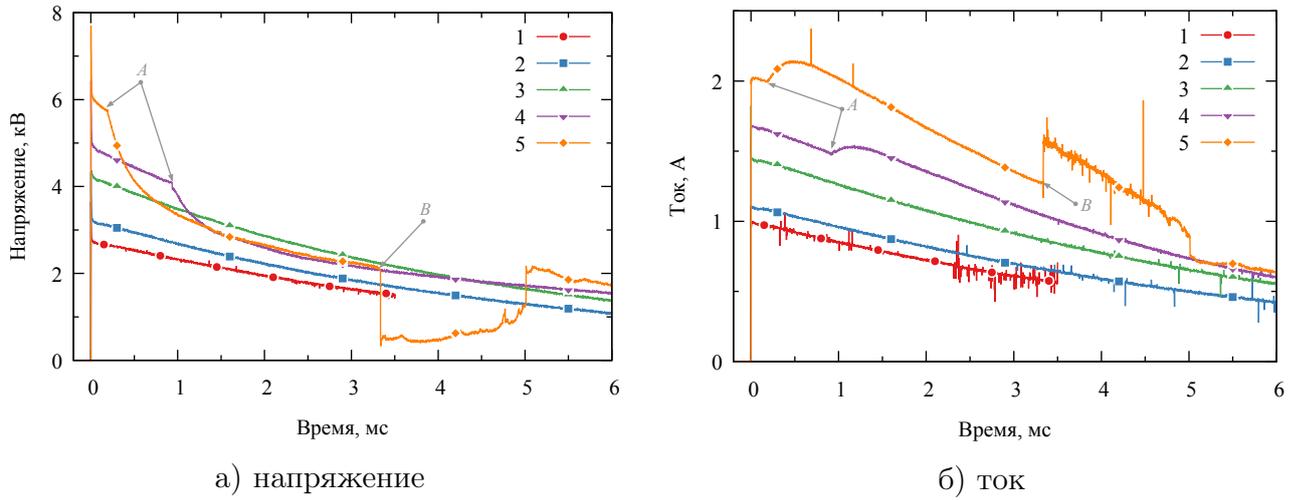
Основываясь на полученных изображениях, зарегистрированные явления можно охарактеризовать следующим образом. В текущей постановке эксперимента при напряжениях $U_0 < 0.5U_{пр}$ никаких визуально заметных изменений в видимой области межэлектродного промежутка не наблюдается как при регистрации собственного свечения, так и на теневых изображениях. Начиная с напряжения $0.5U_{пр}$ становится заметной оптическая неоднородность, развивающаяся, в основном, от острейного анода в сторону катода (рисунки 3.1а, 3.1б). Наиболее вероятно, её появление связано с изменением плотности воды вследствие прогрева начальными токами проводимости (на уровне единиц ампер, кривая 1 на рисунке 3.2б). Образование пузырьков при этом не наблюдается. Источник теплового возмущения локализован преимущественно у острия. При повышении напряжения до уровня $0.55U_{пр}$ у острия анода начинают формироваться отдельные парогазовые пузырьки (рисунки 3.1в), которые быстро распадаются на более мелкие и уменьшаются по мере удаления от анода в сторону катода,



Пары характерных изображений в начале и ближе к концу действия импульса напряжения в пяти экспериментах с последовательно возрастающей амплитудой напряжения U_0 : 1) а, б – 2.9 кВ; 2) в, г – 3.3 кВ; 3) д, е – 4.2 кВ; 4) ж, и – 5.0 кВ; 5) к, л – 6.1 кВ. Экспозиция кадров а и б – 8.39 мкс, в–л – 16.25 мкс. Указанное в подписях время отсчитывается от начала роста импульса напряжения. Неравномерность освещенности фона (вытянутое белое овальное пятно в правой части изображений а) и б)) не связана с разрядными явлениями, а только с особенностями реализации подсветки. Пунктиром (на рисунках и), л)) обозначены контуры анода. Масштаб изображений в серии указан только на первых кадрах.

Рисунок 3.1 — Развитие предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см)

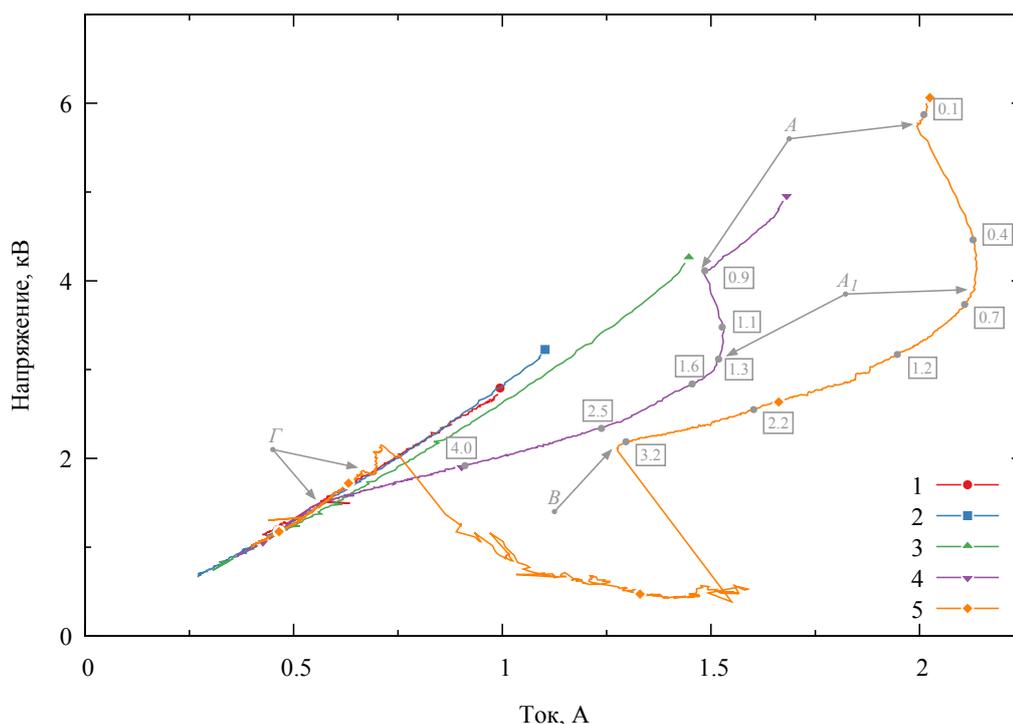
схлопываясь в конечном итоге (рисунок 3.1г). Начиная с уровня напряжения $0.7U_{пр}$ (рисунок 3.1д), в течение, по крайней мере, первой половины времени длительности импульса у анода формируется стабильная парогазовая область (ПО), которая в итоге распадается на более мелкие пузырьки (рисунок 3.1е). Образование областей с собственным свечением на уровне, достаточном для фоторегистрации, при этом не наблюдается. Осциллограммы (кривые 3 на рисунках 3.2а и 3.2б) также не имеют особенностей, характерных для начала ионизационных процессов — их вид обсуждается ниже в разделе 3.1.2. Плотность тока достигает значения, при котором становится заметным образование мелких пузырьков у катода. В пользу их электролизной природы говорит тот факт, что пузырьковое облако у катода состоит из множества отдельных мелких пузырьков с диаметром на уровне пространственного разрешения



Нумерация кривых соответствует нумерации экспериментов в подписи к рисунку 3.1. $U_0/U_{пр}$: 1 — 0.5, 2 — 0.55, 3 — 0.7, 4 — 0.8, 5 — 1.0. Точки: *A* — появление свечения в начальной ПО; *B* — замыкание каналом разрядного промежутка. Рисунок 3.2 — Осциллограммы напряжения и тока предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см) по мере увеличения амплитуды импульса напряжения от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$

оптической системы (10 мкм/пиксель). Увеличение напряжения приводит к более раннему появлению стабильной парогазовой области у анода и увеличению её максимального продольного размера (вдоль оси электродов). Дальнейшее увеличение напряжения до уровня порядка $0.8U_{пр}$ приводит к ионизации среды в образовавшейся стабильной парогазовой области (рисунки 3.1ж, 3.1и). Происходит пробой начальной ПО, который сопровождается свечением, локализованным в основном у острия анода, а также её значительным всесторонним ростом, вплоть до середины межэлектродного промежутка. Зависимости критического для начала ионизации размера ПО от амплитуды U_0 а также динамика продольного размера ПО от времени представлены ниже в разделе 3.1.3 (рисунки 3.10а и 3.8). При минимальном для начала ионизации ПО напряжении форма её поверхности слабо возмущена и близка к сферической даже на стадии роста. При дальнейшем увеличении напряжения поверхность ПО становится все более возмущенной, и после завершения стадии квазисферического роста дальнейшее развитие канала разряда происходит с поверхности ПО из области наибольшего возмущения (рисунок 3.1л). При напряжениях $U_0 > U_{пр}$ нередко наблюдается развитие сразу нескольких ветвей канала.

Последовательное развитие процессов, описанное выше, хорошо прослеживается на осциллограммах тока и напряжения (рисунок 3.2, нумерация кривых соответствует нумерации экспериментов в подписи к рисунку 3.1). Кривые напряжения 1–3 мало отличаются друг от друга и соответствуют разрядке конденсатора $C_{уд}$ через балластное сопротивление и сопротивление межэлектродного промежутка, т. е. образование парогазовой области у острия анода не оказывает заметного влияния на вид осциллограмм. Изломы в точках *A* на кривых 4 и 5 соответствуют моменту появления свечения в начальной ПО (рисунки 3.1ж, 3.1к). Дальнейшее поведение напряжения характеризуется ускоренным спадом. На осциллограмме тока при этом появляется локальный максимум. При значительном перенапряжении после пробоя



Нумерация кривых соответствует нумерации экспериментов в подписи к рисунку 3.1. Числами в рамках указано время после подачи импульса, соответствующее отмеченным на кривых 4 и 5 круглым серым точкам.

Рисунок 3.3 — Вольт-амперные характеристики разрядного промежутка в проводящей воде (330 мкСм/см) по мере увеличения амплитуды импульса напряжения от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$

начальной ПО ток может непрерывно нарастать вплоть до момента замыкания промежутка — такое поведение обсуждается ниже в разделе 3.1.2. Угасание свечения в ПО сопровождается вторым слабо различимым на осциллограммах напряжения и тока изломом. Момент угасания отчетливо виден на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) — точка Γ на кривой 4, рисунок 3.3. Завершенному пробое соответствуют кривые 5 на рисунках 3.2 и 3.3. В момент замыкания каналом разрядного промежутка (точка B) происходит резкий спад напряжения до уровня нескольких сотен вольт, сопровождающийся значительным ростом тока, максимальное значение которого ограничено балластным сопротивлением. После точки B наблюдается дуговая стадия разряда. Рассмотрение дуговой стадии разряда выходит за рамки настоящего исследования, поэтому ограничимся лишь её краткой характеристикой:

- длительность дуговой стадии составляет несколько миллисекунд;
- по мере убывания тока вследствие разрядки ударной ёмкости тепловыделение в канале падает, что приводит к его схлопыванию;
- если по какой либо причине угасание дуги произошло при значительном остаточном напряжении на конденсаторной батарее, то возможно повторное зажигание дуги, которое происходит как пробой между парогазовыми пузырями, оставшимися после погасания первой дуги.

При повышении напряжения от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$ и выше вольт-амперные характеристики разрядного промежутка претерпевают значительные изменения. На рисунке 3.3 представлены вольт-амперные характеристики, построенные на основе осциллограмм тока и напряже-

ния, представленных на рисунке 3.2 (нумерация кривых совпадает). В отсутствии ионизационных процессов (кривые 1–3) ВАХ полностью линейна. Следует пояснить, что начальный переход из точки 0,0 в точку с максимальным напряжением не показан и соответствует первой микросекунде разряда — участку, осциллограммы которого зашумлены из-за переходных процессов в цепи коммутирующего разрядника. В диапазоне от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$ при увеличении амплитуды напряжения наклон вольт-амперных характеристик несколько уменьшается, т. е. уменьшается эквивалентное сопротивление промежутка. Это может быть связано с прогревом жидкости у острия и увеличением проводимости жидкости, которое для электролита существенно и может достигать ста и более процентов в диапазоне 25–100 °С. Излом на осциллограммах тока и напряжения в момент пробоя начальной ПО в еще более явной форме представлен на ВАХ (точка А). Линейный участок ВАХ до этой точки на кривых 4 и 5 соответствует периоду времени прогрева жидкости и образования начальной ПО без видимого свечения. Период расширения начальной ПО после её пробоя соответствует участку ВАХ, который начинается в точке А линейным участком с отрицательным наклоном и заканчивается в точке А₁ началом нового линейного участка с положительным наклоном. Положение точки А₁ носит условный характер, но выход на участок с положительным наклоном совпадает с окончанием интенсивного расширения плазменной области и выходом на некоторый стационарный режим роста канала. Более подробно динамика роста канала рассматривается ниже и иллюстрируется рисунком 3.8. В случае отсутствия замыкания промежутка (кривая 4) последний излом на ВАХ в точке Г соответствует угасанию свечения в ПО, а в случае замыкания (кривая 5) — угасанию свечения и исчезновению дугового канала. После точки Г ВАХ имеет тот же наклон, что и кривая 1, соответствующая растеканию тока в отсутствие ионизационных процессов. Участок ВАХ между точками В и Г (кривая 5) имеет классический для дуговой стадии падающий вид [9].

Таблица 4 — Результаты сопоставления наблюдаемых явлений и диапазонов напряжения их реализации

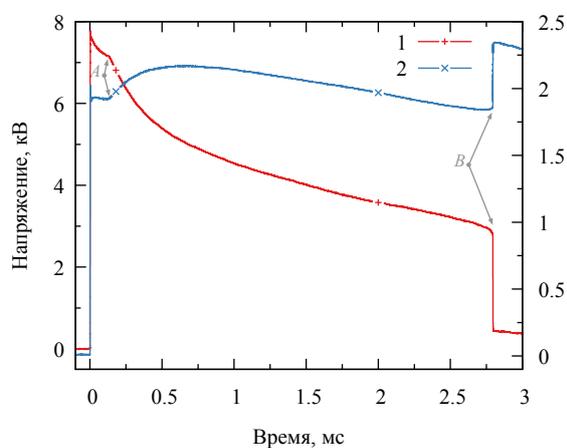
Диапазон напряжений, $U - 0/U_{пр}$	Наблюдаемые явления	Характеристика осциллограмм и ВАХ
< 0.5	Растекание тока без видимых изменений в среде	Экспоненциальный спад напряжения и тока — разряда конденсатора. ВАХ линейна, с постоянных положительным наклоном.
(0.5–0.55)	Растекание тока с видимым тепловым следом	Аналогично
(0.55–0.7)	Образование нестабильной парогазовой области вблизи острия анода	Аналогично. Несколько уменьшается наклон ВАХ.
(0.7–0.8)	Формирование стабильной парогазовой области у анода	Аналогично. Наклон ВАХ продолжает уменьшаться.
(0.8–1)	Ионизация в сформированной парогазовой области у анода без замыкания разрядного промежутка	На осциллограммах тока и напряжения появляется излом. На ВАХ появляется участок с отрицательным наклоном.
> 1	Завершенный пробой	В момент замыкания происходят резкий спад напряжения и бросок тока. На ВАХ появляется характерный «дуговой» участок.

Результаты проведенного анализа допробойных процессов в сжатой форме приведены в таблице 4. Следует отметить, что вольт-амперные характеристики наиболее наглядно отра-

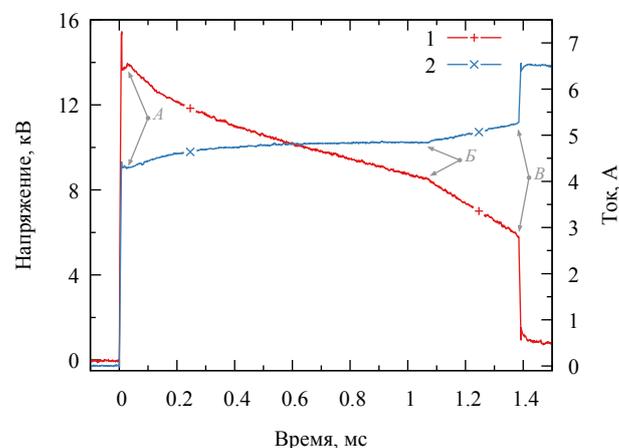
жают как отдельные предразрядные стадии развития, так и изменение набора наблюдаемых явлений при повышении напряжения, что делает ВАХ удобным инструментом анализа.

3.1.2 Развитие разряда при напряжениях выше пробойного

Использование длинных миллисекундных импульсов напряжения позволило выявить новые «медленные» стадии развития канала разряда, которые не наблюдаются в микросекундных разрядах. Характерные осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке показаны на рисунках 3.4а и 3.4б для случаев различных амплитуд начального напряжения U_0 : 7.7 кВ и 13.5 кВ соответственно. График динамического сопротивления разрядного промежутка показан на рисунке 3.4в для случая $U_0 = 13.5$ кВ.

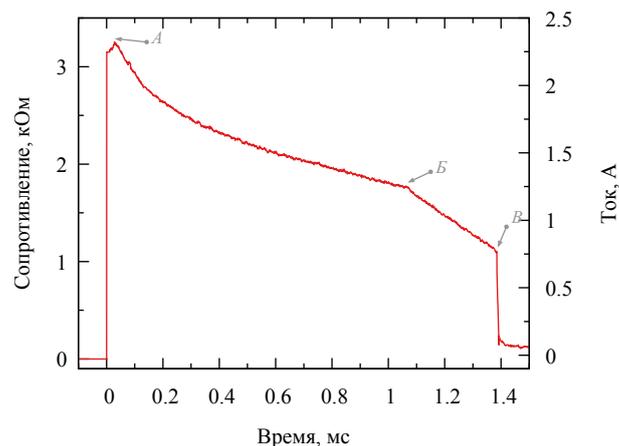


а) напряжение и ток, $U_0 = 7.7$ кВ



б) напряжение и ток, $U_0 = 13.5$ кВ

Точки: *A* — начало развития тепловой неустойчивости; *B* — появление анодного пятна; *B* — момент замыкания разрядного промежутка проводящим каналом.

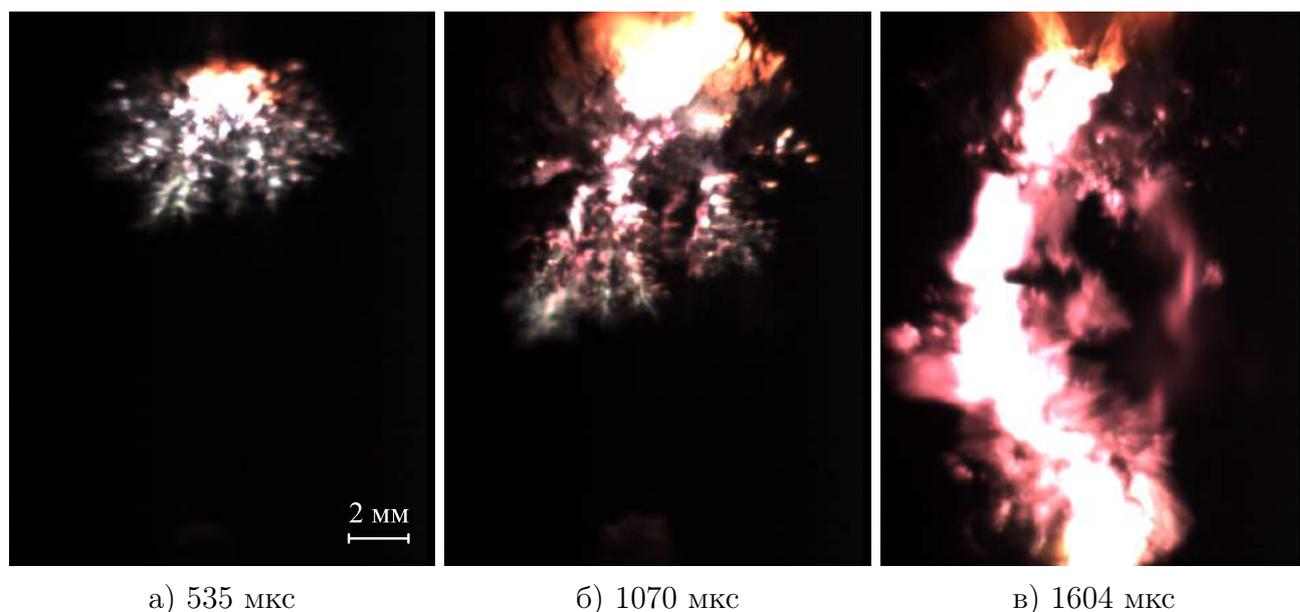


в) динамическое сопротивление,
 $U_0 = 13.5$ кВ

Рисунок 3.4 — Характерные осциллограммы напряжения (кривые 1), тока (кривые 2), и динамического сопротивления на разрядном промежутке при различной начальной амплитуде напряжения U_0

Фоторегистрация собственного свечения, возникающего при пробое начальной парогазовой области, показывает, что развитие из неё основного замыкающего канала происхо-

дит при значительно более высокой интенсивности свечения по сравнению с незавершенным пробоем. По мере увеличения напряжения свечение становится более интенсивным, и через 0.2–1 мс после подачи напряжения появляется анодное пятно, которое способствует распространению плазменного канала (рисунок 3.5). Катодное пятно возникает после замыкания промежутка плазменным каналом и длится на несколько миллисекунд дольше по сравнению с анодным. Термины анодного и катодного пятна в данном контексте обозначают области у электродов, интенсивность свечения в которых значительно превосходит интенсивность в канале разряда.

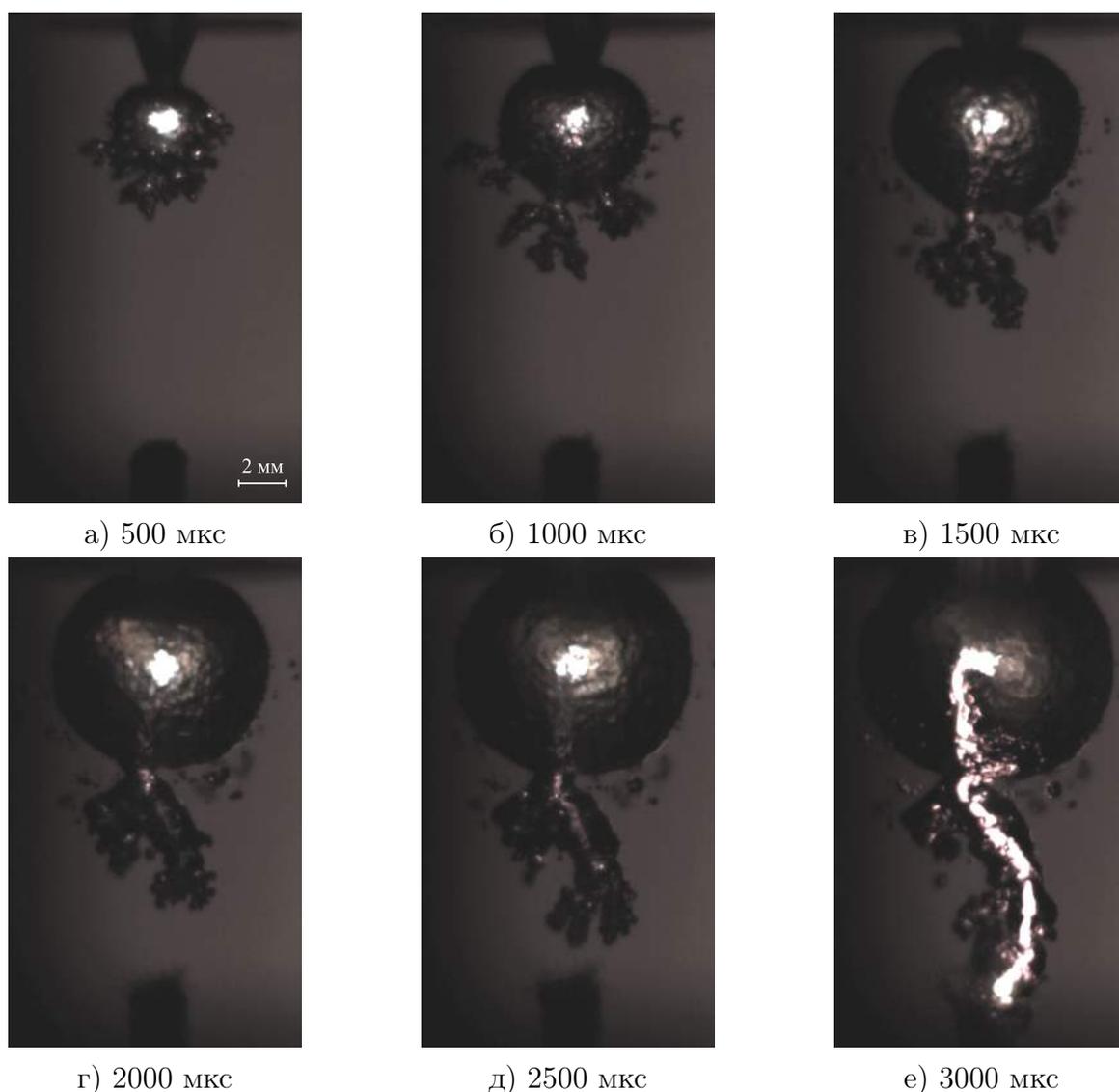


Анод сверху. Экспозиция кадра 100 мкс, камера *RedLake MotionPro X3*.

Рисунок 3.5 — Динамика развития ЭР в проводящей воде (330 мкСм/см) при начальной амплитуде напряжения $U_0 = 13.5$ кВ

На стадии до замыкания промежутка каналом (до точки *B*, рисунок 3.4а) ток достигает своего локального максимума существенно, на ~ 0.5 мс позже напряжения. Увеличение тока на начальном участке связано с увеличением проводимости в несколько раз в результате ионизации, что хорошо видно на зависимости динамического сопротивления от времени на участке *A–B* (рисунок 3.4в), и, вероятнее всего, связано с развитием тепловой неустойчивости в точке *A*. Дальнейший рост проводимости происходит на участке *B–B* после появления анодного пятна в точке *B* и связан, по-видимому, с контракцией тока и дополнительным разогревом во время роста канала. Непрерывный рост тока на начальном участке сменяет локальный максимум при повышении напряжения на промежутке (рисунок 3.4б). Скорость распространения плазменного канала также увеличивается.

Серии изображений, отражающих развитие разряда во времени и пространстве, показаны на рисунках 3.5 и 3.6 и соответствуют осциллограммам на рисунках 3.4а и 3.4б. Ионизация и появление анодного пятна показаны на рисунках 3.5а и 3.5б, а замкнутый плазменный канал — на рисунке 3.5в. Дополнительные эксперименты были проведены с задней подсветкой с целью наблюдения за формированием парогазовых областей вокруг плазменного канала. На рисунке 3.6а показано развитие области с фазовым переходом. Внутри этой области наблю-

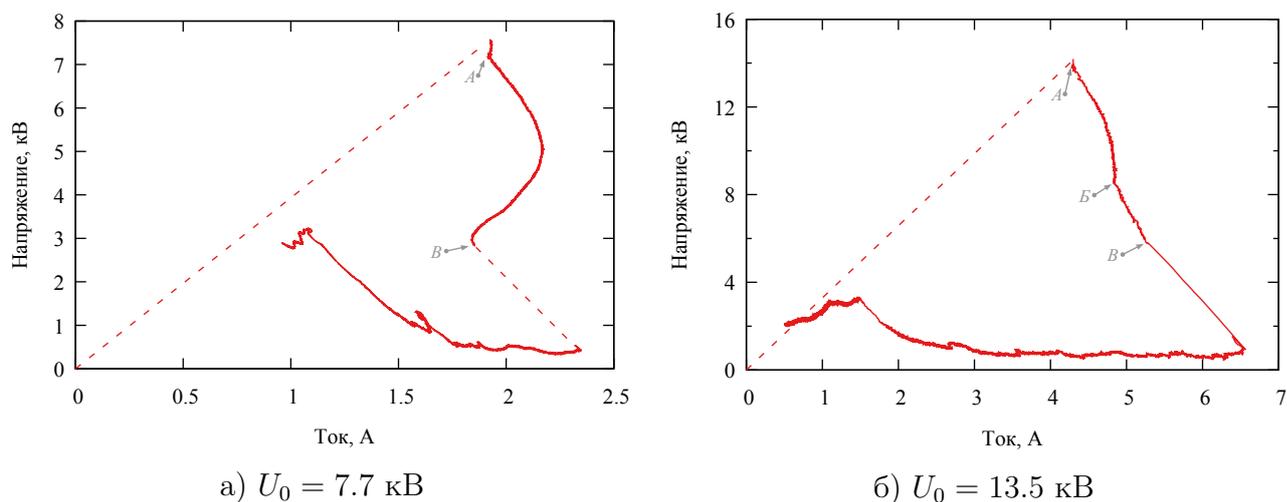


Анод сверху. Экспозиция кадра 20 мкс, камера *RedLake MotionPro X3*, подсветка нитью накала.

Рисунок 3.6 — Динамика развития ЭР в проводящей воде (330 мкСм/см) при начальной амплитуде напряжения $U_0 = 7.7$ кВ

дается свечение. На следующем кадре (рисунок 3.6б) парогазовая область увеличивается и приобретает практически сферическую форму, количество боковых отростков уменьшается. На третьем кадре (рисунок 3.6в) большинство боковых отростков исчезает и остаётся один основной, наиболее близкий к катоду. На рисунках 3.6г и 3.6д показано распространение основного канала по направлению к катоду, которое завершается замыканием разрядного промежутка ярким хорошо проводящим плазменным каналом, показанным на рисунке 3.6е. Следует отметить, что основной плазменный канал, распространяющийся от образовавшейся парогазовой области к катоду, имеет на всей своей длине боковые ответвления, однако их характерные размеры в среднем на порядок меньше аналогичных для основного канала. Иллюстрация описанных составных частей разрядного канала также дана на рисунке А.5, Приложение А. Зарегистрированная скорость прорастания плазменного канала лежит в диапазоне 3–15 м/с, что соответствует времени прорастания канала 0.7–3.3 мс.

ВАХ, показанная на рисунке 3.7а, имеют петлеобразную форму, связанную с ионизационными процессами в среде, приводящими к росту тока через разрядный промежуток и падению напряжения при наличии балластного сопротивления в цепи. В данном случае рост тока в цепи в большей степени ограничен балластным сопротивлением, нежели сопротивлением самого канала. Начальный участок ВАХ, соответствующий первой микросекунде после подачи напряжения, показан пунктиром. Недостаток надежных экспериментальных точек на этом участке связан с переходными процессами в коммутирующем разряднике.



Точки: А — начало развития тепловой неустойчивости; В — появление анодного пятна; В — момент замыкания разрядного промежутка проводящим каналом.

Рисунок 3.7 — Вольт-амперные характеристики разрядного промежутка при различной начальной амплитуде напряжения U_0

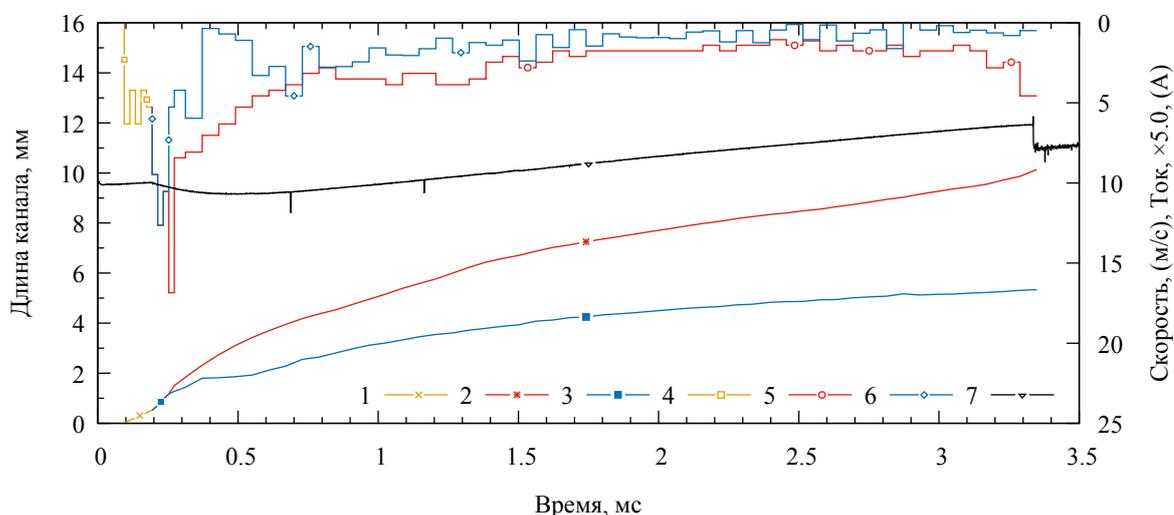
Отрицательный наклон ВАХ свидетельствует о развитии неустойчивости по отношению к малым флуктуациям тока. Тепловая неустойчивость развивается вблизи поверхности электрода при выполнении условия $-dU/dI > R_6$ и приводит к росту температуры в области с максимальной плотностью тока. Фактически развитие неустойчивости связано с сильной зависимостью джоулева тепловыделения в пузырьковой среде от её температуры. В конечном счете развившаяся неустойчивость приводит к ионизации среды вблизи кончика анода.

Характерное зарегистрированное время развития неустойчивости составило примерно 50–200 мкс, основываясь на осциллограммах и фотографиях разряда. Контракция тока в проводящей воде приводит к появлению анодного пятна со значительной, порядка 0.2–0.5 мс, задержкой по сравнению с аналогичной в газе или во влажном песке. На ВАХ появление анодного сопровождается дополнительным изломом на нелинейном переходном участке в точке В (рисунок 3.7б). Образовавшееся анодное пятно служит в качестве дополнительного источника ионизации. На основе полученных данных можно сказать, что среднее поле, необходимое для пробоя разрядного промежутка (т. е. замыкания промежутка хорошо проводящим плазменным каналом) в проводящей воде на порядок меньше аналогичного значения для дистиллированной воды и не достаточно для распространения стримеров.

3.1.3 Динамика канала разряда

Во всем диапазоне исследованных напряжений в структуре разрядного канала можно выделить две составляющие — «сферическую» и «канальную», динамика роста которых неодинакова (рисунок 3.8).

На графике под «сферической» составляющей понимается расстояние, отсчитываемое от крайней точки острия анода до сферической границы парогазовой области. Рост начальной парогазовой области начинается через 100 мкс после подачи напряжения и происходит с примерно постоянной, на уровне 5 м/с, скоростью вплоть до её пробоя через 100 мкс. После этого в течение еще 100 мкс расширение происходит квазисферически в том смысле, что огибающая всей области на изображении близка по своей форме к окружности, несмотря на большое количество малых возмущений по всей части поверхности, обращенной к катоду.



- 1 — продольный размер начальной парогазовой области
- 2 — общий продольный размер канала разряда после появления в нём свечения
- 3 — продольный размер «сферической» составляющей канала разряда
- 4 — скорость продвижения переднего фронта начальной парогазовой области
- 5 — скорость продвижения переднего фронта канала разряда
- 6 — скорость продвижения переднего фронта «сферической» составляющей канала разряда
- 7 — осциллограмма тока через разрядный промежуток

Рисунок 3.8 — Динамика роста канала разряда при действии пробойного напряжения

Однако из-за хаотичности их расположения и направления выделить отдельно размеры «сферической» и «канальной» части не представляется возможным, и для этого участка времени указывается общий продольный размер, на графике отмеченный как «сферический». Затем на фоне сферического фронта начинают более явно проступать вытянутые возмущенные области. При обработке таких изображений, когда весь передний фронт остаётся возмущенным, радиус сферической части принимался равным радиусу невозмущенной полусферы, обращенной к аноду, измерение которого не составляет труда при известном масштабе изображения, а продольный размер «канальной» части определялся как разность между полным продольным размером разрядного канала и радиусом «сферической» составляющей. Далее

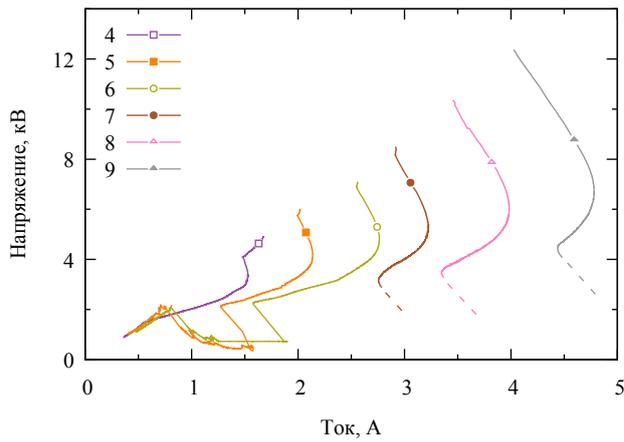
наступает период (350–600 мкс) активного удлинения «канальной» части, в течение которого величина тока близка к своему локальному максимальному. После прохождения максимума ток спадает вместе со скоростью распространения канал, которая после 1.5 мс выходит на установившееся значение 3–5 м/с. Последний рост скорости происходит непосредственно перед замыканием, когда «канальная» часть делает финальный скачок. Реальная скорость этого скачка может быть значительно больше указанной на графике по двум причинам: 1) невозможно точно оценить длину части межэлектродного промежутка, оставшуюся не перекрытой каналом, так как канал входит в прикатодную область, окутанную облаком мелких пузырьков или, по крайней мере, оптической неоднородностью, напоминающей таковые; 2) время финального замыкания значительно меньше как времени экспозиции кадра, так и минимального периода между кадрами, что лишает возможности с приемлемой точностью говорить о величине скорости, и остается возможным лишь сделать её оценку снизу на основе данных с последнего «надежного» кадра и времени, оставшегося до замыкания, которое определяется по осциллограммам. Можно также предположить, что финальное удлинение происходит не вследствие расширения и удлинения «канальной» части, а вследствие пробоя оставшейся длины по «стримерно-лидерному» механизму.

3.1.4 Влияние перенапряжения

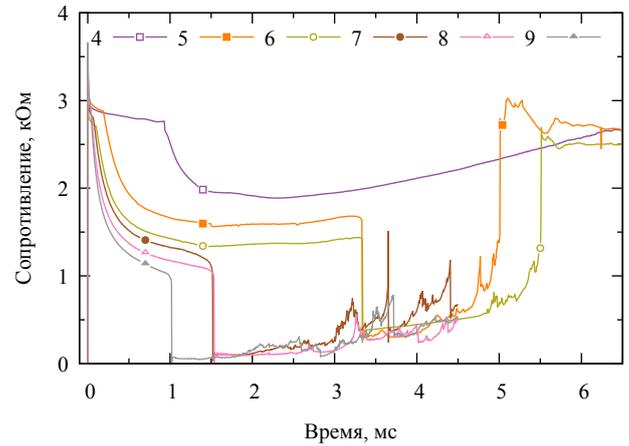
В описанной выше постановке экспериментов с ограничением максимального тока максимальное доступное значение напряжения непосредственно на разрядной камере составило $2U_{пр}$.

Эффект перенапряжения на разрядном промежутке влияет на такие характеристики разряда, как ВАХ, динамическое сопротивление межэлектродного промежутка $R(t)$, время запаздывания зажигания разряда $\tau_{зз}$, критический размер начальной парогоазовой области $l_{по.к}$.

На рисунке 3.9а приведены ВАХ разрядного промежутка для исследованного диапазона напряжений. Нумерация кривых частично совпадает с использованной ранее при описании предразрядных явлений (кривые 1–5) и дополнена номерами 6–9 для диапазона $U_{пр}-2U_{пр}$. Амплитуды начального напряжения U_0 приведены в пояснении к рисунку. Еще раз следует отметить, что присутствующие в системе регистрации тока и напряжения наводки и паразитные колебания, а также особенности делителя, описанные в разделе 2.4, лишают возможности построить начальный участок ВАХ, т. е. линейный участок, начинающийся в точке (0,0) и заканчивающийся в точке с максимальным для каждой кривой напряжением, по экспериментально зарегистрированным точкам. По аналогичным причинам участок ВАХ, соответствующий моменту замыкания промежутка, обозначен пунктиром, а начальные участки опущены, чтобы не загромождать рисунок. При характерном масштабе рассматриваемых времён на уровне единиц микросекунд форму начального участка можно считать близкой к линейной, так как для всех экспериментов, соответствующих кривым 4–9, на первых изображениях не

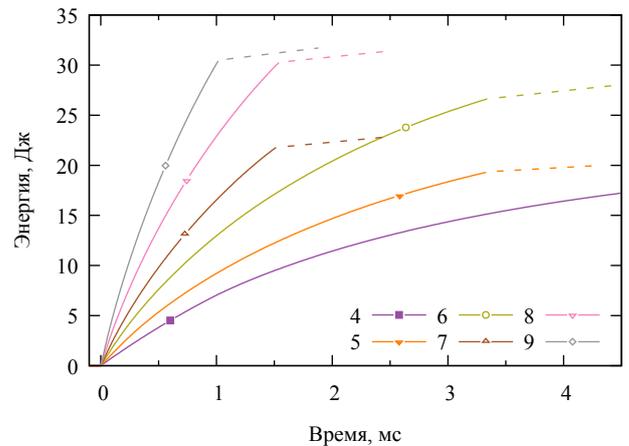


а) вольт-амперные характеристики



б) динамическое сопротивление

$U_{пр} = 6.1$ кВ, соотношение $U_0/U_{пр}$ для кривых 4–9: 4) 0.80; 5) 1.00; 6) 1.15; 7) 1.40; 8) 1.70; 9) 2.05. Пунктиром на кривых обозначены участки, относящиеся к началу дуговой стадии разряда в момент замыкания промежутка КР.



в) вложенная энергия

Рисунок 3.9 — Влияние перенапряжения на электрические характеристики разрядного промежутка в проводящей воде (330 мкСм/см)

наблюдается никакого парообразования и собственного свечения, которые могли бы свидетельствовать в пользу изменения свойств среды, влияющих на её удельное сопротивление. По этой причине при описании ВАХ начальной будем считать точку с максимальным значением напряжения, и дальнейшее движение по кривой соответствует её развитию во времени.

Кривая, соответствующая большей амплитуде U_0 , на графике лежит правее и выше. Начальные точки всех кривых приблизительно укладываются на одну прямую, начинающуюся в точке (0,0) и проходящую через кривую 1, отражающую линейный закон Ома в отсутствие ионизационных процессов. Несмотря на то, что в целом кривые 5–9 выглядят аналогично, имеется и несколько характерных особенностей, проявляющихся с увеличением напряжения. Так, сокращается протяженность начального участка, соответствующего практически линейной убыли тока и напряжения, и на кривых 8–9 начальный участок сразу обладает отрицательным наклоном. Вторым характерным отличием является наличие на кривых 7–9, соответствующих напряжению $(1.5–2)U_{пр}$, дополнительного хорошо разрешимого перегиба на участке перед замыканием промежутка. Данный перегиб появляется на ВАХ в экспериментах, в которых зарегистрировано свечение в «канальной» части (см. сопо-

ставление изображений канала разряда непосредственно перед замыканием на рисунке А.6, Приложение А).

В исследованном диапазоне напряжений момент пробоя начальной парогазовой области соответствует уровню вложенной энергии 1.4–2.4 Дж (рисунок 3.9в), которая уменьшается с увеличением напряжения. В данном контексте уменьшение критического размера начальной парогазовой области $l_{\text{по.к}}$ и времени до пробоя начальной ПО при повышении напряжения выглядит логичным (рисунки 3.10а и 3.10б).

Средняя скорость распространения разрядного канала без учета особенностей его структуры, несмотря на разброс значений, практически линейно возрастает с напряжением (рисунок 3.10в).

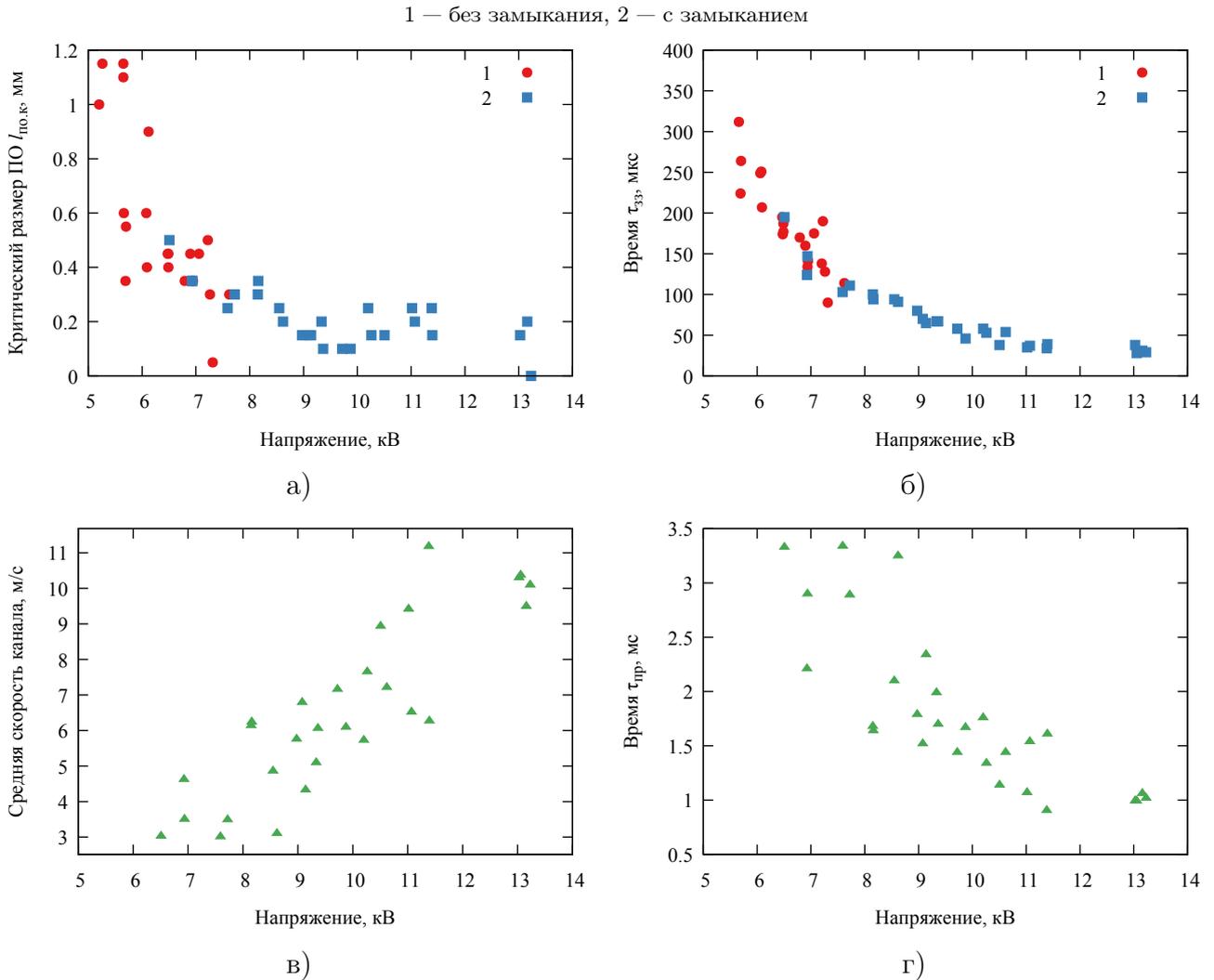


Рисунок 3.10 — Зависимости критического размера $l_{\text{по.к}}$ начальной парогазовой области (а), времени τ_{zz} задержки зажигания разряда (б), средней скорости распространения канала (в) и полного времени пробоя $\tau_{\text{пр}}$ (г) от амплитуды U_0 импульса напряжения в проводящей воде (330 мкСм/см)

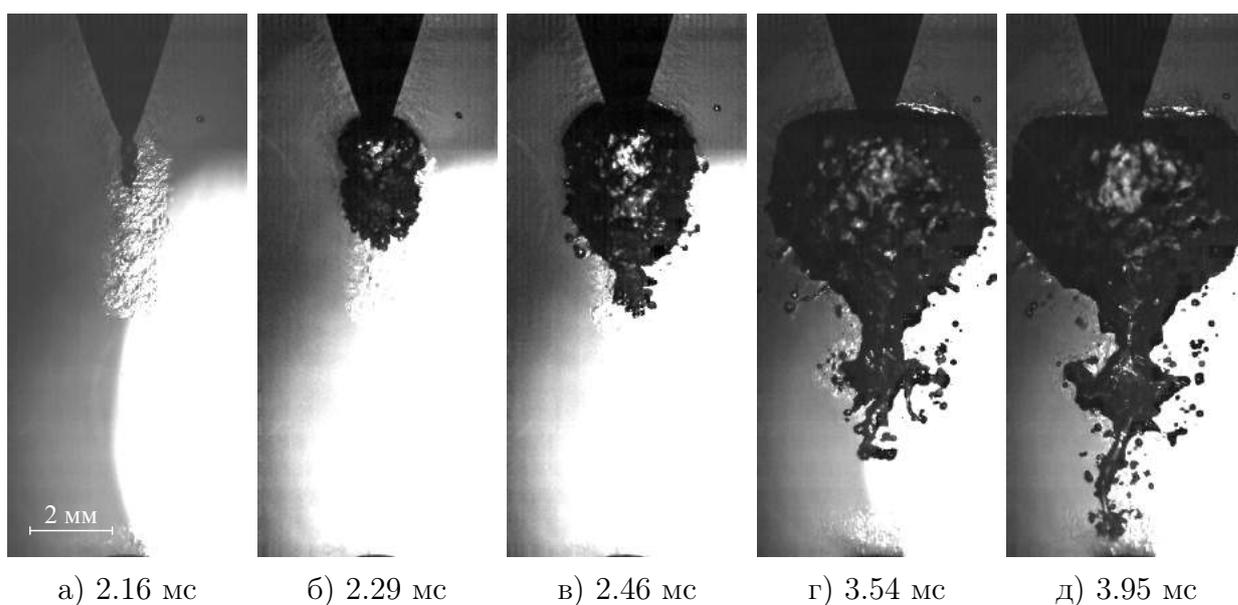
3.1.5 Влияние проводимости жидкости

Для оценки влияния начальной проводимости жидкости на характер развития разряда в проводящей воде и его основные параметры была проведена серия экспериментов в воде с проводимостью на уровне 90 мкСм/см.

В силу бóльшего значения удельного сопротивления и, соответственно, большего сопротивления промежутка (при прочих равных параметрах), максимальное напряжение составило $3U_{пр}$. Вместе с диапазоном напряжений расширился и спектр наблюдаемых явлений. По характеру разрядных явлений его можно разбить на два поддиапазона: «медленные» процессы при напряжении $(0.7-2.5)U_{пр}$ и «быстрые» процессы при напряжении $(2.8-3)U_{пр}$, не наблюдавшиеся в экспериментах при проводимости воды 330 мкСм/см.

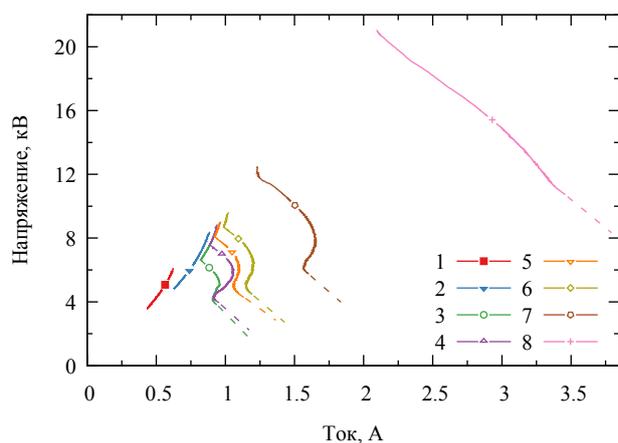
Принципиально набор «медленных» стадий разряда не отличается от аналогичного при проводимости 330 мкСм/см за одним исключением: при $\sigma \approx 90$ мкСм/см не наблюдается ситуации, когда при пробое начальной парогазовой области не происходит дальнейшего замыкания промежутка. Есть и некоторые внешние отличия в структуре канала. Начальная парогазовая область в меньшей степени напоминает сферу и более вытянута вдоль оси электродов (рисунок 3.11а), что проявляется и в дальнейшей форме развивающегося канала. «Канальная» составляющая при замыкании перекрывает бóльшую часть промежутка.

Вольт-амперные характеристики (рисунок 3.12а) на графике предсказуемо лежат левее и выше, что соответствует более высокому значению начального сопротивления промежутка. По мере увеличения напряжения также наблюдается уменьшение наклона начального линейного участка ВАХ, т. е. уменьшение сопротивления, вызванного, по видимому, существенным

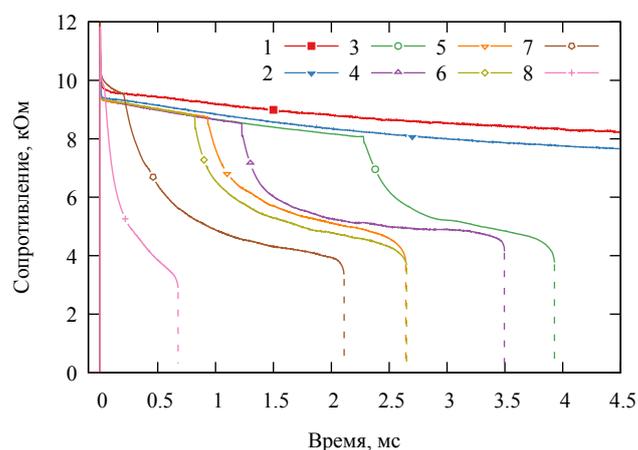


Неравномерность освещенности фона (вытянутое белое овальное пятно в правой части изображений) не связана с разрядными явлениями, а только с особенностями реализации задней подсветки.

Рисунок 3.11 — Развитие электрического разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при действии пробойного напряжения ($U_{пр} = 9.3$ кВ)

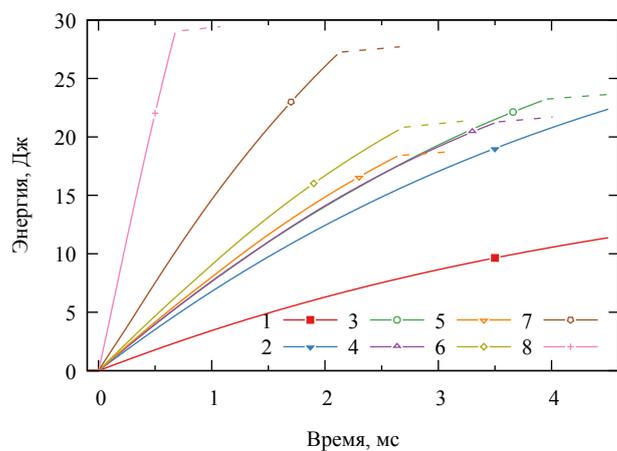


а) вольт-амперные характеристики



б) динамическое сопротивление

$U_{пр} = 9.3$ кВ, соотношение $U_0/U_{пр}$ для кривых 1–8: 1) 0.70; 2) 0.95; 3) 1.00; 4) 1.05; 5) 1.10; 6) 1.15; 7) 1.45; 8) 2.50. Пунктиром на кривых обозначены участки, относящиеся к началу дуговой стадии разряда в момент замыкания промежутка КР.



в) вложенная энергия

Рисунок 3.12 — Влияние амплитуды импульса напряжения на электрические характеристики разрядного промежутка в воде с проводимостью 90 мкСм/см

(и это видно на рисунке 3.11а) прогревом прианодной области. При более чем двукратном перенапряжении (кривая 8) ток на участке до замыкания промежутка испытывает непрерывный рост, что приводит к «распрявленному» виду ВАХ. Характерные значения времени запаздывания зажигания разряда $\tau_{зз}$ при напряжениях, близких к $U_{пр}$, составляют от 500 до 2200 мкс (рисунок 3.13а), что практически на порядок больше аналогичных значений при $\sigma = 330$ мкСм/см (см. рисунок 3.10б). Значения энергии, вложенной к моменту пробоя начальной ПО, также в несколько раз превышают аналогичные для воды с повышенной проводимостью (рисунок 3.12в).

При напряжениях, близких к максимальному доступному ($\sim 3U_{пр}$), наблюдается переход к «быстрым» формам развития разряда. На рисунке 3.14а представлен переходный режим, при котором развитие начинается по «стримерно-лидерному» механизму (данный термин использован здесь из-за внешнего сходства разрядного канала с разрядным каналом в длинном воздушном промежутке), но затем происходит возврат к медленному, «тепловому» развитию разряда. При этом время задержки зажигания разряда составляет всего несколько микросекунд, а дальнейшее медленное развитие вплоть до замыкания занимает практически миллисекунду. ВАХ такой формы разряда представлена на рисунке 3.14б.

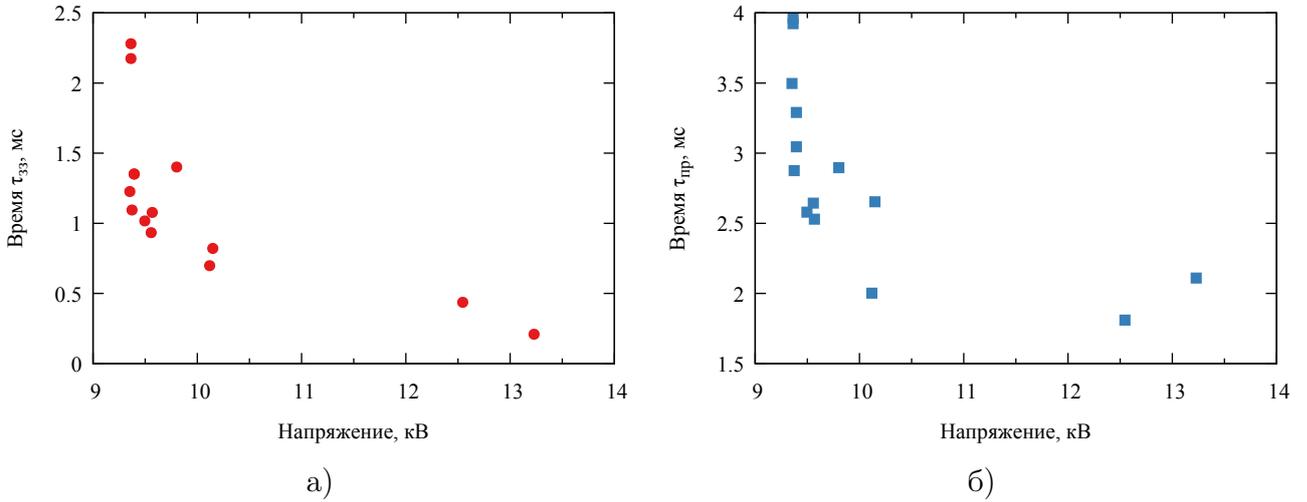
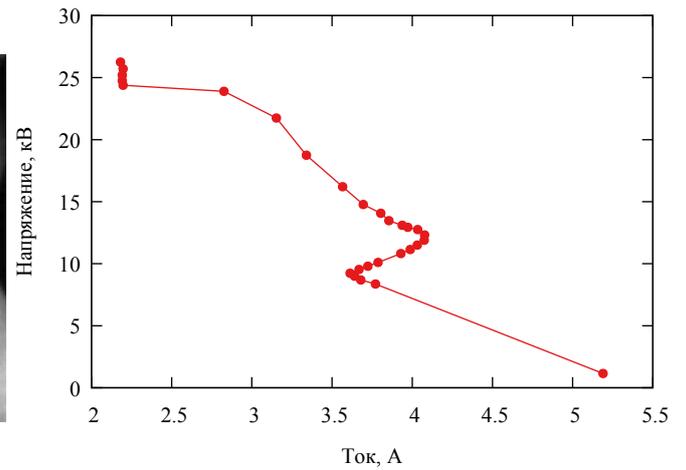
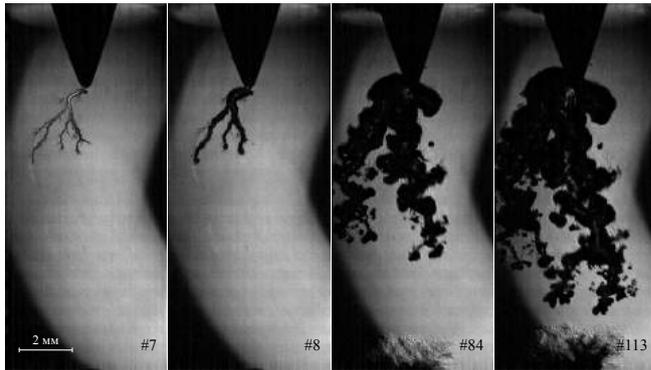


Рисунок 3.13 — Зависимости времени τ_{33} задержки зажигания разряда (а) и полного времени пробоя $\tau_{пр}$ (б) от амплитуды U_0 импульса напряжения в воде с проводимостью 90 мкСм/см

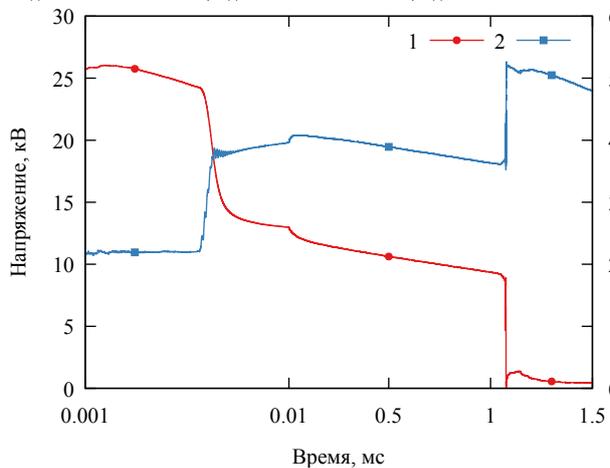
Практически при тех же значениях напряжения (около 25 кВ) наблюдается и полное развитие разряда по «стримерно-лидерному» механизму. Внешний вид канала и ВАХ разрядного промежутка приведены на рисунке 3.15. При этом $\tau_{33} \approx 33$ мкс, а время формирования разряда $\tau_{ф} \approx 8$ мкс, что эквивалентно средней скорости распространения канала ~ 1250 м/с, а максимальная зарегистрированная по осциллограммам средняя скорость составила ~ 7 км/с.

Еще одна форма развития разряда, относящаяся к «быстрым» лишь частично и не наблюдавшаяся ранее — комбинация «стримерно-лидерного» начала с анода с последующим развитием анодонаправленного «стримера». Внешний вид, ВАХ, осциллограммы тока и напряжения, а также график динамического сопротивления представлены на рисунке 3.16. Сразу после подачи напряжения жидкость выглядит невозмущенной. Примерно через 7 мкс (кадр #16 на рисунке 3.16а) появляется область оптической неоднородности в виде тонкой, не более 100 мкм, раздваивающейся на конце нити, напряжение при этом держится на уровне начального значения около 27 кВ. Следующий кадр (#17) соответствует моменту сразу после падения напряжения практически в два раза к 12-ой микросекунде. Начальная область оптической неоднородности теряет ножку, связывающую её с поверхностью анода и приобретает форму ближе к сферической. Похожая ситуация наблюдается при обычном «медленном» пробое, когда при развитии основного канала побочный боковой канал не получает развития, «ножка», связывающая его с основным каналом исчезает, и канал превращается в парогазовый пузырек, диаметр которого уменьшается через пульсации. После исчезновения данной неоднородности 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. Средняя скорость его распространения составляет 30–50 м/с. При этом, в отличие от случая развития канала с анода, канал с катода не обладает собственным значительным свечением, а его появление не вызывает значительного изменения сопротивления промежутка в целом (рисунок 3.16г). Дополнительное ослабление

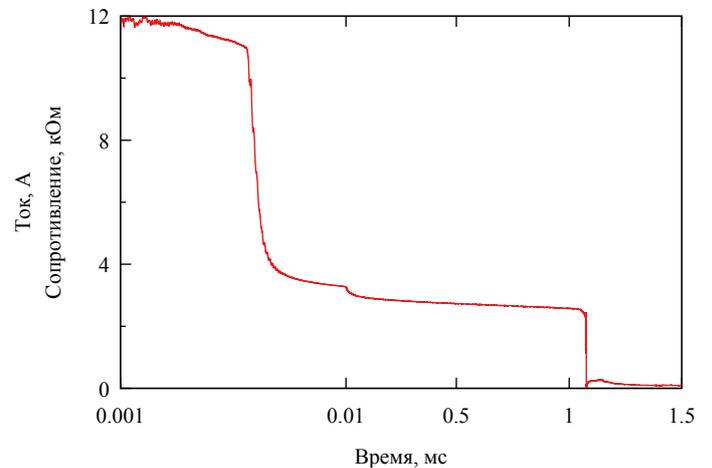
свечения может быть вызвано большим количеством мелких ответвлений, на которых происходит дополнительное рассеяние света.



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



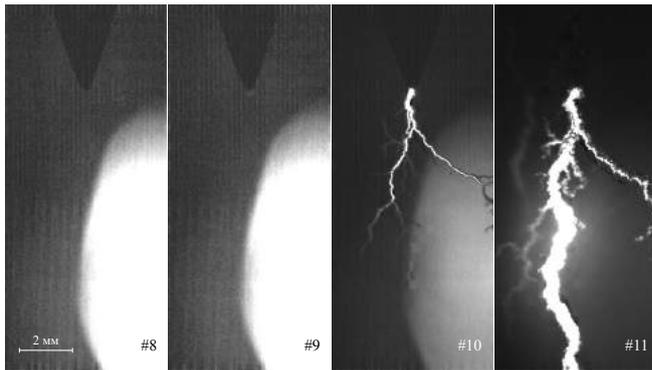
в) 1 — напряжение, 2 — ток



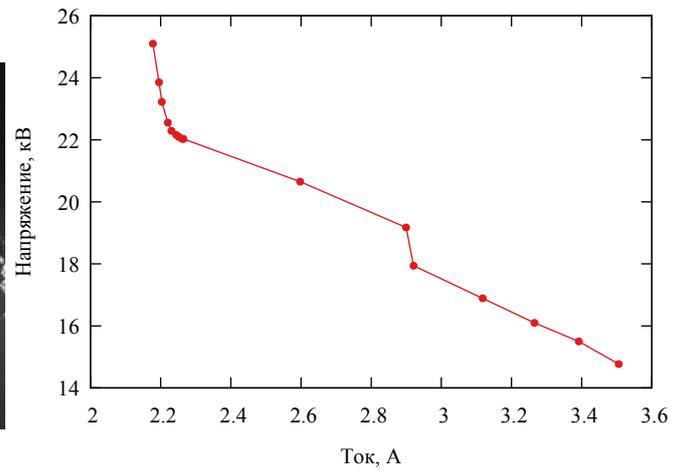
г)

Шкала абсцисс на рисунках (в) и (г) комбинированная: на отрезке [0.001:0.01] масштаб логарифмический по основанию 10, на отрезке [0.01:1.5] — линейный.

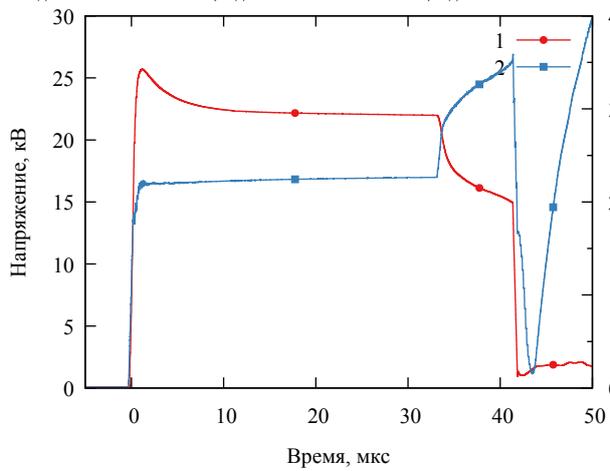
Рисунок 3.14 — Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «быстрое начало—медленное продолжение»



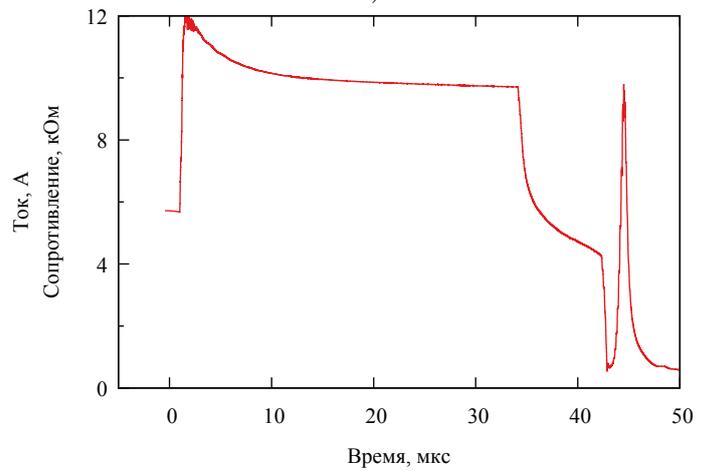
а) 10^5 кадр/с, $t_{\text{эксп}} = 350$ нс, #8: 15.4 мкс, #9: 25.4 мкс, #10: 35.4 мкс, #11: 45.4 мкс



б)

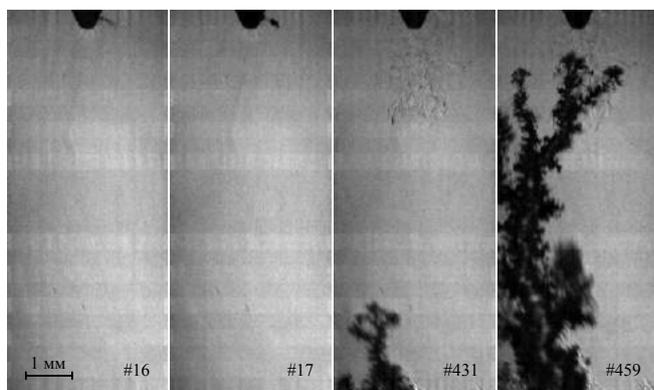


в) 1 — напряжение, 2 — ток

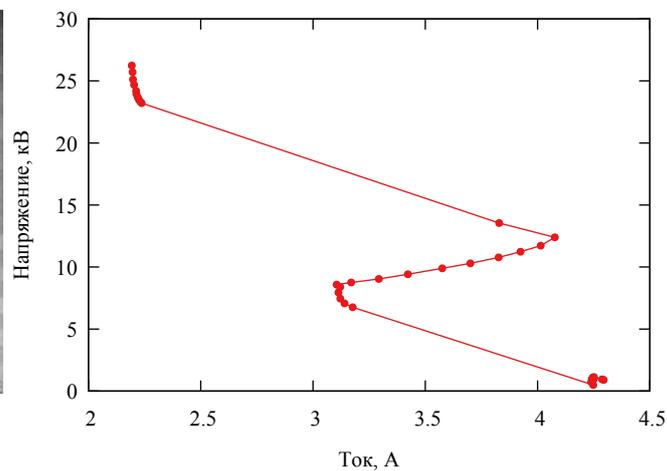


г)

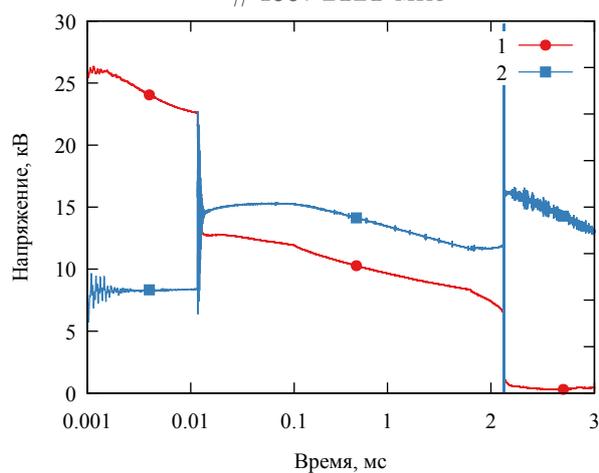
Рисунок 3.15 — Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при «быстром» механизме развития



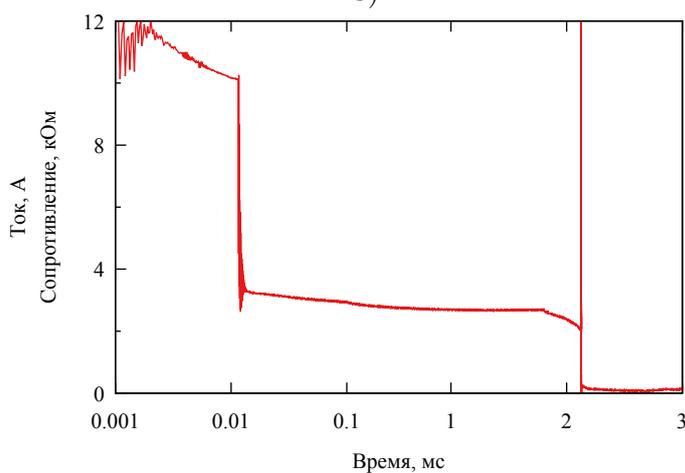
а) 2.1×10^5 кадр/с, $t_{\text{эксп}} = 350$ нс,
 #16: 11.6 мкс, #17: 16.4 мкс, #431: 1987 мкс,
 #459: 2121 мкс



б)



в) 1 — напряжение, 2 — ток



г)

Шкала абсцисс на рисунках (в) и (г) комбинированная: на отрезке [0.001:0.01] масштаб логарифмический по основанию 10, на отрезке [0.01:1.5] — линейный.

Рисунок 3.16 — Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «короткая инициация на аноде—развитие катодного канала»

На рисунке 3.17 приведена энергетическая характеристика пробоя начальной парогововой области для воды с проводимостью 330 и 90 мкСм/см: а) зависимость вложенной в промежуток энергии к моменту пробоя $E_{\text{по.к}}$ от критического размера $l_{\text{по.к}}$; б) зависимость энергии $E_{\text{по.к}}$ от амплитуды U_0 приложенного напряжения; в) зависимость удельной энергии $E_{\text{по.к}}/V_{\text{по.к}}$ от критической размера начальной ПО. При вычислении удельной величины считалось, что вся вкладываемая энергия выделяется в виде Джоулева тепла в сферической прианодной области, диаметр которой равен критической длине начальной парогововой области. Сама величина энергии определялась численным интегрированием по точкам осциллограмм тока и напряжения от момента подачи импульса напряжения до пробоя начальной ПО.

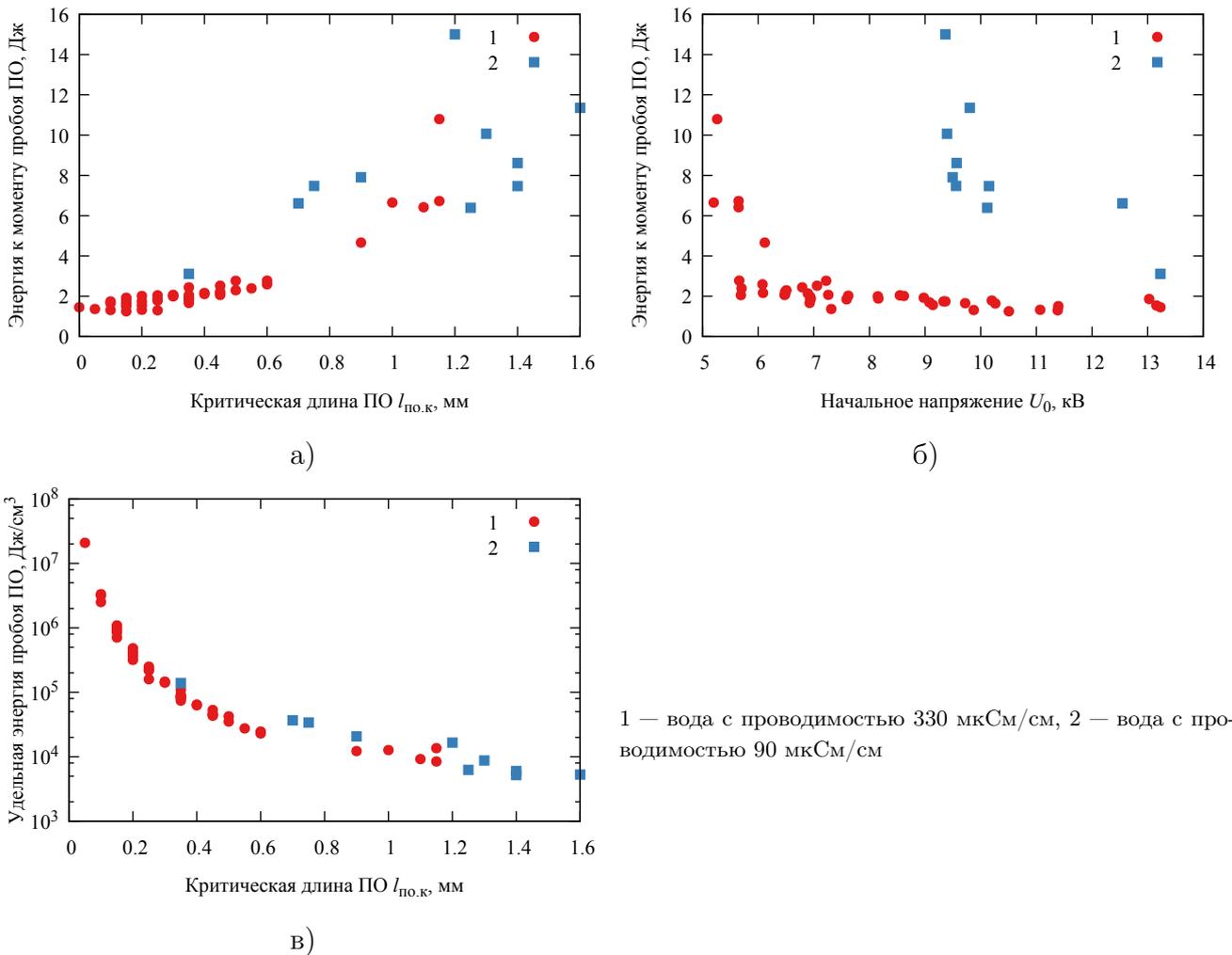


Рисунок 3.17 — Зависимость энергии $E_{\text{по.к}}$, вложенной к моменту пробоя начальной парогововой области, от критического размера $l_{\text{по.к}}$ парогововой области (а), амплитуды U_0 начального напряжения (б) и объемной плотности энергии $e_{\text{по.к}}$ от $l_{\text{по.к}}$ (в)

3.1.6 Влияние коэффициента поверхностного натяжения

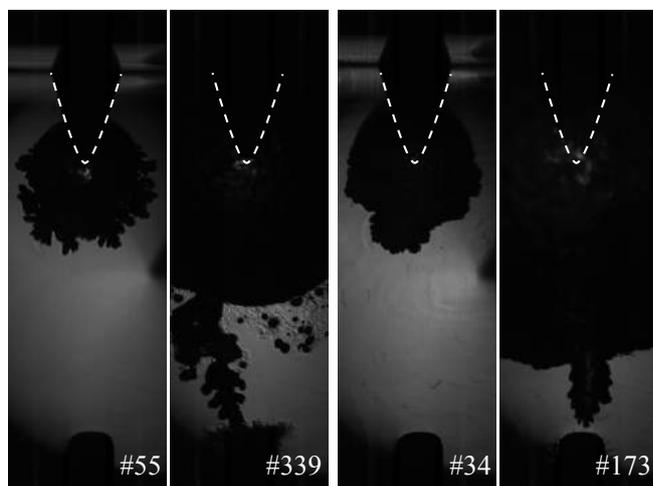
Известно [87], что скорость вскипания (частота зародышеобразования) существенно зависит от коэффициента поверхностного натяжения γ . Исходя из предположения о тепловой природе наблюдаемого медленного пробоя, т. е. с участием вскипания жидкости, можно предположить зависимость, в первую очередь, временных характеристик разряда от γ .

Для проверки этого предположения были проведены две серии экспериментов:

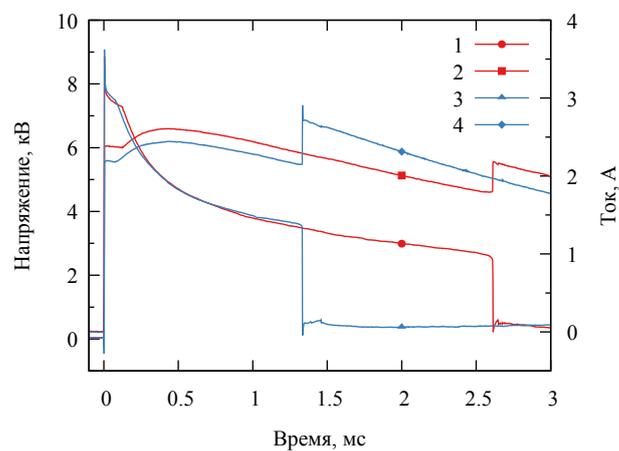
1. в проводящей воде, $\sigma_1 \approx 300$ мкСм/см, $\gamma_1 \approx 72$ мН/м;
2. в смеси изопропилового спирта с проводящей водой (в объемном соотношении 40:60) + Na_2SO_4 , $\sigma_2 \approx 250$ мкСм/см, $\gamma_2 \approx 28$ мН/м.

Поскольку спирт обладает крайне слабой проводимостью, то для обеспечения близких значений тока и напряжения проводимость смеси регулировалась путем добавления сульфата натрия.

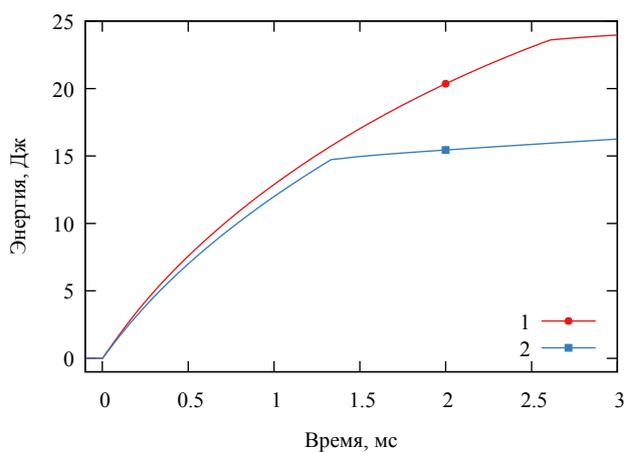
На рисунке 3.18 приведены внешний вид разрядного канала и осциллограммы основных электрических характеристик для обоих значений γ . Основной отличительной чертой влияния γ является сокращение длительности обеих стадий развития разряда, характерных для медленного («теплового») пробоя проводящей жидкости — стадии роста начальной парогазовой области до момента её пробоя, т. е. стадии зажигания разряда, и стадии распространения канала разряда вплоть до замыкания промежутка, т. е. стадии формирования разряда. Так, для γ_1 : $\tau_{зз} = 125$ мкс и $\tau_{\text{ф}} = 2.48$ мс, а для γ_2 : $\tau_{зз} = 77$ мкс и $\tau_{\text{ф}} = 1.25$ мс. При этом критический размер начальной ПО, при котором происходит её пробой, не меняется, $l_{\text{по.к}} \approx 0.5$ мм. Энергия, вложенная в разрядный промежуток к моменту пробоя начальной парогазовой области, также отличается примерно в два раза: 1.1 и 2.3 Дж.



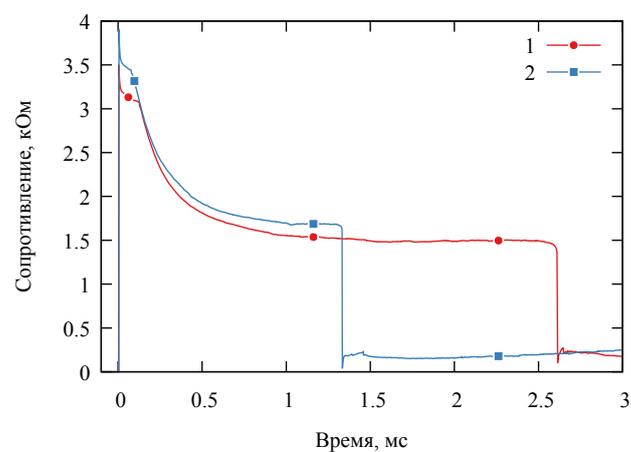
а) #55: 423 мкс, #339: 2.6 мс
 б) #34: 263 мкс, #173: 1.3 мс



в)



г)



д)

В обоих случаях начальное напряжение $U_0 \approx 9.2$ кВ, $\sigma_1 \approx 300$ мкСм/см, $\sigma_2 \approx 250$ мкСм/см. К γ_1 относятся: а); в) кривые 1 и 2; кривые 1 на г) и д). К γ_2 относятся: б); в) кривые 3 и 4; кривые 2 на г) и д). Белым пунктиром на а) и б) обозначены контуры анода.

Рисунок 3.18 — Внешний вид (а-б), осциллограммы напряжения, тока (б), вложенной энергии (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде при двух значениях коэффициента поверхностного натяжения: $\gamma_1 \approx 72$ мН/м, $\gamma_2 \approx 28$ мН/м

3.2 Влияние объёмных и поверхностных микропузырьков на развитие разряда в воде с различной начальной проводимостью

Моделирование развития электрического разряда в пузырьках [52; 88–90] и в небольших их группах [91], помещенных в диэлектрическую жидкость, показывает, что их пробой зависит в основном от величины напряженности поля, размеров пузырьков (точнее от величины pR , где p — давление внутри пузырька, R — радиус пузырька [89]), диэлектрической проницаемости жидкости. Влияние размера объясняется наличием критической длины лавинно-стримерного перехода, а диэлектрическая проницаемость жидкости определяет распределение электрического поля внутри пузырька, которое, в свою очередь, определяет траекторию стримера при пробое пузырька [88]: диаметральную или вдоль поверхности. Экспериментальные результаты исследований пробоя одиночных пузырьков [92; 93] в целом не противоречат этим выводам.

Методы, развиваемые для численного моделирования развития разряда в жидкости в присутствии пузырьков, опираются на расчет концентраций заряженных частиц внутри каждого пузырька и не подходят для моделирования развития разряда за разумное время в микропузырьковой среде, в которой пузырьки распределены в объёме жидкости с некоторой значительной конечной концентрацией тем более, что учёт всех «коллективных» эффектов становится затруднительным. Тем не менее, развитие пробоя в каком-то одном пузырьке еще не гарантирует замыкания разрядного промежутка, а для проводящих жидкостей задача дополнительно усложняется необходимостью учета выделения тепла и фазовых превращений под действием токов проводимости в жидкости. Для исследования пробоя микропузырьковой среды экспериментальный подход в настоящий момент остаётся наиболее информативными.

Для исследования влияния объёмных и поверхностных пузырьков на развитие разряда в воде была проведена серия экспериментов, в которой исследовались различные пузырьковые «конфигурации»:

1. микропузырьки со среднеарифметическим диаметром $d_{10} = (40 \pm 10)$ мкм в межэлектродном объёме и крупные пузырьки (~ 400 мкм) на поверхности обоих электродов;
2. микропузырьки в межэлектродном объёме и «чистые» электроды (без видимых пузырьков, т. е. диаметром менее ~ 15 мкм);
3. пузырьки только на аноде;
4. пузырьки только на катоде;
5. пузырьки только на поверхности обоих электродов.

Так как для жидкостей с повышенной и пониженной проводимостью характерны различные механизмы развития разряда, влияние микропузырьков исследовалось при двух значениях проводимости: при $\sigma_1 \approx 330$ мкСм/см и при $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см.

Микропузырьки в объёме жидкости получались методом её декомпрессии при атмосферном давлении после длительного растворения в ней воздуха под давлением 7 атм. Растворение происходит в барботажной колонне в течение часа. После этого через узкое сопло

жидкость под тем же давлением подаётся в разрядную камеру, открытую в атмосферу, в которой и происходит образование микропузырьков во всем объёме.

Контроль размеров пузырьков осуществлялся по теневым изображениям, после статической обработки которых строилось распределение микропузырьков по диаметрам. Пример такого распределения приведен на рисунке 3.19. Распределение обладает хорошей повторяемостью при соблюдении постоянных условий: давления газации, объёма газимуемой воды, времени газации, положения сопла при декомпрессии. В силу быстрого падения оптической прозрачности микропузырьковой среды с повышением объёмного газосодержания φ , при доступной интенсивности источника света метод позволяет работать в диапазоне $\varphi < 1.5\%$.

При декомпрессии и заполнении разрядной камеры микропузырьковой жидкостью на электродах в отсутствие специальных мер формируются крупные пузырьки. Таким образом получается одна из исследуемых конфигураций. Для исследования конфигурации с «чистыми» электродами на время газации электроды закрываются защитным материалом, который удаляется незадолго ~ 5 с до подачи импульса напряжения. Для сравнительного исследования влияния крупных пузырьков на поверхности электродов на развитие разряда, пузырьки, постепенно образующиеся на стенках камеры, пересаживались на соответствующий предварительно очищенный электрод. Для исследования конфигурации с мелкими пузырьками, покрывающими электроды, использовалось естественное газовыделение из жидкости на поверхность электродов, которое занимает ~ 10 мин.

При проведении экспериментов с микропузырьками использовалась модифицированная разрядная ячейка, в которой была уменьшена ширина стенки, ориентированной вдоль линии зрения фотокамеры с целью повышения яркости прошедшего через микропузырьковую среду света. Электродная система была заменена на горизонтально ориентированную, выполненную из фольфрамовых стержней диаметром 1.8 мм с сохранением основных геомет-

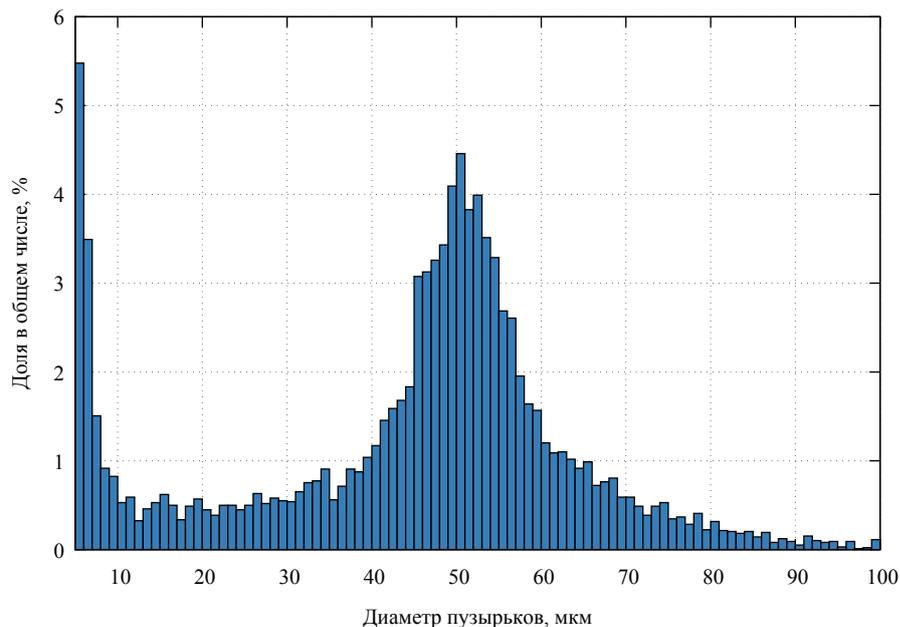


Рисунок 3.19 — Распределение диаметров микропузырьков, полученных методом декомпрессии при давлении растворения 7 атм, среднеарифметический диаметр $d_{10} = (40 \pm 10)$ мкм

рических параметров — острейность анода и скругленность кромки рабочего торца катода, длина межэлектродного промежутка 10 мм.

3.2.1 Микропузырьки в проводящей воде

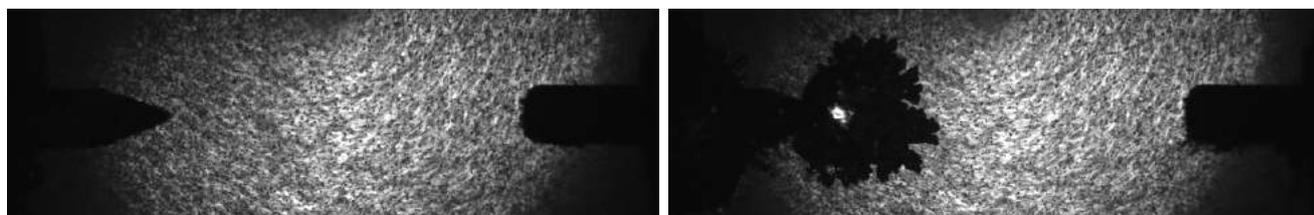
Исследования влияния микропузырьков на пробой в воде с повышенной проводимостью (330 мкСм/см) проводились при напряжениях, близких к пробойному для воды без пузырьков $U_{\text{пр.мин}} \approx 9$ кВ, и при перенапряжении до $1.5U_{\text{пр.мин}}$. Первыми проводились исследования с «чистыми» электродами (рисунок 3.20). В указанном диапазоне напряжений механизм разряда не отличался от наблюдаемого ранее в чистой проводящей воде, т. е. реализовался «тепловой» механизм разряда, временные характеристики которого также оставались неизменными.

На инициацию пробоя в проводящей воде в большей степени влияют пузырьки на поверхности электродов. В изначально покоящихся до подачи напряжения пузырьках (рисунок 3.21а, яркие точки в центрах пузырьков – изображения источника подсветки) в первые 8 мкс происходит пробой (рисунок 3.21б). При этом пробой анодных пузырьков выглядит как возникновение светящейся «перемычки» между поверхностями электрода и пузырька, проходящей практически по диаметру, а в катодных пузырьках возникает, скорее, равномерная засветка (рисунок 3.21б). Однако на следующем кадре (рисунок 3.21в) в катодных пузырьках также наблюдается возникновение похожих «перемычек». Критический радиус пузырька, в котором возможен пробой, из [4] можно оценить как

$$r_c = \frac{U_p(2\varepsilon + 1)}{6\varepsilon E},$$

где U_p — падение напряжения на пузырьке, соответствующее кривой Пашена, E — поле в жидкости, ε — диэлектрическая проницаемость окружающей жидкости.

Таким образом, наличие поверхностных пузырьков приводит к смене наблюдаемого механизма развития разряда. Инициация происходит одновременно на обоих электродах. На

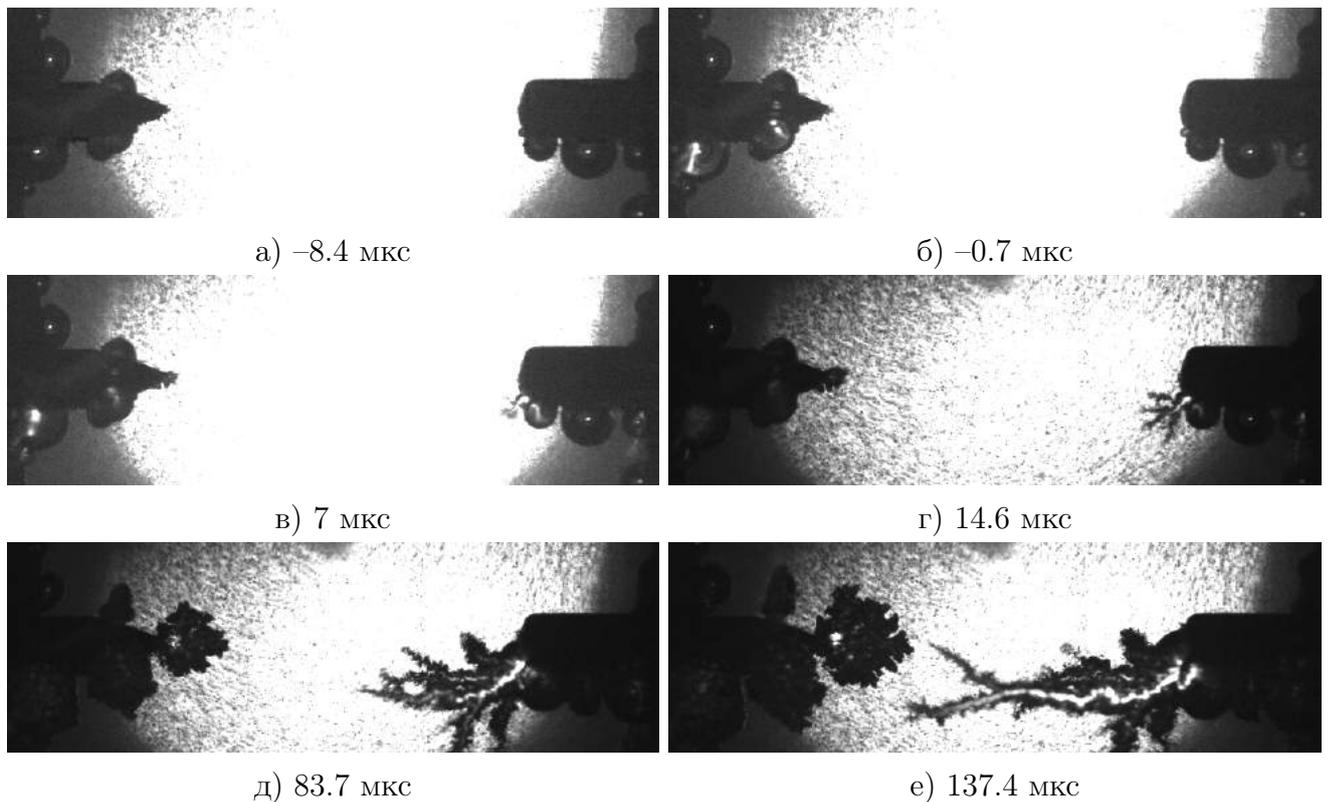


а) до подачи напряжения

б) $t = 315$ мкс

Анод – слева, катод – справа. Горизонтальная ориентация электродов. Промежуток 10 мм. Равномерная зернистость на светлом фоне между электродами – распределенные микропузырьки.

Рисунок 3.20 — Развитие электрического разряда в проводящей воде с микропузырьками при напряжении $1.5U_{\text{пр.мин}}$

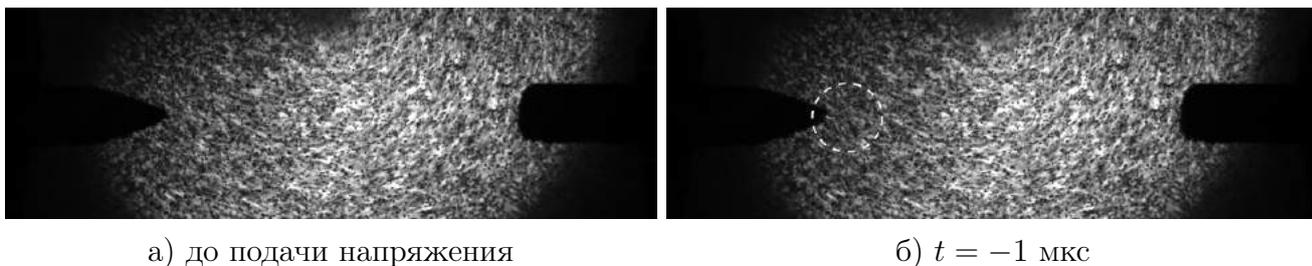


Яркость изображений а), б) и в) увеличена относительно г), д) и е) искусственно (в стандартной программе управления фотокамерой Phantom Camera Control Software, версия 2.7) с целью сделать видимыми процессы в поверхностных пузырьках. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

Рисунок 3.21 — Развитие электрического разряда в проводящей воде с микропузырьками и поверхностными пузырьками на обоих электродах при напряжении $U_0 = 1.5U_{\text{пр.мин}}$

аноде она связана как с пробоем поверхностных пузырьков, из которых впоследствии развиваются боковые каналы (рисунки 3.21д и 3.21е), так и с ростом парогазового пузырька у острия и его дальнейшей ионизацией, наблюдавшимся ранее при исследовании пробоя проводящей воды без пузырьков (см. раздел 3.1). На катоде инициация и дальнейшее развитие канала происходят при пробое поверхностных пузырьков, находящихся в области максимальной напряженности поля. После инициации каналов происходит их встречное движение, однако скорость канала с катода значительно превышает скорость анодного канала (~ 50 против ~ 12 м/с) и перекрытие промежутка происходит в основном катодным каналом.

Следует отметить, что наблюдаемый своеобразный «эффект полярности», выражающийся в предпочтительном развитии разряда с катода при инициации на обоих электродах и значительно большей скорости его распространения даже при более низкой напряженности поля у катода, определяемой его геометрией, еще предстоит исследовать более подробно и найти ему объяснение.



$U_0 = 1.5U_{\text{пр.мин}}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения. На втором кадре (б) с острия анода развивается тонкий слабосветящийся канал длиной ~ 1 мм. Пунктиром обозначена область его развития. Замыкание и переход в дуговую фазу происходит на следующем кадре (здесь не приведен).

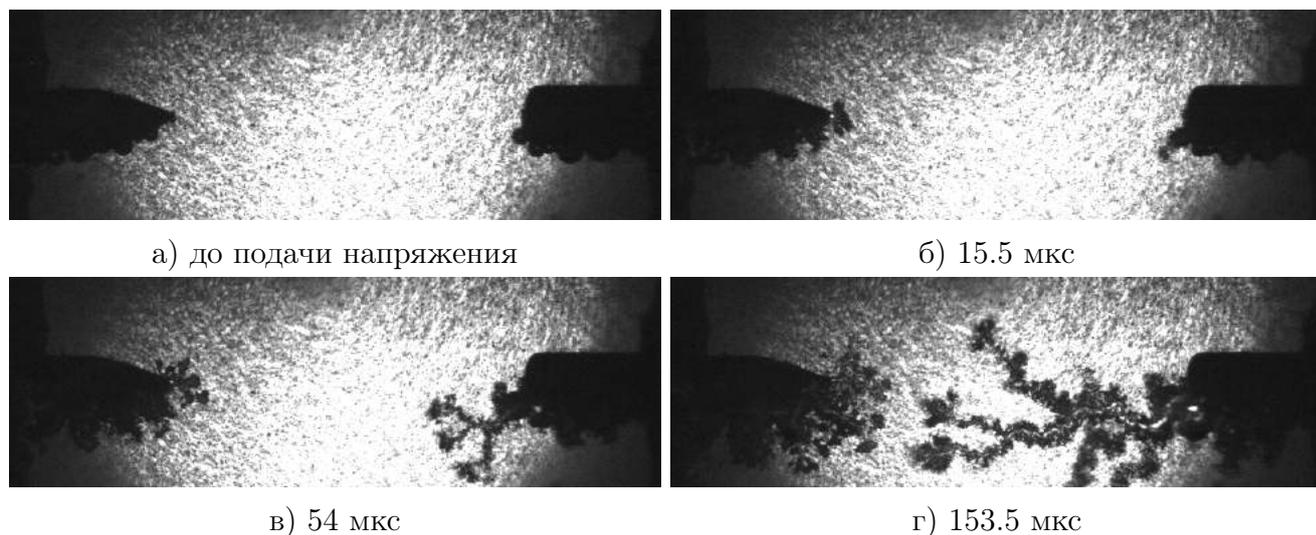
Рисунок 3.22 — Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с микропузырьками при напряжении $1.5U_{\text{пр.мин}}$

3.2.2 Микропузырьки в слабопроводящей воде

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

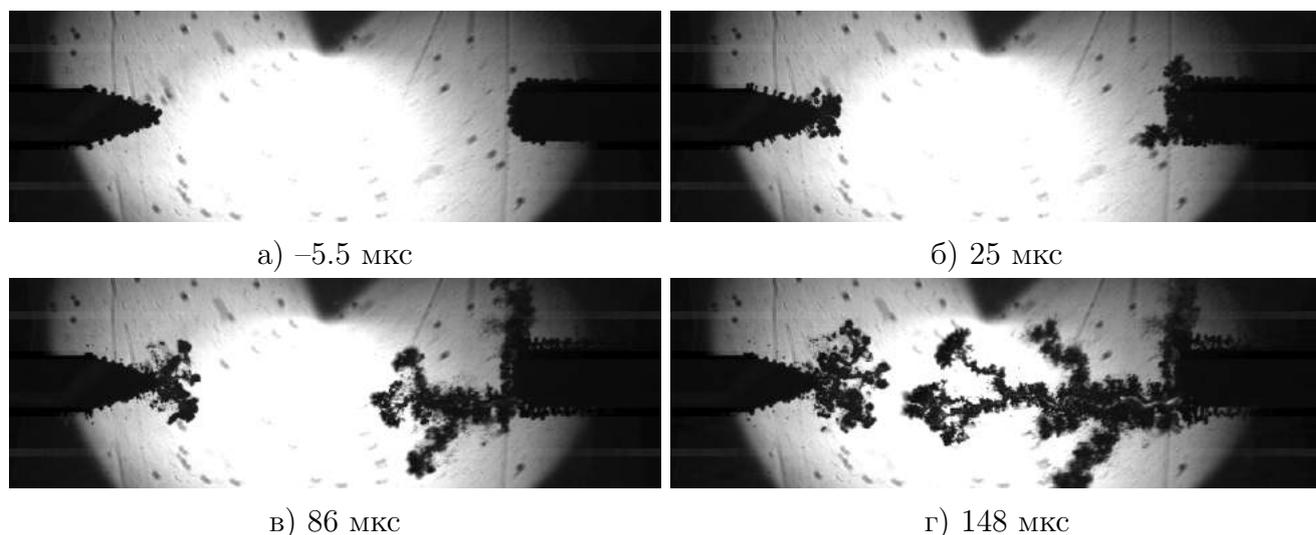
При максимальном перенапряжении и отсутствии поверхностных пузырьков объемные микропузырьки не оказывают заметного влияния на временные характеристики реализующегося «стримерно-лидерного» механизма. Наблюдаемая сквозь завесу микропузырьков структура канала (рисунок 3.22б) не отличается от наблюдавшейся при сходных условиях без пузырьков. Полное время пробоя при этом составляет ~ 15 мкс.

При напряжениях, близких к пробойному, конфигурация с объёмными и поверхностными пузырьками приводит, как и в воде с проводимостью $\sigma_1 \approx 330$ мкСм/см, к инициации в пузырьках на обоих электродах (рисунок 3.23). Время развития такого разряда с большой точностью совпадает для случаев обеих проводимостей σ_1 и σ_2 и составляет ~ 160 мкс. Следует сразу отметить, что в отсутствие объёмных микропузырьков (конфигурация №5) в слабопроводящей воде наблюдается точно такая же картина (рисунок 3.24): инициация на обоих электродах, перекрытие промежутка преимущественно катодным каналом, время пробоя ~ 160 мкс. При том же напряжении и полном отсутствии видимых пузырьков происходит растекание заряда, возможно медленное образование парогазовых пузырьков, которые не приводят к инициации. 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).



$U_0 \approx U_{\text{пр.мин}}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

Рисунок 3.23 — Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с микропузырьками и поверхностными пузырьками на обоих электродах



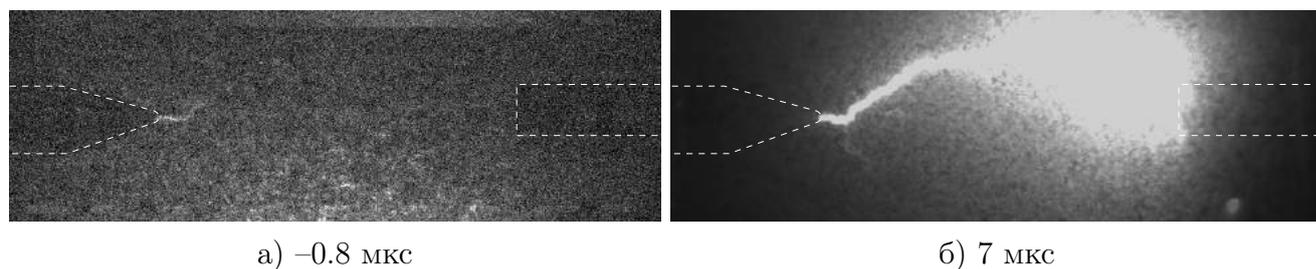
$U_0 \approx U_{\text{пр.мин}}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

Рисунок 3.24 — Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с поверхностными пузырьками на обоих электродах

В [89] показано, что при заданном напряжении не любые пузырьки должны приводить к инициации разряда. Данный факт подтверждается и экспериментально. Для этого при $U_0 \approx U_{\text{пр.мин}}$ было проведено два эксперимента, 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 объем 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 пузырь к инициации разряда не привел. Таким образом, можно

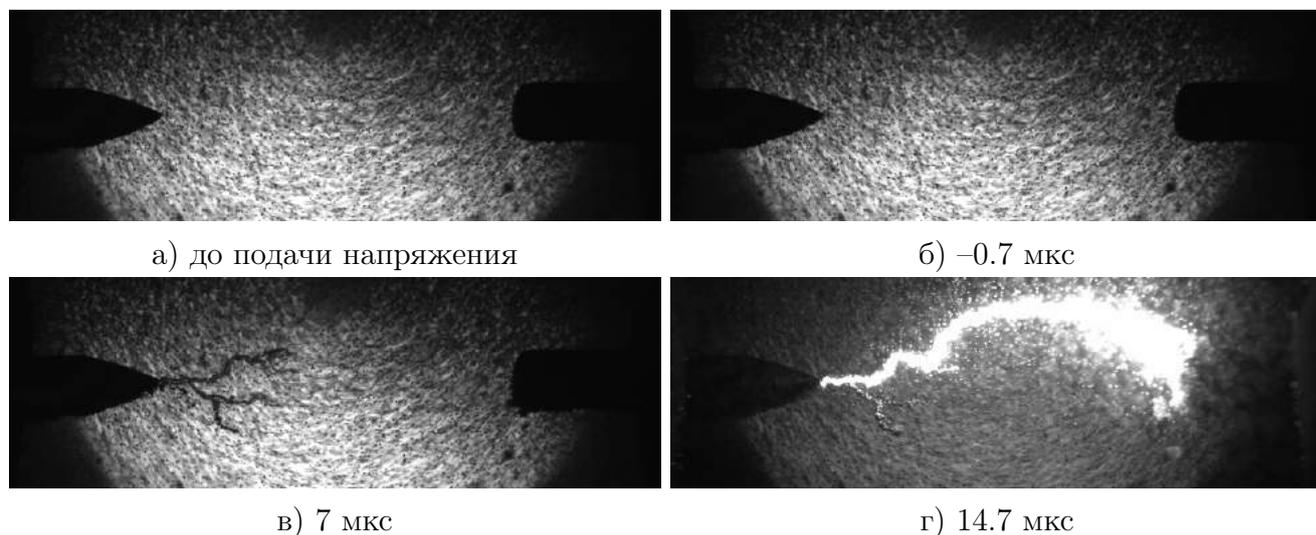
предположить, что для данной электродной системы и диапазона напряжений критический размер поверхностных пузырьков, приводящих к инициации разряда, лежит в диапазоне 0.4–1 мм.

Для определения влияния на механизм разряда именно объемных микропузырьков была проведена серия экспериментов, в которых электроды оставались изолированными от газированного объема жидкости до момента подачи напряжения, исключая, таким образом, возможность образования поверхностных пузырьков. Было установлено, что присутствие объемных микропузырьков приводит к сокращению времени пробоя на два порядка: ~ 15 мкс в присутствии микропузырьков (рисунок 3.25) 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 (рисунок 3.26). В первые 5 мкс



$U_0 \approx U_{\text{пр.мин}}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения. Пунктиром обозначены контуры электродов.

Рисунок 3.25 — Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде с микропузырьками при повышенном газосодержании



$U_0 \approx U_{\text{пр.мин}}$, $\sigma_2 \approx 35$ мкСм/см. Частота следования кадров 130000 кадр/с, экспозиция 6 мкс. В подписях указано время **начала** экспозиции кадра относительно момента подачи импульса напряжения.

Рисунок 3.26 — Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде с микропузырьками при пониженном газосодержании

после подачи напряжения (рисунок 3.266) у острия возникает едва различимая «паутинка» из тонких тёмных каналов, проникающая примерно на 2 мм вглубь промежутка. Уже на

следующем кадре (рисунок 3.26в) несколько ветвей «паутинки» получают развитие, и образуется «кисть» с видимым диаметром 150–200 мкм, рост которой приводит к замыканию.

3.3 Пробой трансформаторного масла с пузырьками газа

Одно из перспективных направлений разработки систем защиты высоковольтного маслонаполненного оборудования от последствий возникновения внутри корпуса волн давления конечной амплитуды связано с возможностью их ослабления при прохождении через газожидкостную микропузырьковую среду [94; 95].

Распространение и диссипация акустических волн и волн давления конечной амплитуды исследуются теоретически и экспериментально довольно давно [96], однако сложность процессов взаимодействия волн с распределенными газовыми включениями и неоднозначность теоретических подходов при повышенном газосодержании поддерживает интерес к данной теме [97–100], а установление демпфирующих свойств среды в конкретных условиях требует проведения экспериментальных исследований.

Для исследования демпфирующих свойств и электрической прочности была выбрана микропузырьковая смесь на основе трансформаторного масла марки ГК и элегаза (гексафторида серы), которые являются традиционными изоляторами для высоковольтного оборудования. Для оценки влияния сорта газа в составе смеси на результирующую электрическую прочность аналогичные эксперименты проведены для смеси трансформаторного масла с пузырьками воздуха.

3.3.1 Затухание акустических волн и волн конечной амплитуды

Измерения затухания акустических волн и волн конечной амплитуды проводились в оптически прозрачной ёмкости объемом 10 л.

Для исследования **акустических волн** в съёмной крышке ёмкости смонтированы неподвижно гидрофоны (рисунок 3.27а), один — принимающий звуковой сигнал, другой — генерирующий звуковой сигнал. Установка снабжена следующим оборудованием производства компании *Brüel and Kjær* (Дания):

1. гидрофоны Type 8105 (могут работать как в качестве приёмника, так и в качестве передатчика);
2. усилитель мощности Type 2713;
3. усилитель сигнала гидрофона Nexus Type 2692–0S2.

Возбуждение одного из гидрофонов происходит с помощью усилителя мощности, который подключен к цифровому генератору сигналов произвольной формы *Rigol DG4102*.

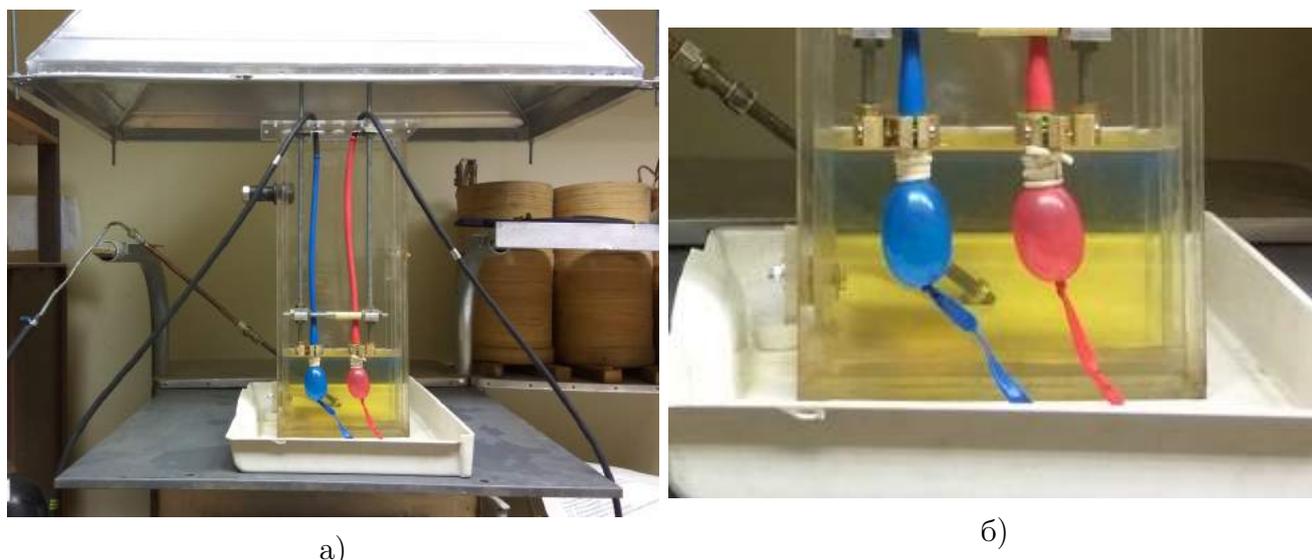


Рисунок 3.27 — Общий вид (а) рабочей ёмкости для исследования распространения волн в газожидкостной среде с установленными гидрофонами и рабочие концы гидрофонов в защитных резиновых поверхностях (б)

Этот генератор выдает синусоидальный сигнал и настроен на резонансную частоту гидрофонов (44.5 кГц). Сигнал (синус) поступает на вход усилителя мощности в виде цугов (100 периодов) с частотой 1 Гц.

Выход усилителя сигнала гидрофона поступает на цифровой запоминающий осциллограф *Rigol DS1054Z*, на каналы №№2–4, причём на указанных каналах установлена различная чувствительность по вертикали. Это необходимо для того, чтобы с достаточной точностью регистрировать амплитуду принятого гидрофоном звукового сигнала, амплитуда которого в ходе эксперимента (разгазирования) меняется на порядки.

Газация масла происходит с помощью сопла Ласкина [101]. Трубка запаянным концом помещается в жидкость, которую необходимо загазировать, а с незапаянного конца в трубку подается газ (воздух или элегаз) под давлением 2–3 атм. При подаче газа из отверстий в нижней части трубки начинается звуковое истечение газа, а высокое тангенциальное напряжение на границе жидкость/газ приводит к формированию мелких пузырьков газа. Побочным эффектом работы сопла является генерация аэрозоля жидкости с диаметром капель, близким к 1 мкм. При работе с трансформаторным маслом этот аэрозоль удалялся с помощью вытяжки. С помощью сопла Ласкина удалось получить величину газосодержания в масле до 0.1 %. Связь между измеряемой скоростью звука a и объёмным газосодержанием φ задаётся уравнением [102]:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\varphi}{a_g^2} + \frac{1 - \varphi}{a_f^2} + \frac{\varphi(1 - \varphi)\rho_g}{p} + \frac{\varphi(1 - \varphi)\rho_g}{\rho_f a_f^2} + \frac{\varphi(1 - \varphi)\rho_f}{p} + \frac{1 - \varphi}{a_f^2}, \quad (3.1)$$

где a — скорость распространения звуковых возмущений в газожидкостной среде, φ — газосодержание, определяемое как отношение объема газа к общему объему газожидкостной среды, p — давление в среде, ρ_f — плотность жидкости при $\varphi = 0$, ρ_g — плотность газа, a_f — скорость звука в жидкости при $\varphi = 0$, a_g — скорость звука в газе.

Эксперименты проводились следующим образом. Ёмкость заполнялась исследуемой жидкостью до уровня 10–20 см. В жидкость помещались гидрофоны с известным расстоянием между их центрами L_c (5–10 см), а также с известным расстоянием между защитными резиновыми поверхностями L_f (2–7 см). С помощью осциллографа проводилось измерение задержки Δt_1 между началом излучения акустического сигнала и началом его приёма при газосодержании $\varphi = 0$. При неизменном положении гидрофонов в ёмкости делалось несколько измерений сигнала-отклика гидрофона на звуковой сигнал общим числом до 5, так как эксперимент показал хорошую повторяемость результатов. Затем жидкость газировалась и проводилось измерение (каждую секунду) профиля сигнала-отклика на звуковой сигнал в течение примерно 10 минут. По истечении этого времени газосодержание в жидкости возвращалось к начальному значению $\varphi = 0$. После этого с помощью режима просмотра записанных осциллограмм проводилась их обработка с регистрацией амплитуды первого пика сигнала V_{fp} , размаха установившегося сигнала V_{pp} а также времени прохождения сигнала по среде Δt_{osc} .

С помощью задержки вычислялись скорость распространения сигнала в газожидкостной среде a и газосодержание φ по следующим формулам:

$$\varphi(a) = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2 \left(\frac{1}{a_f^2} - \frac{1}{a^2} \right)}}{2k_2},$$

$$k_1 = \frac{1}{a_g^2} - \frac{2}{a_f^2} - \frac{\rho_g}{p} + \frac{\rho_g}{\rho_f a_f^2} + \frac{\rho_f}{p},$$

$$k_2 = \frac{1}{a_f^2} - \frac{\rho_f}{p} - \frac{\rho_g}{\rho_f a_f^2} + \frac{\rho_g}{p},$$

$$a = a_w \frac{L_f}{(\Delta t_{osc} - \Delta t_1) a_w + L_f},$$

где a_w — скорость распространения звуковой волны в воде при нормальных условиях (1482.7 м/с [103]), p — атмосферное давление (100 кПа), ρ_f — плотность жидкости (879.0 кг/м³ для масла трансформаторного [104] при давлении 1 атм и температуре 20 °С), ρ_g — плотность газа, a_f — скорость звука в жидкости при $\varphi = 0$, a_g — скорость звука в чистом газе, a — скорость звука в газожидкостной среде, Δt_1 — задержка прихода звукового сигнала при нулевом газосодержании, Δt_{osc} — задержка прихода звукового сигнала при различных значениях φ . Данные для плотности и скорости звука для использовавшихся в экспериментах жидкостей и газов даны в таблице 5.

Затухание звукового сигнала вычислялось по следующим формулам:

$$A_{fp} = 20 \lg \left(\frac{V_{fp}}{V_{fp0}} \right),$$

$$A_{pp} = 20 \lg \left(\frac{V_{pp}}{V_{pp0}} \right).$$

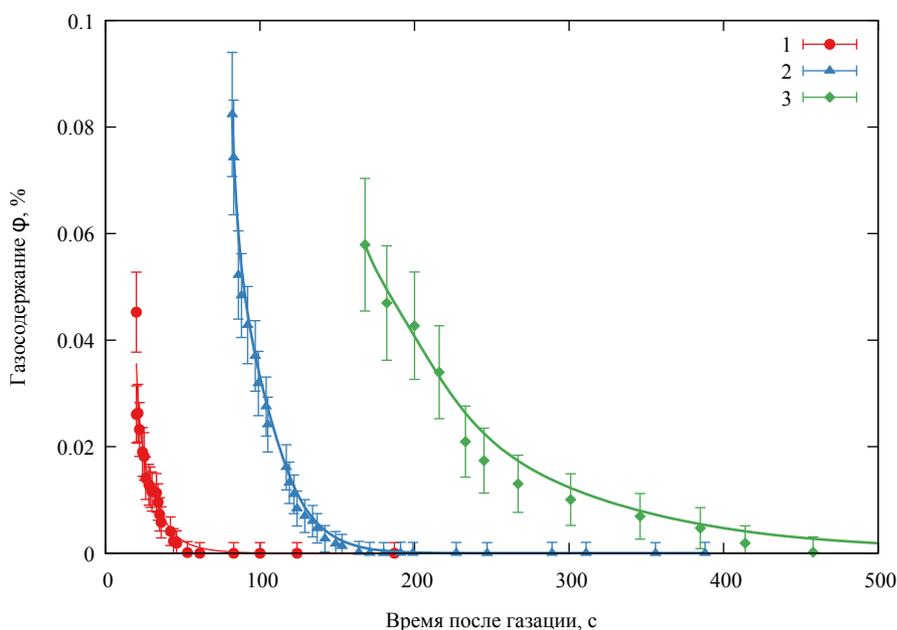
Таблица 5 — Значения скорости звука и плотности для использовавшихся веществ при нормальных условиях (давление 1 атм, температура 20 °С)

Вещество	Скорость звука, м/с	Плотность, кг/м ³
Воздух	344.0 [103, стр. 135]	1.16 [105, стр. 169]
Элегаз	143.5 [106, стр. 30]	6.50 [103, стр. 108]
Вода	1482.7 [103, стр. 138]	998.205 [103, стр. 124]
Трансформаторное масло	1445.0 [103, стр. 140]	879.0 [104, стр. 705]

С учётом амплитудно-частотной характеристики гидрофонов в качестве рабочей выбрана частота 44.5 кГц, при которой амплитуда V_{pp} установившегося сигнала максимальна.

Кроме того, оказалось, что с течением времени, когда газосодержание монотонно уменьшается вследствие всплытия пузырьков на поверхность, амплитуда установившегося сигнала ведет себя немонотонно, хотя ожидается её увеличение. Это может быть следствием того, что во всем объеме может происходить неравномерное разгазирование, то есть $\varphi(x,y,z) \neq \text{const}$. Звуковой сигнал двигается в анизотропной среде и, отражаясь от стенок рабочей камеры, приходит к гидрофону-приемнику по-разному. Таким образом, существенную погрешность при получении искомой зависимости вносит неравномерность разгазации по объему газожидкостной среды. Исходя из полученных осциллограмм было сделано допущение, что погрешность в измерении временной задержки составляет величину, близкую к 2 мкс.

На рисунке 3.28 представлены экспериментальные зависимости газосодержания элегаза и воздуха в трансформаторном масле от времени после газации.



1 — разгазация после однократной газации чистого масла пузырьками элегаза; 2 — разгазация после двукратной газации исходно чистого масла пузырьками элегаза; 3 — разгазация после однократной газации исходно чистого масла пузырьками воздуха.

Рисунок 3.28 — Зависимости объёмного газосодержания элегаза (1,2) и воздуха (3) в трансформаторном масле от времени после газации

Обнаружено, что уменьшение газосодержания в смеси с трансформаторным маслом происходит значительно быстрее, если последнее было газировано элегазом. Если предположить, что уход газа происходит двумя путями — всплытие пузырьков и растворение газа в трансформаторном масле, — то, следовательно, растворение элегаза происходит интенсивнее, чем в случае с воздухом. Действительно, сила Архимеда, действующая на пузырьки, практически одинакова для элегаза и воздуха если предположить, что в этих случаях распределение диаметров пузырьков одинаковое, поэтому процесс их всплытия должен протекать одинаково. Для подтверждения предположения о высокой способности элегаза к растворению в трансформаторном масле был проделан следующий эксперимент. В рабочую емкость был залит один литр трансформаторного масла, куда помещались гидрофоны. Масло газировалось элегазом через сопло Ласкина в течение примерно 10 секунд при давлении элегаза 3 атм. С помощью методики, описанной выше, проводилось измерение амплитуды первого пика V_{pp} , размаха установившегося сигнала V_{fp} , временной задержки Δt_{osc} . Измерения проводились в течение примерно 5 минут с частотой 1 Гц и сохранялись в виде осциллограмм в памяти осциллографа. В момент времени, когда задержка Δt_{osc} и величины V_{fp} и V_{pp} возвращались к первоначальным значениям (когда $\varphi = 0$), начиналось следующее газирование этого же масла элегазом по той же методике. Измерения повторялись, осциллограммы сохранялись в оставшейся части оперативной памяти. Оказалось, что процесс разгазации трансформаторного масла происходит во второй раз менее интенсивно и, тем не менее, по-прежнему интенсивнее, чем в случае газации масла воздухом.

Результаты измерения затухания звукового сигнала частотой 44.5 кГц в газожидкостной смеси «трансформаторное масло–элегаз» представлены на рисунке 3.29.

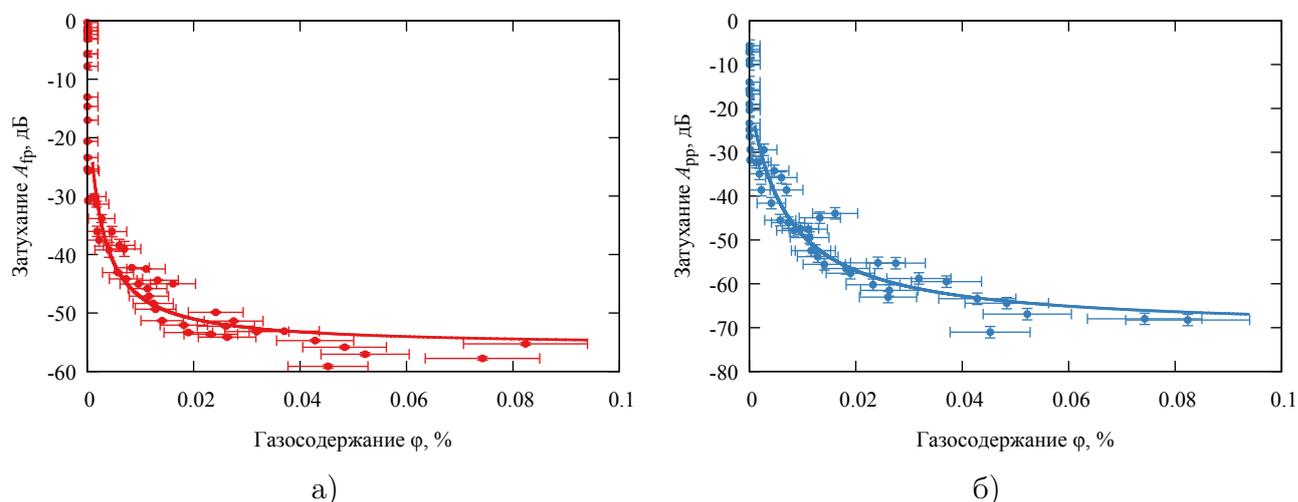
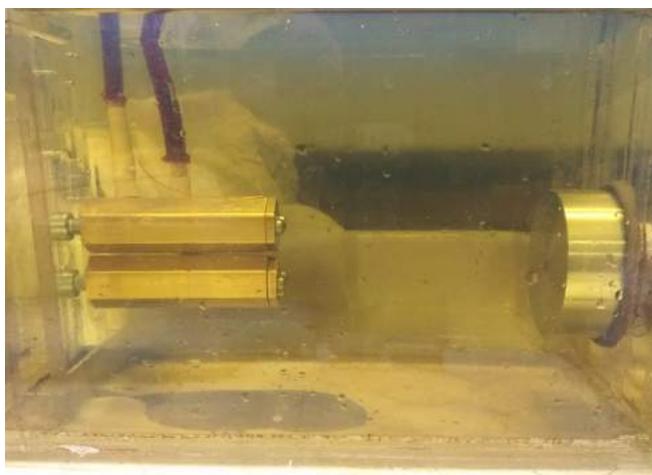


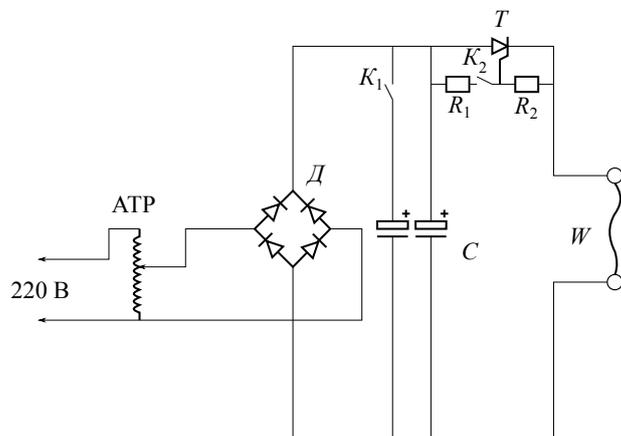
Рисунок 3.29 — Зависимость затухания акустических волн в микропузырьковой среде «трансформаторное масло–элегаз» от величины объёмного газосодержания, определенного по амплитуде V_{fp} первого пика сигнала (а) и по амплитуде V_{pp} установившегося сигнала (б)

Для генерации **волн конечной амплитуды** в жидкости применялся классический метод электровзрыва проводника (проволочки). Для этого вместо гидрофонов в нижней части ёмкости на расстоянии 45 мм от дна с одной стороны установлен держатель проволочки, а с другой — датчик давления *PCB Piezotronics* 113B21 (рисунок 3.30а). Датчик смонтиро-

ван в оправке, представляющей собой алюминиевый цилиндр диаметром 50 мм и высотой 18 мм. Сигнал с датчика давления поступал в предварительный усилитель ICP Sensor Signal Conditioner 482A21, а затем на каналы №№ 2–4 цифрового осциллографа *Rigol DS1054Z* с различной разверткой по вертикали.



а) латунный держатель с проволочкой (слева) и датчик давления в оправке (справа)



б) АТР — автотрансформатор, W — проволочка

Рисунок 3.30 — Внешний вид установки (а) и электрическая схема (б) для исследования затухания волн давления конечной амплитуды в газожидкостной среде

Для управляемого инициирования электровзрыва проволоочки использовалась электрическая схема, представленная на рисунке 3.30б. В схеме от сети 220 В напряжение поступает на регулируемый автотрансформатор АТР, предназначенный для задания нужного напряжения и регулирования процесса зарядки конденсаторной батареи а также для защиты сети от тока короткого замыкания при разряде батареи (для этого перед разрядом рукоятка регулировки выходного напряжения устанавливается в положение «0»). Выходное напряжение автотрансформатора выпрямляется диодным мостом D и поступает на конденсаторную батарею C , которая представляет собой два электролитических конденсатора *CapXon*. С целью регулирования энергии заряда батареи предусмотрена возможность отключения одного конденсатора ключом K_1 . Напряжение заряженной батареи с помощью тиристора T подается на взрываемую проволочку W . Управление тиристором осуществляется путем подачи напряжения с анода на управляющий электрод через токоограничивающий резистор R_1 . Для предотвращения случайных срабатываний тиристора предусмотрен помехозащитный резистор R_2 . Устройство генерирует электрические импульсы длительностью ~ 1 мс при максимальной энергии заряда 300 Дж. Диапазон регулировки энергии заряда 40–300 Дж, выходного напряжения 150–300 В. Электрический импульс поступает на медную проволочку W длиной 1 мм и диаметром 0.26 мм. Размеры проволочки подбирались экспериментальным путем по максимальной передаче энергии заряда батареи во взрыв. Эффективность передачи определялась из условия максимальной разницы напряжений заряженной и разряженной конденсаторной батареи при минимальной массе проволочки (т. е. минимальных потерь на

нагрев, плавление, испарение и ионизацию). Проволочка закреплена в оправе из массивных латунных шестигранников, закрепленных на пластине из оргстекла.

Для фиксации момента инициации электровзрыва на токоподводящий провод был установлен токовый датчик — пояс Роговского, сигнал с которого поступал на канал №1 осциллографа и служил запускающим событием. В силу больших протекающих через проволочку токов, сигнал с датчика мог превышать 100 В. С целью защиты входных цепей канала осциллографа от перенапряжения использовалась дополнительная нагрузка 50 Ом, подключенная параллельно на вход осциллографа.

Эксперименты проводились следующим образом. Рабочая ёмкость заполнялась трансформаторным маслом до того же уровня, что устанавливался в экспериментах с акустическими волнами, 120 мм. Для каждой новой порции масла проводилось два эксперимента: 1) в чистом негазированном масле с целью набора статистики и определения среднего значения сигнала датчика V_{sw0} в чистом масле и задержки распространения сигнала Δt_{sw0} ; 2) в газированном масле. Газация происходила при прежних параметрах: давление 3 атм, в течение 10 с. В держатель устанавливалась новая проволочка. Конденсаторная батарея заряжалась до напряжения 150 В. Дополнительно напряжение контролировалось цифровым мультиметром *Fluke 289*. После отключения автотрансформатора от сети производилась коммутация тиристора и электровзрыв проволочки. С помощью осциллографа определялась амплитуда сигнала датчика V_{sw} . Пример осциллограммы сигнала датчика приведен на рисунке 3.31.



Рисунок 3.31 — Осциллограмма сигнала датчика давления (фиолетовая кривая), по которой определялась амплитуда V_{sw}

Одновременное определение газосодержания акустическим способом и измерения давления в волне конечной амплитуды технически затруднительно из-за возможности выхода из строя акустической аппаратуры. Поэтому в экспериментах с газированным маслом дополнительно фиксировалась времени t между моментами окончанием газации масла и электровзрыва проволочки, а затем, на основе полученной ранее экспериментальной зависимости $\varphi(t)$ (рисунок 3.28, кривая 1) определялось искомое газосодержание. В остальном эксперимент проводился аналогично экспериментам в чистом масле.

Погрешность математической аппроксимации экспериментальной кривой 1 на рисунке 3.28 не превосходит погрешности определения газосодержания и может быть принята на уровне 0.01 % объемного газосодержания. Инструментальная часть погрешности измерения амплитуды сигнала V_{sw} с датчика давления определяется точностью осциллографа. Относительная случайная погрешность (ϵ_{sw}) принимается равной стандартной относительной погрешности единичного измерения при определении V_{sw0} . Величина давления p_{sw} на фронте волны конечной амплитуды относительно атмосферного давления определяется по её известному линейному соотношению с амплитудой сигнала V_{sw} , зафиксированному производителем датчика. Коэффициент пропорциональности использованного датчика $k = 365$ мВ/бар. На основе вычисленных значений величин и их погрешностей строится искомая зависимость затухания волны A_{sw} от объемного газосодержания.

Основная серия экспериментов проведена для чистого масла и для газированного масла в диапазоне значений t от 23.5 с до 151 с, соответствующем кривой разгазации однократно газированного масла, полученной в ходе акустических экспериментов (рисунок 3.28, кривая 1).

Зависимости давления на фронте волны конечной амплитуды и ослабления интенсивности этой волны от объемного газосодержания элегаза представлены на рисунке 3.32.

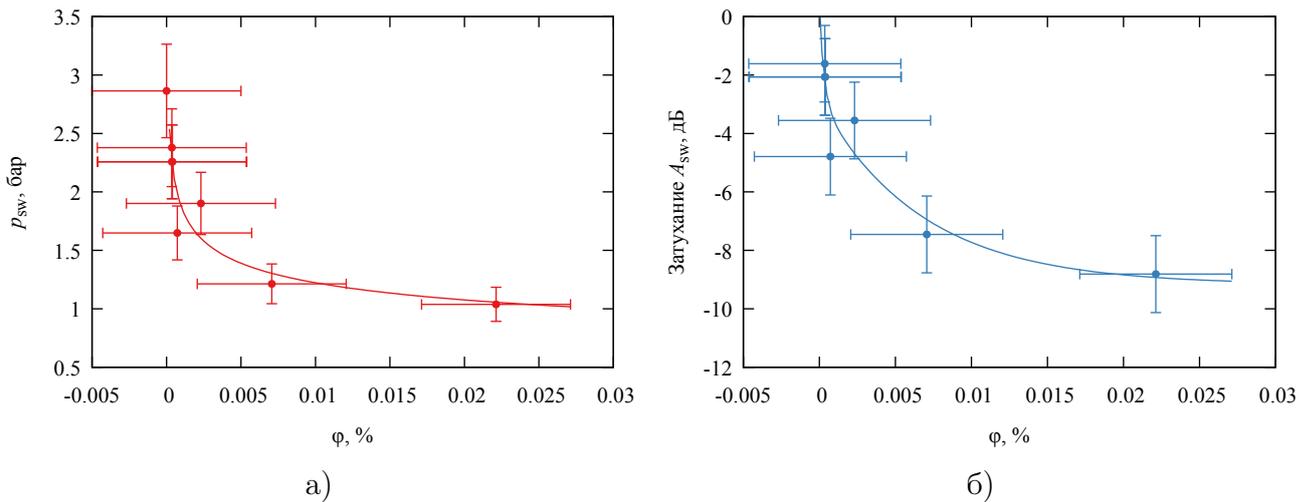


Рисунок 3.32 — Зависимости давления p_{sw} на фронте волны конечной амплитуды (а) и ослабления A_{sw} её интенсивности (б) в зависимости от объёмного газосодержания ϕ элегаза в трансформаторном масле

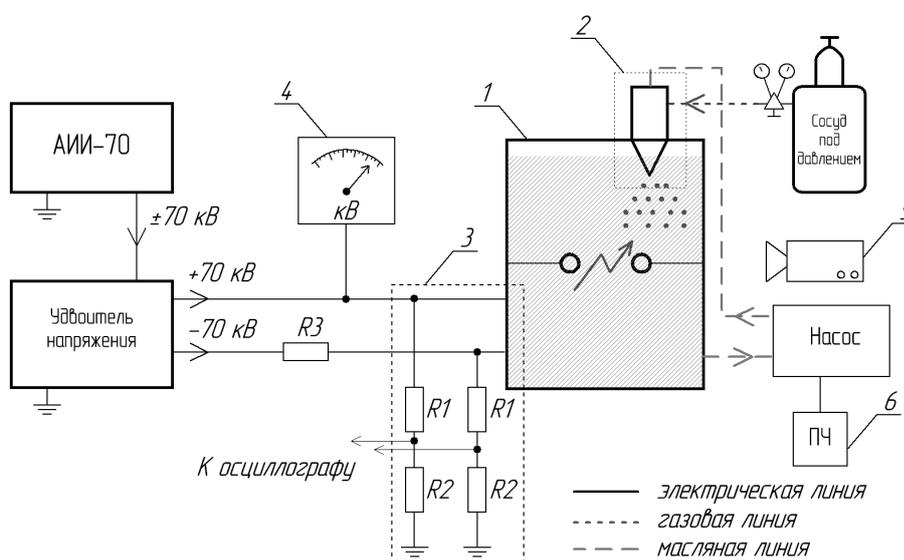
На основе проведенных экспериментов можно сформулировать следующие выводы.

1. При прохождении звуковой волны через газожидкостную среду ее амплитуда существенно уменьшается. При прочих равных условиях уменьшение амплитуды сигнала звуковой волны частотой 44.5 кГц составило величину от -50 до -70 дБ при газосодержании менее 0.1 %.
2. При применении газожидкостной смеси «трансформаторное масло–элегаз» следует учитывать высокую способность последнего растворяться в масле. При прочих равных условиях процесс разгазации смеси «масло–воздух» протекает в 5 раз медленнее, чем для смеси «масло–элегаз».

3. Затухание волн давления конечной амплитуды при прохождении через газожидкостную среду происходит менее интенсивно по сравнению с акустическими волнами. Характерное ослабление составило до -10 дБ при объёмном газосодержании элегаза в трансформаторном масле марки ГК менее 0.1% и выделившейся электрической энергии порядка 70 Дж.

3.3.2 Электрический пробой смеси

Схема экспериментальной установки для исследования электрической прочности газожидкостных смесей на основе трансформаторного масла приведена на рисунке 3.33.



1 — рабочая ёмкость, 2 — генератор микропузырьков, 3 — резистивный делитель напряжения, 4 — киловольтметр С100, 5 — фотокамера RedLake MotionPro X3, 6 — преобразователь частоты.

Рисунок 3.33 — Схема установки для исследования электрического пробоя трансформаторного масла с пузырьками газа

При работе микропузырьковая среда подается в верхней части ёмкости (1) генератором микропузырьков (2) вертикально вниз под давлением, нагнетаемым насосом и сосудом под давлением с рабочим газом (воздухом или элегазом), обеспечивая таким образом перемешивание и более равномерное распределение пузырьков в ёмкости. Интенсивность подачи масла регулируется преобразователем частоты (6), который управляет частотой вращения крыльчатки насоса, расход газа регулируется давлением, устанавливаемом на редукторе газового сосуда.

Генератор может работать как в непрерывном режиме, обеспечивая объёмное газосодержание до 0.1 , так и в режиме однократной газации объёма с последующей разгазацией объёма в течение 100 с с уровня 0.1 до 0.01 .

Электроды установлены на среднем уровне и представляют собой латунные полусферы, профиль которых соответствует ГОСТ 6581–75 (диаметр 36 мм, радиус кривизны поверхности 25 мм). Межэлектродное расстояние 8 мм.

Напряжение на электродах до 140 кВ обеспечивается установкой АИИ–70, снабженной дополнительным удвоителем напряжения. На установке реализуется квазиимпульсный режим подачи напряжения: при помощи магнитного пускателя в первичной обмотке АИИ–70 коммутируется предустановленный уровень напряжения, близкий к пробойному, а затем уровень доводится до пробойного ручкой установки напряжения. Балластный резистор R_3 ограничивает ток после пробоя значением не более 0.5 А. Напряжение контролируется киловольтметром С100 (4). Подключенный к делителю напряжения (R_1/R_2) осциллограф фиксирует момент пробоя и запускает камеру (5).

Для определения изменения электрической прочности трансформаторного масла при его газации были проведены следующие серии экспериментов с частично загрязненным «старым» маслом (здесь и далее ТМ1) и с чистым «новым» маслом (здесь и далее ТМ2). С маслом ТМ1:

1. в отстоявшемся в течение 5 часов масле без пузырьков;
2. в однократно газированном воздухом масле при максимальном газосодержании;
3. в непрерывно газуемом воздухом масле;
4. в однократно газированном воздухом масле по мере разгазации;

с маслом ТМ2:

1. в однократно газированном элегазом масле через 15 минут после газации;
2. в непрерывно газуемом элегазом масле;
3. в однократно газированном элегазом масле по мере разгазации.

Для каждой серии проводилось от 6 до 10 экспериментов. Результаты их обработки представлены в таблице 6

Таблица 6 — Результаты измерений напряжения при пробое трансформаторного масла, газированного воздухом и элегазом

Условия эксперимента	Минимальное напряжение пробоя в серии, кВ	Максимальное напряжение пробоя в серии, кВ	Среднее напряжение пробоя в серии, кВ
ТМ1, отстоявшееся	100	116	106
ТМ1 + воздух	68	80	74
ТМ1 + воздух, непрерывно	68	80	70
ТМ1, дегазация	64	88	—
ТМ2, 15 мин. после газации	96	110	103
ТМ2 + элегаз, непрерывно	82	86	84
ТМ2, дегазация	80	102	—

На рисунке 3.34 представлена динамика дегазации и восстановления напряжения пробоя при постепенном уходе пузырьков воздуха из масла ТМ1 (1) и пузырьков элегаза из масла ТМ2 (2) при одинаковой начальной газации ($\varphi = 0.1$).

В результате проведенных экспериментов установлено, что для «старого» масла ТМ1 с пузырьками воздуха:

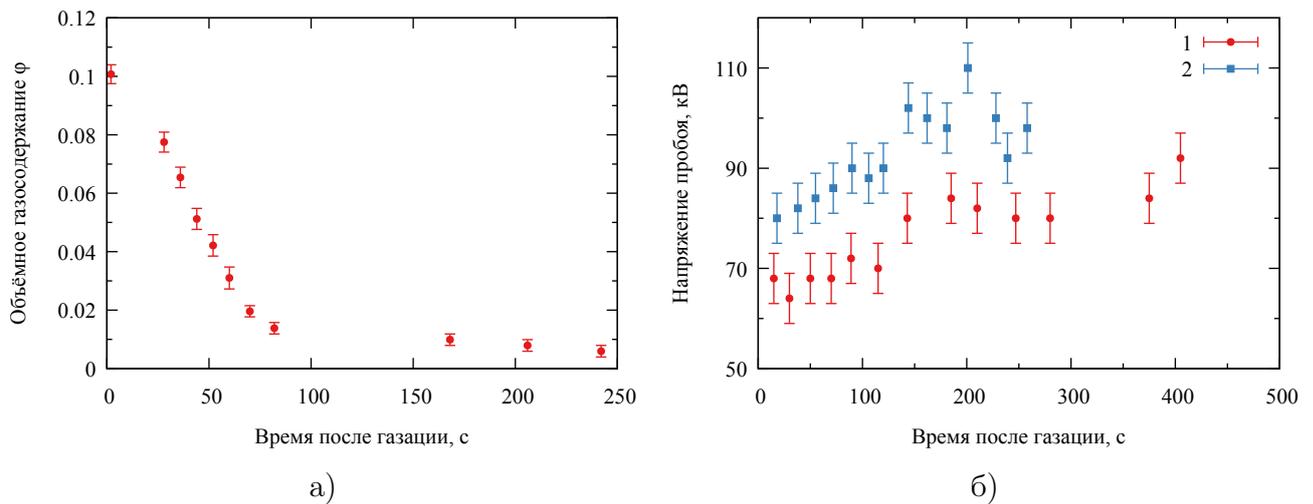


Рисунок 3.34 — Зависимость газосодержания (а) и напряжения пробоя (б) в смеси трансформаторного масла с пузырьками воздуха (1) и элегаза (2) от времени после газации

- пузырьки воздуха снижают пробойное напряжение в масле приблизительно на 30–35 %, с уровня 100–110 кВ до 65–75 кВ;
- при разгазации уровень напряжения пробоя постепенно поднимается, однако не достигает начального, через 5 минут после остановки генератора он составил 90 кВ против 100–110 кВ без пузырьков.

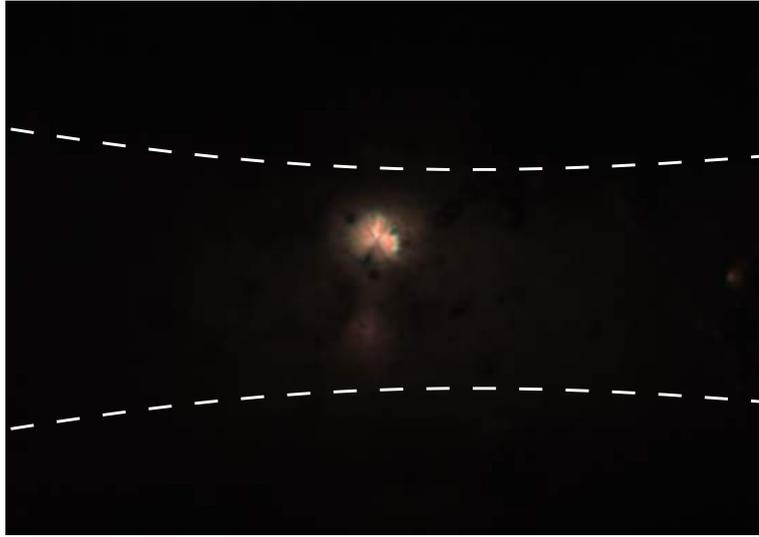
Для чистого неотстоявшегося масла ТМ2 с пузырьками элегаза:

- начальный уровень напряжения пробоя для такого масла находится в диапазоне 110–120 кВ;
- наличие пузырьков элегаза снижает уровень напряжения пробоя приблизительно на 25–30 %, с уровня 110–120 кВ до 80–90 кВ;
- при естественной дегазации уровень напряжения пробоя постепенно поднимается, однако не достигает начального, через 4 минуты после остановки генератора он составил 100–110 кВ против 110–120 кВ без пузырьков.

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.

Следует отметить, что помимо снижения пробойного напряжения наблюдается «стабилизация» его значения. Так, для чистого масла дисперсия составила 18 %, а в присутствии пузырьков элегаза уменьшилась до 5 %.

При высоком газосодержании микропузырьковая среда в масле, как и в воде, становится оптически непрозрачной, и фотосъемка является неинформативной. Однако в экспериментах с более крупными (~ 1 мм) одиночными пузырьками удалось зарегистрировать свечение, исходящее только из одного пузырька, находящегося на удалении от обоих электродов (рисунок 3.35), при напряжении на электродах ~ 110 кВ.



Пунктирными линиями обозначены контуры электродов.

Рисунок 3.35 — Пробой внутри уединенного элегазового пузырька диаметром ~ 1 мм в трансформаторном масле в квазиоднородном поле

Выводы по Главе 3

В настоящей главе представлены результаты экспериментальных исследований развития электрического разряда в воде с проводимостью 35–330 мкСм/см, в воде с микропузырьками воздуха и в трансформаторном масле марки ГК с микропузырьками воздуха и элегаза.

Для проводящей воды установлены основные этапы развития разряда, определены основные количественные характеристики, качественно исследовано влияние на них перенапряжения, начальной проводимости, коэффициента поверхностного натяжения. Исследовано влияние поверхностных и объёмных пузырьков на механизм развития разряда. Для микропузырьковой среды на основе трансформаторного масла определены её демпфирующие свойства в случае прохождения через неё акустических волн и волн давления конечной амплитуды в зависимости от объёмного газосодержания, а также экспериментально определено влияние объёмного газосодержания на величину пробойного напряжения для случаев газации трансформаторного масла пузырьками воздуха и элегаза.

Развитие разряда в проводящей воде характеризуется следующими особенностями. При проводимости 330 мкСм/см напряжение пробоя, при котором происходит замыкание промежутка хорошо проводящим каналом разряда, составило $U_{пр} = 6.1$ кВ в промежутке длиной 1 см между острым анодом и цилиндрическим катодом со скругленной кромкой рабочего торца. При напряжениях $U_0 < U_{пр}$ наблюдаются три диапазона, в каждом из которых реализуется свой набор явлений:

- при $U_0/U_{\text{пр}} \in (0.55, 0.7)$ наблюдаются прогрев прианодной области токами, обусловленными изначальной проводимостью воды, и формирование отдельных парогазовых пузырьков вблизи острия;
- при $U_0/U_{\text{пр}} \in (0.7, 0.8)$ происходит объединение парогазовых пузырьков и формирование одной более крупной области примерно постоянного в течение длительности импульса напряжения размера;
- при $U_0/U_{\text{пр}} \in (0.8, 1)$ наблюдается возникновение свечения внутри сформировавшейся парогазовой области, сопровождающееся её значительным всесторонним расширением.

Выяснение точного механизма возникновения свечения (зажигания разряда) в начальной парогазовой области представляет собой отдельную научную задачу. В данной работе это явление относится на счет возникновения анодного пятна. При достижении $U_{\text{пр}}$ пробой начальной парогазовой области продолжается развитием канала с её поверхности, замыкающим промежуток. Таким образом, в структуре канала выделяются две хорошо различимые составляющие — условно сферическая и «канальная», а развитие разряда проходит через четыре различимые визуально и на осциллограммах стадии:

- разогрев прианодной области;
- формирование парогазовой области вблизи острия;
- появление свечения внутри образовавшейся ПО, сопровождающееся её интенсивным расширением;
- замыкание промежутка одним из каналов, берущих своё начало на поверхности расширяющейся квазисферической светящейся области.

Основными количественными характеристиками этапов развития являются следующие величины:

- время $\tau_{\text{зз}}$ достижения начальной парогазовой областью критического для её пробы размера $l_{\text{по.к}}$;
- время $\tau_{\text{ф}}$ развития разряда от момента пробы начальной ПО до замыкания канала;
- общее время развития разряда $\tau_{\text{пр}}$ от момента подачи напряжения до замыкания промежутка;
- вложенная в межэлектродный промежуток энергия $E_{\text{по.к}}$ и критический размер $l_{\text{по.к}}$ начальной ПО, при которых происходит её пробы.

При увеличении амплитуды напряжения вплоть до двукратного перенапряжения происходит значительный обратно пропорциональный спад таких характеристик, как $\tau_{\text{зз}}$ и $l_{\text{по.к}}$, в то время, как $\tau_{\text{пр}}$ и $E_{\text{по.к}}$ испытывают менее значительный линейный спад. Вольт-амперные характеристики при повышении напряжения в целом не меняют своего вида, однако появляются две особенности:

- уменьшается и исчезает начальный линейный участок с положительным наклоном;
- незадолго до замыкания появляется второй участок с отрицательным наклоном, совпадающий с появлением свечения в «канальной» части разрядного канала.

При уменьшении начальной проводимости до 90 мкСм/см наблюдаются следующие изменения в диапазоне напряжений до $1.5U_{\text{пр}}$:

- напряжение пробоя увеличивается до 9.3 кВ;
- в допробойном диапазоне напряжений исчезает стадия, на которой происходит пробой начальной парогазовой области без дальнейшего замыкания промежутка, иными словами, при выбранной длительности импульса напряжения ~ 5 мс если происходит пробой начальной ПО, то обязательно происходит и замыкание промежутка;
- существенно изменяются значения времен $\tau_{зз}$, $\tau_{ф}$ и соотношение между ними: время задержки зажигания разряда $\tau_{зз}$ увеличивается практически на порядок (с 50–200 до 200–2000 мкс вблизи $U_{пр}$), а время $\tau_{ф}$ сокращается из-за более высокой средней скорости распространения канала разряда время;

Общее же время пробоя $\tau_{пр}$ остаётся приблизительно на прежнем уровне — около 3 мс. При значительных перенапряжениях зарегистрирован переход от описанного выше «теплого» механизма развития разряда к иным, характеризующимся более высокими средними скоростями распространения разрядного канала. В диапазоне перенапряжений 2.8–3 зарегистрировано три различных механизма пробоя:

- появление разрядной «кисти» у анода, быстро проникающей на несколько миллиметров в глубь 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.

Влияние объёмных и поверхностных пузырьков на развитие разряда в воде с различной проводимостью характеризуется следующим:

- в проводящей воде (330 мкСм/см) объёмные микропузырьки не оказывают заметного влияния на время развития разряда, механизм и структуру разрядного канала в диапазоне напряжений $(1-1.5)U_{пр.мин}$, где $U_{пр.мин}$ — пробойное напряжение для воды с той же проводимостью без пузырьков;
- в слабопроводящей воде (35 мкСм/см) объёмные микропузырьки приводят к смене «теплого» механизма пробоя при $U_0 = U_{пр.мин}$ со временем пробоя ~ 1.5 мс «стримерно-лидерным» механизмом с характерным временем пробоя 15–20 мкс при том же напряжении;
- наличие поверхностных пузырьков на электродах нивелирует влияние объёмных микропузырьков вне зависимости от проводимости и приводит к инициации разряда на обоих электродах, при этом скорость катодного канала более чем в 4 раза превышает скорость канала с анода; общее время задержки пробоя составляет ~ 160 мкс и определяется, в основном, временем роста катодного канала.

Для микропузырьковых смесей на основе трансформаторного масла марки ГК с воздухом и элегазом получены зависимости демпфирующих и электроизоляционных свойств от объёмного газосодержания:

- при прохождении звуковой волны через газожидкостную среду с элегазом ее амплитуда существенно уменьшается и при прочих равных условиях уменьшение амплитуды сигнала звуковой волны с частотой 44.5 кГц составило величину от -50 до -70 дБ при газосодержании менее 0.1 %.
- затухание волн давления конечной амплитуды при прохождении через газожидкостную среду происходит менее интенсивно по сравнению с акустическими волнами — характерное ослабление составило до -10 дБ при объёмном газосодержании элегаза в трансформаторном масле марки ГК менее 0.1 % и выделившейся электрической энергии около 70 Дж;
- наличие пузырьков воздуха в масле при объёмном газосодержании не более 10 % снижает пробойное напряжение приблизительно на 30–35 %, с уровня 100–110 кВ до 65–75 кВ;
- при естественной дегазации от воздушных пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, однако, не достигает начального, через 5 минут после остановки генератора пузырьков он составил 90 кВ против 100–110 кВ без пузырьков.
- наличие пузырьков элегаза в масле при объёмном газосодержании не более 10 % снижает напряжение пробоя приблизительно на 25–30 %, с уровня 110–120 кВ до 80–90 кВ;
- при естественной дегазации от элегазовых пузырьков величина напряжения пробоя постепенно поднимается, однако, не достигает начального, через 4 минут после остановки генератора пузырьков он составил 100–110 кВ против 110–120 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. 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 несущественно, что является важным условием использования таких сред в качестве электроизоляционных и демпфирующих для защиты высоковольтного маслонаполненного оборудования от разрушения в нештатных ситуациях, вызванных возникновением короткого замыкания.

Глава 4. Обсуждение экспериментальных результатов

4.1 Тепловой механизм развития импульсного электрического разряда в проводящей жидкости

На основании полученных экспериментальных результатов предложен «тепловой» механизм развития электрического разряда в проводящей жидкости, включающая 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.

Предложенный механизм развития разряда существенно отличается от предложенных ранее авторами работ [5; 58; 107]. В относительно коротких разрядных промежутках, порядка 1 мм, с однородным электрическим полем напряжение инициации разряда и напряжение пробоя существенно совпадают по величине при приложении импульсов микросекундной длительности, а разряд развивается по электротепловому механизму. Время замыкания промежутка по такому механизму определяется энергией, необходимой для образования парогазового «мостика» между электродами.

В условиях проведенных экспериментов время развития разряда в длинном промежутке в неоднородном поле в основном определяется скоростью прогрева небольшой области жидкости вблизи кончика анода и временем её перехода в состояние хорошо проводящей плазмы, которая впоследствии выносит потенциал высоковольтного электрода на кончик канала. Дальнейшее удлинение канала происходит по аналогичному механизму, в котором термическая ионизация новых порций испарившейся жидкости приводит к прорастанию канала по направлению к катоду.

В экспериментах [5; 58] ток через разрядный промежуток длиной 10 мм в проводящей воде не был ограничен балластным сопротивлением и достигал нескольких сотен ампер, а время развития разряда при этом составляло примерно 10 мкс. Согласно [5], вблизи острейшего электрода образуются газовые пузырьки с последующим свечением, распространяющимся по направлению к катоду. При высоких значениях напряженности электрического поля, порядка 40 кВ/см, и значительных перенапряжениях лидерный механизм развития разряда является преобладающим, а скорость распространения канала достигает 20 км/с [5]. При

более низких значениях напряженности, порядка 10 кВ/см, время запаздывания зажигания разряда значительно увеличивается, а скорость распространения лидерного канала уменьшается более чем на порядок до значений ~ 400 м/с. Аналогичная ситуация наблюдалась в [58] при электрическом разряде в растворе сульфата меди с проводимостью 20–500 мкСм/см при длительности импульса напряжения менее 10 мкс, максимальный ток в экспериментах [58] не превышал 100 А. Наблюдаемая при этом скорость распространения разряда составила порядка 5 км/с. Авторы [58] полагают, что формирование большого количества ярко светящихся каналов, быстро распространяющихся от анода, связано с интенсивным образованием пузырьков и их ионизацией в электрическом поле вблизи анода. Предполагалось, что разряд инициируется внутри микропузырьков, возникших в результате электролиза. Авторы [58] отмечают, что в случае приложения коротких высоковольтных импульсов вероятен механизм инициации разряда, связанный с разогревом жидкости и дальнейшим парообразованием, после чего происходит пробой пара внутри образовавшихся пузырьков. Однако количественных оценок не приводится. В той же статье предполагается, что повышение проводимости раствора приводит к повышению концентрации положительных ионов, уменьшению объемного заряда и, как следствие, к уменьшению напряженности электрического поля, числа разрядных микроканалов и увеличению времени задержки пробоя.

Использование в настоящей работе относительно длинных межэлектродных промежутков и ограничение разрядного тока позволяет увеличить время развития разряда и проследить различные стадии его формирования. В такой постановке время развития тепловой неустойчивости может быть определено достаточно точно. Ниже в отдельности рассмотрена каждая стадия развития разряда.

4.1.1 Образование пузырьков в прианодной области

Основным условием развития тепловой неустойчивости вблизи анода является высокий уровень тепловыделения.

Ранее было зафиксировано, что протекание даже слабых автоионизационных токов в сильном электрическом поле ($\sim 10^7$ В/м) у поверхности заряженного положительно острия может приводить к быстрому локальному перегреву диэлектрической жидкости и спонтанному возникновению пузырьков пара [108; 109]. Эмиссия электронов из жидкости за счет туннельного перехода может вызывать фазовые переходы в жидкости и приводить к её взрывному вскипанию [4]. В [87; 110] была предпринята попытка привлечь для объяснения механизма зажигания импульсного электрического разряда с анода в н-гексане в субмиллиметровом промежутке (0.1 мм) процессы, связанные с гомогенным зародышеобразованием в перегретой жидкости. В качестве критерия пробоя предлагалось считать выделение вблизи анода энергии с определенной объёмной плотностью, достаточной для вскипания жидкости. Для скорости зародышеобразования в единичном объёме, т. е. частоты гомогенной нуклеации

авторы [87; 110] использовали формулу Деринга–Фольмера:

$$S = N \exp\left(-\frac{L}{kT}\right) \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m}} \exp\left(-\frac{16\pi\sigma^3}{3kT(p_s - p)^2}\right), \quad (4.1)$$

где N — число молекул в единице объема; L — теплота парообразования на одну молекулу; k — постоянная Больцмана; σ — коэффициент поверхностного натяжения; m — масса молекулы; p_s — давление насыщенного пара при температуре T перегретой жидкости; p — внешнее давление.

Вследствие сильной зависимости S от глубины захода в метастабильную область, т. е. степени перегрева жидкости, граница флуктуационного зародышеобразования является резкой. Если характерный объём поглощения энергии вблизи острия анода порядка r_0^3 , то он связан со средним временем τ ожидания появления зародыша в этом объёме метастабильной жидкости соотношением

$$Sr_0^3\tau = 1. \quad (4.2)$$

Это соотношение является необходимым условием для инициирования пробоя, а время τ определяет среднестатистическое время запаздывания зажигания разряда и зависит от свойств жидкости, напряженности поля а также определяет удельную мощность, вводимую в жидкость для реализации взрывного вскипания.

Решение уравнения энергетического баланса с учетом процесса распространения тепла показывает, что распределение температуры вблизи острия имеет максимум вблизи его вершины [109]. Данная модель качественно согласуется с результатами электрооптических исследований предпробойных явлений в нитробензоле при воздействии импульсами микросекундной длительности [111], в которых эмиссия носителей зарядов предшествовала возникновению микропузырьков. Тепловой механизм образования микропузырьков подтверждается также экспериментальными данными [15; 112] в циклогексане и других углеводородах. Появление микропузырьков и их рост вблизи электродов наблюдается после импульсов тока. Механизмом формирования пузырьков определяется локальным вскипанием жидкости благодаря высокой объёмной мощности.

В проводящей воде, где преобладают токи проводимости, вблизи острия анода также может наблюдаться существенное локальное тепловыделение и происходить взрывное вскипание. Для выяснения распределения напряженности электрического поля вблизи реального острия анода, используемого в разрядной ячейке, и тепловыделения вблизи него было проведено численное моделирование для проводящей воды с использованием программы COMSOL Multiphysics. Было показано (рисунок Б.4 Приложения Б), что при напряжениях, реализующихся в экспериментах, возможен локальный перегрев воды на 50–200 °С, т. е. возможна реализация механизма взрывного вскипания и образования парогазовых пузырьков. Оценить критическое значение объёмной мощности тепловыделения, необходимой для реализации взрывного вскипания, по формулам 4.1 и 4.2 довольно сложно так как даже незначительная неопределенность в термодинамических параметрах приводит к большим расхождениям в частоте нуклеации S , поэтому для оценки возможности реализации режима взрывного

вскипания при развитии разряда в проводящей воде полученные значения объёмной мощности тепловыделения сравнивались с экспериментальными данными [113], полученными для взрывного вскипания воды на пленочном микронагревателе.

Считая острие параболическим, поле вблизи острия анода можно оценить согласно [9]:

$$E_a = \frac{2U}{(r_a + 2x) \ln(2d/r_a + 1)}, \quad (4.3)$$

где U — напряжение на электродах, r_a — радиус кончика анода, x — расстояние от кончика анода, d — межэлектродное расстояние.

В хорошо проводящей жидкости распределение электрического поля можно считать близким к распределению в вакууме. Это поле определяется только распределением тока, которое, в свою очередь, определяется геометрией электродов.

В представленных экспериментах типичное значение амплитуды напряжения составляет $U_0 = 10$ кВ, а радиус кривизны острия анода $r_a = 100$ мкм. При этих значениях E_a может достигать 3×10^5 В/см. Плотность тока при этом составляет порядка $j_a = \sigma E_a \approx 100$ А/см², а соответствующая мощность тепловыделения $W_a = j_a E_a \approx 3 \times 10^7$ Вт/см³.

При такой высокой скорости нагрева ($\sim 10^7$ К/с) в небольшой прианодной области происходит взрывное вскипание жидкости, когда тепловой поток превышает значение 4×10^4 Вт/см² [113]. Если предположить, что область основного тепловыделения ограничивается слоем $2r_a$ у острия анода, а мощность на разрядном промежутке составляет порядка 36 кВт, то средний тепловой поток составит порядка 10^5 Вт/см², которого достаточно для взрывного вскипания.

Плотность энергии, необходимая для вскипания воды при давлении $p_0 + \Delta p \approx 4$ атм, составляет порядка 600 Дж/см³, где Δp — среднее добавочное электрострикционное давление величина которого обсуждается ниже в разделе 4.1.2. Удельная теплота испарения воды составляет 2.53 кДж/см³ и практически не зависит от температуры и давления, что приводит к значению $Q = 3.13$ кДж/см³ для нагрева и испарения. При мощности тепловыделения $W_a = 3 \times 10^7$ Вт/см³ время, необходимое для нагрева и образования микропузырьков пара составляет $\tau_v = Q/W_a \approx 100$ мкс. Время дальнейшего роста до критического значения составляет порядка нескольких микросекунд и практически не зависит от напряженности электрического поля при её значении менее 10^5 В/см [107].

4.1.2 Ионизация пузырьков вблизи анода

После возникновения первых пузырьков начинается их рост за счет испарения новых порций жидкости со скоростью, зависящей от давления в среде. Возникающее дополнитель-

ное электрострикционное давление в среде дается формулой [107]:

$$\Delta p = \rho \varepsilon_0 \frac{d\varepsilon}{d\rho} \frac{E^2}{2}, \quad (4.4)$$

где ε_0 — проницаемость вакуума, ε — проницаемость жидкости, E — напряженность электрического поля. Для полярных жидкостей, к которым относится вода, справедливо уравнение Онзагера–Кирхвуда–Фрелиха в форме [107]:

$$\rho \varepsilon \frac{d\varepsilon}{d\rho} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{inf}}, \quad (4.5)$$

где $\varepsilon = 80$ для воды, а ε_{inf} — диэлектрическая проницаемость в инфракрасной области, для воды $\varepsilon_{\text{inf}} = 1.78$. Вблизи анода $E = E_a = 3 \times 10^5$ В/см и $\Delta p \approx 4$ атм. В таком случае среднее давление внутри слоя толщиной $2r_a$ составляет порядка 2–3 атм, а результирующее давление p_s внутри пузырьков радиусом r_b :

$$p_s = p_0 + \Delta p + \frac{2\gamma}{r_b}, \quad (4.6)$$

где $p_0 = 1$ атм — атмосферное давление, γ — коэффициент поверхностного натяжения.

Лапласовым давлением можно пренебречь по сравнению с атмосферным и дополнительным электрострикционным. Добавка изопропилового спирта, действуя как поверхностно активное вещество, дополнительно снижает избыточно давление и повышает вероятность образования паровых зародышей. Вследствие усиления поля внутри пузырьков примерно в 1.5 раза [4] наиболее вероятной является инициация пробоя внутри пузырьков.

Пробой внутри пузырьков диаметром более нескольких десятков микрон может описываться кривой Пашена [9]. Электронным прилипанием можно при этом пренебречь, так как скорость прилипания существенно ниже скорости электрон-ионной рекомбинации. Тогда величина поля E_a/p_s , необходимого для пробоя, лежит в диапазоне 100–300 В/см·Торр. В этом диапазоне значений ионизационные процессы могут быть описаны уравнением Таунсенда:

$$\frac{\alpha}{p_s} = A \exp\left(-\frac{B p_s}{E_a}\right), \quad (4.7)$$

где α — первый коэффициент ионизации Таунсенда, $A = 13$ (см·Торр) $^{-1}$, $B = 290$ В/см·Торр [114]. В проведенных экспериментах, следуя формуле (4.7), первый коэффициент лежит в диапазоне 3000–8000 см $^{-1}$. Число электронных лавин характеризуется значением αd и определяет тип пробоя в пузырьке. В микронных пузырьках при $2\alpha r_b \sim 1$ происходит многолавиный пробой. Для более крупных пузырьков ($2r_b > 20$ мкм) когда $2\alpha r_b > 20$ имеет место стримерный пробой [114]. В спиртах значение коэффициента B в среднем в полтора раза ниже [115], что облегчает пробой парогазовых пузырьков. Давление насыщенных паров спирта примерно такое же, как и для воды. Таким образом, пробой происходит в парогазовых пузырьках, возникших в результате взрывного вскипания и достигших критического размера

при котором $2\alpha r_b \sim 1$, а время ионизации можно принять равным нескольким наносекундам [4].

4.1.3 Проводимость плазмы в пузырьках

Плазма в образовавшихся ионизированных пузырьках является неравновесной. Температура электронов может достигать 3 эВ, что существенно выше температуры ионов в прианодной области ($E_a/p_s \sim 100$ В/см·Торр). Такая электронная температура характерна для искровых разрядов в электроотрицательных молекулярных газах при повышенном давлении [114]. Концентрацию электронов n внутри пузырька можно оценить, приняв во внимание высокую скорость ионизационно-рекомбинационных процессов внутри пузырьков, как:

$$\nu_i n = \beta n^2, \quad (4.8)$$

где $\nu_i = \nu_i(E/p) = \alpha(E/p) v_d$ — частота ионизации молекул воды электронным ударом, v_d — скорость электронного дрейфа, β — скорость диссипативной рекомбинации электронов с положительными ионами.

Наиболее интенсивная рекомбинация происходит с комплексными положительными ионами вида $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_m$, m : 1–5. Её коэффициент на порядок выше, чем для остальных ионов. При повышенных значениях напряженности электрического поля дрейфовая скорость электронов $v_d \sim (E/p)^{0.5}$ может достигать 2.5×10^7 см/с. Если принять $\beta = 7.5 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5}$ см³/с [116], то в пузырьках диаметром 10–30 мкм при отсутствии стримеров концентрация электронов может достигать 10^{15} – 10^{16} см⁻³ при $\alpha \sim 10^3$ см⁻¹ [116]. При такой концентрации электронов проводимость плазмы в пузырьках составляет порядка 0.3–1 См/см, что на три порядка превышает проводимость окружающей жидкости. Такое отличие в проводимости приводит к тому, что большая часть джоулева тепла выделяется в прианодной области именно в ионизированных пузырьках.

4.1.4 Развитие тепловой неустойчивости

Развитие тепловой неустойчивости и контракция токовых каналов хорошо наблюдается в объемных разрядах в газах с предыонизацией [115; 117]. Аналогичная нестабильность наблюдается при пробоях в полупроводниках [118] и влажных грунтах [119]. Вольт-амперные характеристики при этом имеют S-образную форму.

Такой тип неустойчивости является одним из наиболее универсальных и наблюдается в большинстве проводящих сред при развитии разряда. Если объемное тепловыделение в среде сильно зависит от температуры, а потери тепла — слабо, то рост температуры уже не

будет скомпенсирован объемными потерями тепла, что приведет в конечном счете к развитию тепловой неустойчивости. Развитие тепловой неустойчивости в сильном электрическом поле выражается на ВАХ в виде участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением [120].

Время развития тепловой неустойчивости в ионизованных пузырьках можно оценить следующим образом. В молекулярных газах джоулева энергия переходит в поступательную энергию молекул посредством колебательно-поступательной релаксации, так как изначально энергия аккумулируется в колебательных уровнях молекул. Таким образом, если время джоулевой «накачки» меньше времени V–T релаксации, то высвобождение энергии носит взрывной характер и происходит за время [121]:

$$\tau_i = \sqrt{\frac{p_s \tau_{VT}}{\sigma_b E^2}}, \quad (4.9)$$

где p_s — равновесное давление пара, τ_{VT} — время V–T релаксации, которое составляет порядка 10^{-8} с для водяного пара [122]. При $p_s = 3$ атм характерное время развития неустойчивости составляет несколько наносекунд и приводит к нагреву газа в пузырьках и формированию термически ионизованной плазмы в двухфазной смеси с температурой порядка 4000–5000 К. Аналогичная ситуация развития тепловой неустойчивости и образования термической плазмы наблюдалась в молекулярных газах [9]. На ВАХ (рисунки 3.7а и 3.7б) к этой стадии относятся участки с $dU/dI < 0$.

Следует отметить, что время от момента приложения напряжения до момента ионизации пузырьков определяется в основном временем нагрева и испарения первой порции жидкости, а описанный механизм развития тепловой неустойчивости и образования термически-ионизованной плазмы имеет много общего с разрядами в плотных молекулярных газах [121].

4.1.5 Распространение плазменного канала

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. При этом замыканию промежутка не предшествовало образование сплошного газового мостика (см. рисунок 3.6), как это происходит в однородном электрическом поле в коротких промежутках [4].

Вблизи анода самоподдерживающаяся термическая ионизация и растущая концентрация электронов обеспечивают высокую проводимость канала и вынос высокого потенциала на кончик канала. Скорость роста канала существенно зависит от напряженности в промежутке. Поскольку среднее поле в промежутке для проводящей воды примерно на порядок ниже

аналогичного значения для дистиллированной воды, развитие канала может происходить только по «тепловому» механизму, т. е. с образованием новых паровых областей, развитием неустойчивости и образованием нового плазменного участка. Скорость распространения канала разряда можно принять равной отношению размера области возмущенного поля на кончике канала ко времени τ нагрева и развития тепловой неустойчивости до хорошо проводящего состояния.

В плотных газах время τ определяется временем развития неустойчивости перед кончиком разрядного канала. Такая модель использовалась для объяснения дозвуковых скоростей развития искрового канала в плотных газах [123]. Напряженность электрического поля E_{ct} на кончике канала может быть оценена как $E_{ct} = El_c/r_c$, где E — средняя напряженность поля в канале, l_c — длина канала, r_c — радиус канала. В газах время развития неустойчивости составляет порядка 1 мкс и определяется только ионизационными процессами [115]. В жидкости же время и энергия Q в основном идут на нагрев и испарение, т. е. $\tau \approx \tau_v$. Тогда:

$$\tau_v = \frac{\pi r_c^2 Q}{IE_{ct}}, \quad (4.10)$$

где I — полный ток через канал, а скорость роста канала $v_{ch} = r_c/\tau$ в этом случае может быть рассчитана без учета времени ионизации и развития неустойчивости:

$$v_{ch} = \frac{W}{2\pi r_c l_c Q}, \quad (4.11)$$

где $W = IU$ — электрическая мощность разряда. Коэффициент $1/2$ возникает при учете, что напряженность электрического поля на кончике канала составляет половину от напряженности поля, создаваемого уединенной сферой того же потенциала и размера, и составляет порядка 10^5 В/см. Расчет скорости канала по описанной выше модели дает значения, близкие к экспериментальным при $r_c = 1$ мм.

4.2 Влияние перенапряжения на смену механизма пробоя в воде

В отсутствие единого представления о механизме «стримерно-лидерного» развития разряда в жидкости, характеризующимся скоростями распространения канала от единиц до сотен км/с, нет и работ, посвященных условиям перехода от «теплого» к «стримерно-лидерному» механизму, в которых бы при одинаковой начальной проводимости жидкости были получены оба механизма пробоя.

Для воды с проводимостью 90 мкСм/см в экспериментах исследован диапазон импульсных напряжений от 6 до 27 кВ при пробойном напряжении около 9 кВ. Использование длинных импульсов напряжения с крутым фронтом и балластного сопротивления, ограничивающего ток разряда, позволило наблюдать все стадии развития разряда. Установлено, что в области низких напряжений разряд развивается по «тепловому» механизму (см. рисунок

3.11). Данный механизм, так же, как в воде с более высокой проводимостью, характеризуется малыми скоростями роста плазменного канала и большими временами задержки зажигания разряда. Начальная область оптической неоднородности (тёмная двухфазная область вблизи кончика анода), которая образуется вследствие взрывного вскипания воды под действием токов проводимости, достигает критического размера ~ 1 мм лишь ко времени ~ 1 мс. Затем происходит её пробой, образование плазменного канала и дальнейшее его продвижение к катоду со скоростью ~ 20 м/с. Свечение плазмы наблюдается в основном вблизи острия анода. Наиболее вероятным его источником является анодное пятно [124]. Форма границы области оптической неоднородности на ранних этапах прорастания канала близка к сферической и является возмущенной, на её поверхности развиваются структуры, напоминающие неустойчивость Рэля–Тейлора (см. рисунок 3.11в). Аналогичные структуры наблюдаются на границе фазового перехода при кипении в воде [125]. Финальное замыкание промежутка происходит за время ~ 1 мс при развитии плазменного канала в одной из этих возмущенных областей.

Иначе обстоит дело в области значительных перенапряжений (см. рисунок 3.15а). Развитие разряда происходит очень быстро, за время, на два порядка меньшее, чем в случае «теплого» механизма. Формированию древовидного ярко светящего канала предшествует короткая начальная фаза формирования области оптической неоднородности у анода. Её размеры на порядок меньше тёмной начальной области, образующейся при «теплом» механизме развития разряда. Эта область сильного поля у анодного острия — область формирования стримеров. Однако среднее поле в промежутке, составляющее порядка ~ 30 кВ/см, недостаточно для их распространения. Аналогичные кустообразные стримерные области неоднократно наблюдались в дистиллированной воде и хорошо изучены [4]. В дистиллированной воде первоначальная кустообразная фигура достигает размеров ~ 500 мкм примерно при том же напряжении на аноде и прорастает со сверхзвуковой скоростью ~ 2.5 км/с [12]. В проведенных экспериментах максимальная зарегистрированная по осциллограммам средняя скорость продвижения стримера составила ~ 7 км/с.

Стример в диэлектрической жидкости, так же как в плотном газе, распространяется благодаря сильному электрическому полю в области его головки, которое создается ее собственным объемным зарядом. Максимальная величина электрического поля E_m достигается в передней части головки с радиусом r_c . Начальный радиус проводящего канала стримера, который тянется за головкой, примерно совпадает с радиусом головки r_c .

Задача о распространении стримера достаточно сложна, тем более в жидкости, и результаты, соответствующие экспериментам, могут быть получены только путем численного моделирования [126]. Тем не менее упрощенное аналитическое рассмотрение, которое используется в плотных газах [68], позволяет установить закономерности и связь между параметрами процесса, определяющими физику явления в жидкости. Если скорость стримера намного больше скорости дрейфа электронов, то кинетика ионизации на головке стримера, если его рассматривать как волну ионизации, позволяет записать скорость стримера в виде

$$v_c = \gamma_i(E_m) \frac{r_c}{\ln(n_c/n_0)}, \quad (4.12)$$

где $\gamma_{\text{и}}(E_{\text{м}})$ — частота ионизации молекул электронным ударом, n_0 — начальная плотность электронов в среде, $n_{\text{с}}$ — плотность электронов за головкой в канале стримера.

Обычно, для развития стримера достаточно $n_0 \sim 10^4\text{--}10^5 \text{ см}^{-3}$, а $\ln(n_{\text{с}}/n_0) \sim 10$. Вследствие резкого нарастания частоты ионизации при повышении напряженности электрического поля скорость стримера определяется полем на переднем крае его головки. На переднем фронте стримера устанавливается определенное максимальное поле $E_{\text{м}}$, которое определяется «квазипороговым» характером зависимости $\gamma_{\text{и}}(E)$ [68]. Частота ионизации вначале очень мала, затем резко возрастает с увеличением E , достигает большого значения и выходит на насыщение. Радиус головки подстраивается под величину установившегося значения электрического поля $E_{\text{м}}$.

Возможность распространения стримера в проводящей среде ограничена. 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 ионизация 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 длиной линии [68; 127]. Скорость диффузии потенциала, который связан с электрическим полем на головке стримера соотношением $U = 2r_{\text{с}}E$, определяется отношением $\chi/r_{\text{с}}$, где $\chi = 1/RC$ — коэффициент диффузии потенциала, $1/R = \pi r_{\text{с}}^2 \sigma$, $C = 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 / \ln(L/r_{\text{с}})$ — 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 $\chi/r_{\text{с}} < v_{\text{с}}$, или иначе:

$$\frac{\sigma_0 \ln(L/r_{\text{с}})}{\varepsilon \varepsilon_0} < \frac{v_{\text{с}}}{r_{\text{с}}}. \quad (4.13)$$

Это выражение имеет вполне ясный смысл, если учесть, что объемный заряд стримерной головки, обеспечивающей для ионизации сильное электрическое поле, нарабатывается за время $r_{\text{с}}/v_{\text{с}}$, а рассасывается с максвелловским временем $\tau_{\text{м}} = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma_0$ за счет проводимости среды.

Вследствие того, что зависимость $\gamma_{\text{и}}(E)$ 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. В дистиллированной воде ионизационный механизм распространения стримеров с анода наблюдается при минимальной средней напряженности электрического поля на разрядном промежутке 100 кВ/см. Это так называемые быстрые стримеры, рас-

пространяющиеся со скоростью более 10 км/с. Экспериментальное значение скорости таких стримеров и радиус стримерного канала измерены как с помощью импульсной наносекундной теневой лазерной подсветки [4], так и с использованием интерферометра Маха–Цендера [12]. В этом случае, исходя из зависимости 4.13 при $v_c \sim 10 - 100$ км/с и $r_c \sim 10 - 20$ мкм, считая $\ln(L/r_c) \sim 10$, получим проводимость $\sigma_0 \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ См/см. В этот диапазон проводимости попадает и обычная водопроводная вода, для которой характерно значение 300 мкСм/см. Экспериментальных исследований распространения стримеров в проводящей воде практически нет, хотя они наблюдаются при высоких напряжениях на разрядном промежутке, но очень быстро переходят в лидерную стадию [5; 58]. В настоящей работе наблюдался как тепловой пробой, развивающийся с анода со скоростью 5–15 м/с при низких напряжениях (7–15 кВ), так и образование стримеров, распространяющихся со скоростью до 7 км/с, и их переход в лидерную стадию при значительных перенапряжениях ~ 3 при прочих равных условиях в воде с проводимостью 90 мкСм/см. Стримеры зарождаются на кончике анода при напряженности электрического поля ~ 500 кВ/см и быстро переходят в лидер, который замыкает разрядный промежуток.

Таким образом, эксперименты, проведенные в слабопроводящей воде с начальной проводимостью 90 мкСм/см, позволили наблюдать переход от «теплового» механизма пробоя к «стримерно-лидерному» в резко неоднородном электрическом поле под действие импульсов положительной полярности при увеличении амплитуды напряжения на разрядном промежутке примерно в пять раз. Исследована динамика развития «теплового» пробоя и измерена скорость прорастания плазменного канала, которая составляет 10–30 м/с. При напряжении на разрядном промежутке более 27 кВ средняя скорость канала может достигать величины 7 км/с. Упрощенное рассмотрение распространения стримера как волны ионизации позволило установить связь между параметрами процесса, определяющими условия перехода от одного механизма к другому.

4.3 Развитие электрического разряда во влажном песке

Влажный песок представляет собой трёхфазную систему, включающую твердые частицы, жидкость и воздух, находящийся в порах. Развитие разряда в грунте с повышенной влажностью во многом определяется тепловыми процессами в проводящей воде. Низковольтная проводимость влажного песка по порядку величины совпадает с проводимостью содержащейся в нём воды. Наличие песчинок приводит к усилению электрического поля вблизи их поверхности (примерно в 3 раза) вследствие их поляризации и уменьшению критического поля пробоя в грунте по сравнению с атмосферным воздухом до величины ~ 10 кВ/см [68].

Развитие разряда в грунте представляет собой самостоятельную задачу, которая связана с растеканием больших импульсных токов молнии в грунте в системах молниезащиты. Целью исследования было показать, что развитие разряда во влажном грунте во многом определяется процессами в содержащейся воде.

При растекании импульсного тока, так же как и в воде, на осциллограммах появляется максимум тока. Максимум импульсного тока всегда сдвинут относительно максимума напряжения в сторону больших времен (рисунок 4.1а). С увеличением влажности песка временной сдвиг возрастает. По этим осциллограммам было вычислено динамическое сопротивление заземления $Z(t)$ во время протекания импульса тока (рисунок 4.1б). При пробое по осциллограммам определялись пробойный ток, пороговое напряжения пробоя U_b (минимальное напряжение при котором происходит пробой промежутка) и время задержки пробоя τ_b .

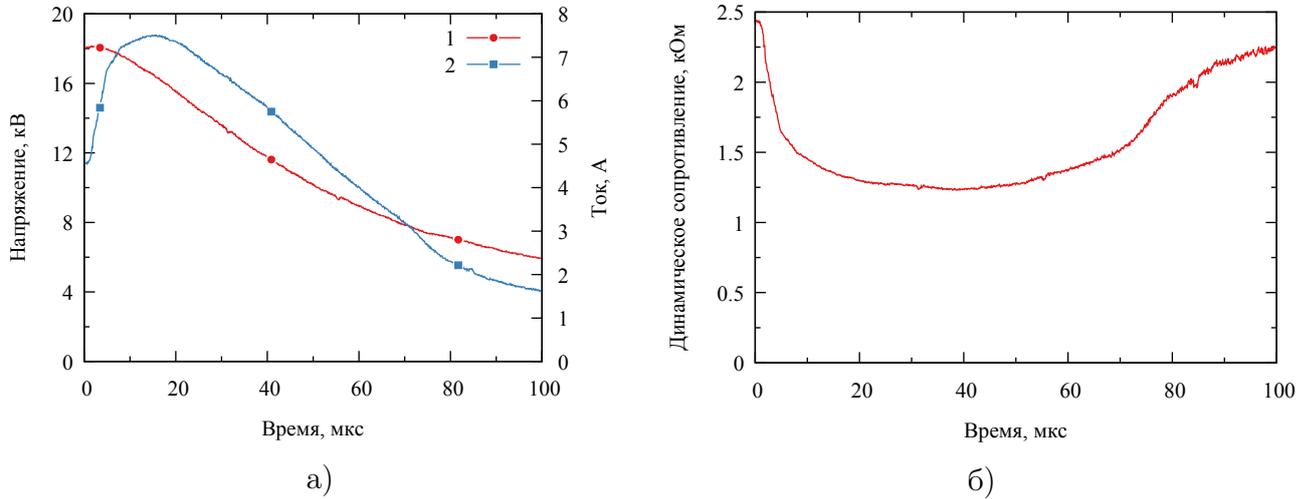


Рисунок 4.1 — Характерные осциллограммы напряжения (1), тока (2) и динамического сопротивления при растекании импульсного тока в песке при влажности 10 %

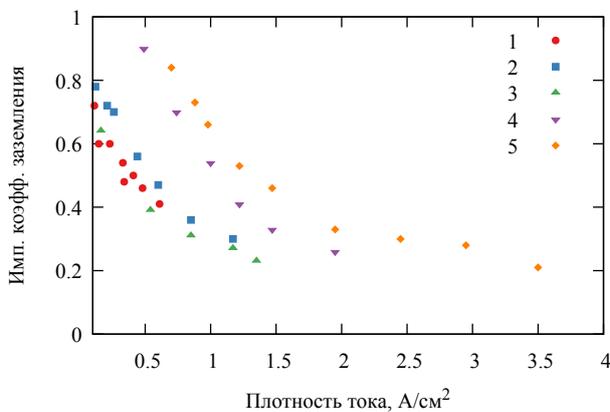
Использование длинных миллисекундных импульсов позволяет проследить медленные стадии развития разряда в грунте, которые ранее не наблюдались при высоковольтных импульсах микросекундной длительности. Минимум динамического сопротивления $Z(t)$ появляется позднее максимума импульса тока. Появление минимума $Z(t)$ указывает на процесс ионизации в грунте. Для электрода с минимальным диаметром шара процесс начинается по времени раньше, и величина минимального сопротивления заземления больше, чем в остальных случаях. Осциллограммы тока и напряжения, а также поведение $Z(t)$, типичны для песчаных грунтов, которые исследовались ранее, например в [60; 84; 128]. Отношение сопротивлений заземления при сильном импульсном и слабом постоянном токах $\alpha = Z/R_0$ называют импульсным коэффициентом заземлителя [68]. На практике импульсное сопротивление заземлителя вычисляют по отношению амплитуды импульса напряжения к амплитуде импульса тока $Z = U_m/I_m$, несмотря на то, что максимумы напряжения и тока не совпадают по времени. В отличие от принятого на практике способа в настоящей работе импульсный коэффициент заземлителя определялся по сопротивлению в момент времени t_m максимума тока:

$$\begin{aligned}
 t_m : \left. \frac{dI}{dt} \right|_{t_m} &= 0, \\
 Z(t_m) &= \frac{U(t_m)}{I(t_m)}, \\
 \alpha &= \frac{Z(t_m)}{R_0}.
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

В нашем случае сопротивление заземлителя является чисто омическим и $\alpha = \rho/\rho_0$, так как в рассматриваемый момент времени $dU/dI = 0$. Коэффициент α зависит от плотности тока на электроде j_0 степенным образом $\rho \propto j_0^{-k}$ и показывает, как меняется удельное сопротивление ρ при ионизации грунта вблизи поверхности электрода (рисунок 4.2). Величина показателя степени $k = 0.54$ по результатам настоящей работы и $k = 0.96$ по результатам [84]. Величина α заметно падает и становится меньше единицы при плотности тока $j_0 > j_c$. Критическая плотность тока, при которой начинается заметная ионизация на электроде, равна $j_c \approx 0.1$ А/см² (рисунок 4.2), а по данным работы [84] $j_c \approx 0.5$ А/см². Разница между этими величинами объясняется различным удельным сопротивлением грунтов ρ_0 . Полученные отсюда значения критического поля ионизации $E_c = \rho_0 j_c$ равны 10–12 кВ/см для наших экспериментов и 15–17 кВ/см для работы [84]. Предложенный метод позволяет определить критическое поле E_c простым способом, но точность этого метода невелика — в пределах 20 % с учетом статистического разброса.

До настоящего времени нет единой методики определения величины критического поля ионизации E_c , которое является одной из основных характеристик, определяющих процесс искрообразования. Ее определению посвящено достаточно много экспериментальных и теоретических работ [84; 128–130]. В работе [129] из сопоставления различных подходов и аппроксимаций экспериментальных данных получено, что для песка с влажностью 5–20 % наиболее достоверной является аппроксимация E_c вида:

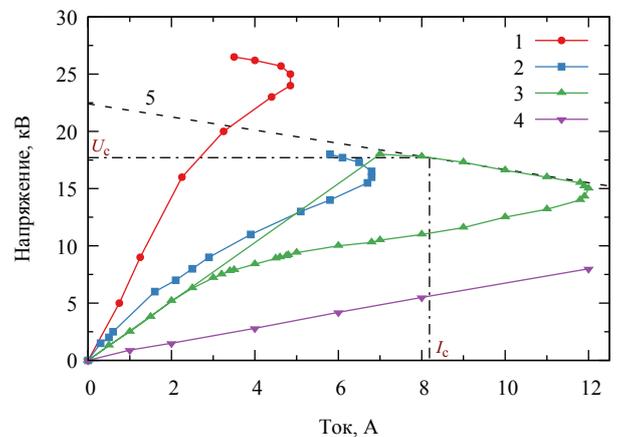
$$E_c = A\rho_0^\beta.$$



1–3 — результаты данной работы; 4, 5 — построены по данным [84] при влажности 2 и 4 % соответственно.

Амплитуда приложенного напряжения 15–40 кВ.

Рисунок 4.2 — Зависимость импульсного коэффициента заземлителя α от плотности тока на электроде



1 — сферический электрод, диаметр 1 см, влажность 10 %; 2 — полусферический электрод, диаметр 4 см, влажность 10 %; 3 — полусферический электрод, диаметр 4 см, влажность 4 %, по данным [84]; 4 — сферический электрод, диаметр 6 см, влажность 20 %, без ионизации; 5 — нагрузочная характеристика кривой 3. U_c и I_c — напряжение и ток в точке касания нагрузочной характеристики кривой 3.

Рисунок 4.3 — Вольт-амперные характеристики заземлителей

В песке критическое поле ионизации увеличивается степенным образом с увеличением удельного сопротивления ρ_0 . Различные авторы [129; 130] дают различные значения констант A и β . Величина критического поля ионизации E_c , вычисленная по ним, может отличаться на 30–50 %.

Методика, основанная на учете изменения величины импульсного сопротивления в зависимости от радиуса ионизации, дает завышенные значения критического поля ионизации E_c , особенно в слабопроводящих грунтах [128]. Теоретическая модель, учитывающая зависимость $\rho(t)$, в которой предлагается разбиение зоны ионизации на несколько областей с различной проводимостью, наоборот, дает заниженные значения E_c [131].

Наиболее последовательным с физической точки зрения является метод определения E_c по петлеобразным кривым ВАХ, полученным по осциллограммам тока и напряжения. Этот метод позволяет наглядно показать и проанализировать нелинейности ВАХ грунта, связанные с ионизацией и искрообразованием. В работе [84] значение критического поля ионизации E_c определялось из ВАХ по точке, в которой напряжение достигает максимального значения. Таким способом были определены значения E_c как для импульсов положительной [84], так и отрицательной полярности [128]. В этих работах эксперименты выполнены в песке с влажностью 2–8 % в слабонеоднородном электрическом поле с электродами полусферической [84] и цилиндрической [128] форм с использованием стандартных высоковольтных импульсов напряжения, типа 1.2/50 мкс. Наиболее тщательно исследования проведены в работе [84], в которой распределение размера зерна контролировалось в соответствие со стандартами ASTM D422 и KSA 5101.

В настоящей работе при напряжениях менее 15 кВ петли на ВАХ не образуются. Их образование связано с ионизацией при $j_0 > j_c$, которая приводит к резкому возрастанию тока и снижению напряжения на заземлителе. При этом качественно изменяется вид ВАХ. На рисунке 4.3 показана вольтамперная кривая 3 [84] для заземлителя в виде полусферы в песке с влажностью 4 %.

Обратный ход петель отражает падение напряжение на конденсаторах генератора и деионизацию грунта. Начальный участок ВАХ отвечает росту напряжения на переднем фронте высоковольтного импульса. На начальном участке выполняется закон Ома вплоть до точки перегиба, и сопротивление заземлителя практически не отличается от сопротивления при слабом стационарном токе. Данные, полученные в настоящей работе, показаны точками с проведенными через них кривыми (1, 2, 4) на рисунке 4.3. Начальные участки кривых 1 и 2 при малых токах имеют заметные погрешности из-за наводок от разрядника на фронте импульса напряжения, поэтому они не приведены. Повышение влажности приводит к увеличению начального тока проводимости и к дополнительному увеличению ионизации, выражающемуся в увеличении площади $U(I)$ петель. На полусферическом заземлителе диаметром 6 см ток растекается без ионизации песка (рисунок 4.3, прямая 4).

Появление области с падающей ВАХ ($dU/dI < 0$) на каждой из петель указывает на развитие неустойчивости по отношению к малым флуктуациям тока. При выполнении

условия

$$-\frac{dU}{dI} > R_6 \quad (4.15)$$

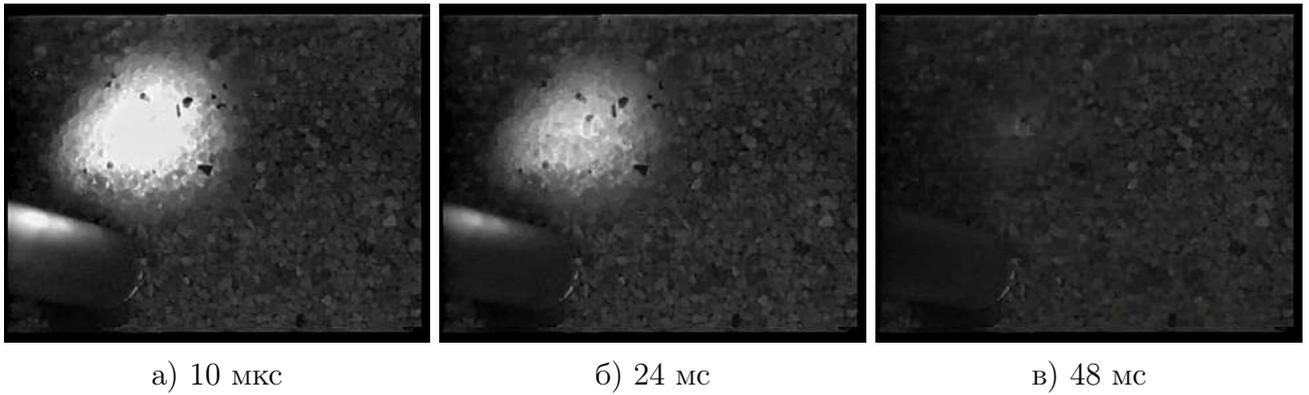
вблизи поверхности электрода развивается тепловая неустойчивость, которая приводит к контракции тока в песке. Развитие аналогичной неустойчивости и контракция наблюдаются в объемных разрядах в газах атмосферного давления при наличии начальной предиионизации и сопровождаются прорастанием яркосветящихся токовых каналов [115]. Контракция приводит к резкому увеличению плотности тока в образующемся токовом канале. Стоит отметить, что в существующих работах по теме развитию тепловой неустойчивости вблизи поверхности электрода в грунте внимания практически не уделялось, в то время как именно развитие тепловой неустойчивости является основной причиной образования плазмы, ее контракции и последующего образования плазменного канала, что и приводит к резкому уменьшению импульсного сопротивления заземлителя. Представляется физически разумным определять E_c именно при этих условиях, а выражение (4.15) считать критерием для нахождения E_c .

Критерий (4.15) позволяет однозначно определить критическую напряженность поля ионизации E_c по кривым $U(I)$. На рисунке 4.3 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 . Значение критической напряженности поля ионизации E_c , полученное таким способом из кривых на рисунке 4.3, хорошо согласуются со значениями $E_c = \rho j_c$, приведенными выше. Критическое поле E_c для полусферы ниже, чем у заземлителей шаровой формы, поскольку из-за большей плотности тока искрообразование начинается раньше, чем на шаре.

Образование светящихся каналов и контракция со стержневого электрода с полусферой диаметром 1 см на конце начинается при напряжениях 18 кВ, когда на ВАХ (рисунок 4.3, кривая 1) появляется падающий участок. При увеличении напряжения каналы удлиняются, и происходит пробой промежутка. Максимальный ток искры при замыкании разрядного промежутка длиной 4 см при $R_B = 24$ Ом достигал 0.5 кА, что приводило к значительному разогреву канала в песке, что в свою очередь вызывало газодинамическое расширение канала искры и образование ударной волны. Наблюдался выброс песка и образование канавки в песке глубиной и шириной около 2 см.

Характерной особенностью развития разряда во влажном песке является длительное свечение в приэлектродной области, намного превосходящее длительность импульса (рисунок 4.4).

При исследовании завершенного пробоя в песке различной влажности в качестве токоприемника использовались медные кольца различного диаметра, которые заглублялись в песок примерно на 5 см. Кольцо заземлялось через токовый шунт $R_{ш}$ с сопротивлением 0.2–4 Ом. В центре кольца помещался шарообразный электрод, на который подавалось импульсное напряжение. По осциллограммам определялось пороговое напряжение пробоя U_b , а также время задержки пробоя τ_b от момента подачи импульса напряжения. Пробой развивается за фронтом импульсного напряжения, поэтому длительность фронта не влияла на электрическую прочность разрядного промежутка. Длина промежутка при пробое в сухом



а) 10 мкс

б) 24 мс

в) 48 мс

Время, указанное в подписях, отсчитывается от момента подачи импульса напряжения.

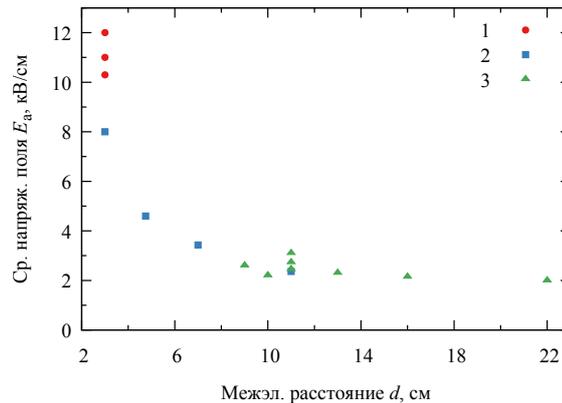
Рисунок 4.4 — Свечение с поверхности при развитии разряда в песке при влажности 25 %

песке при напряжении на разрядном промежутке 35–36 кВ составляла 3 см, в мокром песке при влажности 10–20 % и напряжении на разрядном промежутке 50 кВ она увеличивалась до 22 см. Было обнаружено, что пробой коротких (менее 3 см) и длинных (более 10 см) промежутков в мокром песке в неоднородном электрическом поле происходит по разным механизмам. Измеренные времена задержки пробоя в коротких промежутках примерно такие же, как при пробое в атмосферном воздухе, что позволяет предположить, что пробой происходит по стримерному механизму [68; 115]. Импульсный ток через канал при пробое определяется балластным сопротивлением R_6 . При пробое длинных промежутков импульсами с коротким фронтом наблюдается длительная предпробойная стадия ($\tau_b \sim 0.3\text{--}1$ мс), в течение которой ток в разрядном промежутке медленно нарастает до нескольких ампер, что связано с термическим разогревом воды и увеличением проводимости грунта. Эти времена существенно больше, чем время прорастания канала в воздухе или в песке в коротких промежутках (1–3 мкс). Длительность предпробойной стадии сильно зависит от величины приложенного напряжения и меняется на два порядка при изменении напряжения на промежутке от 22 до 36 кВ.

При увеличении балластного сопротивления $R_6 > 1$ кОм пробой в мокром песке не происходит, и наблюдается лишь растекание импульсного тока. В отличие от лидера молнии канал в грунте разогревается и прорастает за счет токов проводимости, протекающих через его боковую поверхность. При большом балластном сопротивлении величины тока разряда не хватает для термического разогрева и формирования канала разряда. Необходимым условием пробоя в грунте, так же как и в воздухе, является контракция тока и образование плазменного канала с последующим его нагревом.

При увеличении напряженности электрического поля вблизи электрода начинается иксообразование, когда величина электрического поля достигает критической величины E_c . Для пробоя промежутка напряженность электрического поля пробоя E_b должна быть больше, чем напряженность критического поля E_c . В коротких промежутках с однородным полем электрическое поле пробоя E_b совпадает с величиной среднего электрического поля в промежутке E_a , которое определяется как $E_a = U/d$. В длинных промежутках с неоднородным электрическим полем среднее поле при пробое промежутка зависит от длины промежутка.

На рисунке 4.5 показаны экспериментальные значения среднего электрического поля E_a при пробое в песке с разной влажностью в зависимости от длины промежутка.



1 — в сухом песке; 2 — при влажности 20 %; 3 — при влажности 10–15 %.

Рисунок 4.5 — Зависимость среднего пробойного электрического поля от длины промежутка d при различной влажности песка

В коротких промежутках (3–4 см) величина E_a при пробое практически совпадает с величиной критического поля ионизации E_c . С увеличением длины промежутка величина среднего электрического поля при пробое уменьшается и в промежутках с $d > 10$ см выходит на значение около 2 кВ/см, слабо зависящее от влажности. Известно, что при лидерном пробое длинных разрядных промежутков в воздухе среднее электрическое поле также падает. Величина среднего электрического поля в канале положительного лидера при пробое воздушного промежутка длиной 10 м также достигает значений около 2 кВ/см [68]. Так как величина средней напряженности электрического поля при пробое длинных промежутков в воздухе и грунте совпадает, то в грунте также должен формироваться хорошо проводящий плазменный канал. В длинных промежутках в грунте, так же как и в длинном лидере в воздухе, величина E_a , по-видимому, постоянна и равна примерно 1–2 кВ/см. В этом случае условия пробоя грунта определяются в основном проводимостью почвы и площадью заземленного электрода.

Выводы по Главе 4

На основе полученных экспериментальных данных предложен «тепловой» механизм развития электрического разряда в проводящей воде в неоднородном поле, включающий в себя пять этапов:

- интенсивный нагрев жидкости начальными токами проводимости с плотностью на уровне 100 А/см^2 , приводящий к её локальному взрывному вскипанию вблизи острия 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;
- образование и рост основного канала разряда из начальной плазменной области.

Показано, что на вольт-амперных характеристиках начало развития тепловой неустойчивости проявляется как начало участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением ($dU/dI < 0$). Время до начала развития неустойчивости определяется в основном временем и энергией, необходимыми для нагрева и испарения начальной порции жидкости. Величина наблюдаемой скорости служит ярким подтверждением тепловой природы электрического разряда и близка к средней скорости дрейфа ионов в канале. Предложенный «тепловой» механизм дает хорошее совпадение рассчитанной скорости канала с экспериментальными данными.

Показано, что при проводимости воды 35–90 мкСм/см развитие разряда может происходить как по медленному «тепловому», близкому к механизму для воды с повышенной проводимостью, так и по быстрому «стримерно-лидерному» механизму, а смена механизма происходит при перенапряжении более 2.8, что, в первую очередь, выражается во временах развития разряда и геометрии разрядных каналов. На основе представлений о распространении разрядного канала как о волне ионизации предложено объяснение данного перехода, заключающееся в пороговом характере зависимости частоты ионизации жидкости электронным ударом и в условии на скорость диффузии потенциала на переднем фронте канала, связывающем величину проводимости с ожидаемой скоростью распространения канала.

Сравнение результатов исследования развития разряда в проводящей воде и влажном песке показало, что развитие разряда в них происходит по схожим механизмам, а при повышенной влажности песка инициация разряда в длинных промежутках целиком определяется процессами в жидкости. Процесс растекания импульсных токов при плотностях тока больше критических приводит к резкому нелинейному уменьшению сопротивления заземления в результате ионизации и искрообразования в грунте вблизи электрода. Обнаружено, что вблизи электрода развивается тепловая неустойчивость, 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 во влажном песке развивается по разным механизмам в коротких (~ 3 см) и длинных (более 10 см) промежутках. В коротких промежутках пробой аналогичен пробоем в воздухе и развивается, вероятно, по стримерному механизму. В длинных промежутках пробой развивается с большим временем задержки (~ 1 мс) и аналогичен «тепловому» пробоем. Скорость прорастания контрагированного плазменного канала в песке на два порядка меньше, чем скорость лидера в атмосфере. Среднее поле пробоя E_{ev} в длинных промежутках уменьшается до величины 2 кВ/см, которая близка к величине напряженности электрического поля в канале лидера при пробое длинных воздушных промежутков.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

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 элегаза, 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 ионизированной 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 ~ 1.5 мс «стримерно-лидерным» механизмом с характерным временем пробоя 15–20 мкс при том же напряжении;
 - наличие поверхностных пузырьков на электродах нивелирует влияние объёмных микропузырьков вне зависимости от проводимости 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 не более 0.1 %
 - ослабление волн давления конечной амплитуды составляет до –10 дБ при объёмном газосодержании элегаза не более 0.1 %
 - 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 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 кВ против 110–120 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 неустойчивость, 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 пробоем в воздухе и развивается, вероятно, по стримерному механизму. В длинных промежутках пробой развивается с большим временем задержки (~ 1 мс) и аналогичен «тепловому» пробоем.

В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Соцу Э.Е. за научное руководство, Василяку Л.М., Ветчину С.П. и Печеркину В.Я. за поддержку, помощь, обсуждение результатов, внимание к содержанию и форме диссертации, лаборатории под руководством Гаджиева М.Х, подготовившей стенд для исследования пробоя в масле. Отдельную благодарность автор хотел бы выразить Савельеву А.С., внёсшему большой вклад в культуру проведения эксперимента и последующей обработки экспериментальных данных. Также автор благодарит создателей $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ -шаблона диссертации *Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template* и всех, кто сделал настоящую работу автора возможной.

Список сокращений и условных обозначений

ПО	паровая область
КР	канал разряда
γ	коэффициент поверхностного натяжения
σ	электрическая проводимость
$d_{мэ}$	длина межэлектродного промежутка
$\tau_{зз}$	время запаздывания зажигания разряда
$\tau_{ф}$	время формирования разряда
$\tau_{пр}$	время задержки пробоя, равное сумме $\tau_{зз}$ и $\tau_{ф}$
U_0	начальная амплитуда импульса напряжения
$E_{по.к}$	энергия, вложенная в разрядный промежуток к моменту пробоя начальной паровой области
E_0	амплитуда падающего поля
РК	разрядная камера
$l_{по.к}$	критический размер начальной паровой области при котором происходит её пробой
$t_{эксп}$	время экспозиции одного кадра на матрице фотокамеры

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. *Куржекин 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. *Korobejnikov S. M., Yanshin E. V.* Model of prebreakdown processes in liquids under pulse voltage // 1987 Ninth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. — 1987. — P. 398—402.
8. *Коробейников С. М.* О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. Предпробойные процессы // ТВТ. — 1998.
9. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. — Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2009. — С. 736.
10. *Jones H. M., Kunhardt E. E.* Nanosecond pre-breakdown and breakdown phenomena in water: influence of pressure, conductivity, and ionic sheath formation // Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL '96., 12th International Conference on. — 1996. — P. 360—364.
11. *Jones H. M., Kunhardt E. E.* Evolution of cathode initiated pulsed dielectric breakdown in polar and nonpolar liquids // Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL '96., 12th International Conference on. — 1996. — P. 365—368.
12. *An W., Baumung K., Bluhm H.* Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release // Journal of Applied Physics. — 2007. — Vol. 101. — P. 053302.
13. *Климкин В. Ф.* Механизмы электрического пробоя воды с острейшего анода в наносекундном диапазоне // Письма в Журнал технической физики. — 1990. — Т. 16, вып. 4. — С. 54—58.

14. Cavitation in the vicinity of the high-voltage electrode as a key step of nanosecond breakdown in liquids / I. Marinov [et al.] // *Plasma Sources Science & Technology*. — 2013. — Vol. 22, no. 4. — P. 042001.
15. *Kattan R., Denat A., Lesaint O.* Generation, growth, and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electric field // *Journal of Applied Physics*. — 1989. — Vol. 66, no. 9. — P. 4062–4066.
16. *Oliveri S., Kattan R., Denat A.* Numerical study of single-vapor-bubble dynamics in insulating liquids initiated by electrical current pulses // *Journal of Applied Physics*. — 1992. — Vol. 71, no. 1. — P. 108–112.
17. Hydrodynamical flows in dielectric liquid in strong inhomogeneous pulsed electric field / D. V. Tereshonok [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2016. — Vol. 49, no. 50. — P. 505501.
18. *Herbert E., Balibar S., Caupin F.* Cavitation pressure in water // *Physical Review E*. — 2006. — Vol. 74, issue 4. — P. 041603.
19. Non-equilibrium plasma in liquid water: dynamics of generation and quenching / A. Starikovskiy [et al.] // *Plasma Sources Science & Technology*. — 2011. — Vol. 20, no. 2. — P. 024003.
20. *Куперштох А. Л.* Флуктуационная модель пробоя жидких диэлектриков // *Письма в Журнал технической физики*. — 1992. — Т. 18, вып. 19. — С. 91–96.
21. Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition / A. L. Kupershtokh [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2001. — Vol. 34, no. 6. — P. 936.
22. *Куперштох А. Л., Карпов Д. И.* Моделирование развития ветвящихся разрядных структур в жидких диэлектриках с учетом импульсной проводимости каналов // *Письма в Журнал технической физики*. — 2006. — Т. 32, вып. 9. — С. 79–86.
23. *Бабаева Н. Ю., Найдис Г. В.* Моделирование положительных стримеров в жидком аргоне // *Письма в Журнал технической физики*. — 1999. — Т. 25, № 3. — С. 19–27.
24. *Babaeva N. Y., Naidis G. V.* On streamer dynamics in dense media // *Journal of Electrostatics*. — 2001. — Vol. 53, no. 2. — P. 123–133. — Selected Papers of the International Workshop on Electrical Conduction, Convection and Breakdown in Fluids.
25. *Naidis G. V.* Modelling of streamer propagation in hydrocarbon liquids in point-plane gaps // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2015. — Vol. 48, no. 19. — P. 195203.
26. *Hwang J. G., Zahn M., Pettersson L. A. A.* Mechanisms behind positive streamers and their distinct propagation modes in transformer oil // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. — 2012. — Vol. 19, no. 1. — P. 162–174.
27. Effects of Impulse Voltage Polarity, Peak Amplitude, and Rise Time on Streamers Initiated From a Needle Electrode in Transformer Oil / J. Jadidian [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2012. — Vol. 40, no. 3. — P. 909–918.

28. Effects of electrode size and solid barrier orientation on streamer discharge in transformer oil / J. Jadidian [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 115, no. 14. — P. 143304.
29. A Model for the Initiation and Propagation of Positive Streamers in Transformer Oil / F. O'Sullivan [et al.] // Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. — 2008. — P. 210–214.
30. *Zener C.* A Theory of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1934. — Vol. 145, no. 855. — P. 523–529.
31. *Ушаков В. Я., Семкина О. П., Рюмин В. В.* О природе импульсного электрического пробоя водных электролитов // Электронная обработка материалов. — 1972. — Т. 44, № 2. — С. 48–54.
32. *Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Штейнберг А. А.* Некоторые особенности электрического пробоя электролитов // ДАН СССР. — 1962. — Т. 147, № 4. — С. 822–825.
33. *Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Стояк М. Ю.* Формирование электрического пробоя в водных растворах хлористого натрия // ЖТФ. — 1964. — Т. 34, вып. 5. — С. 949–951.
34. *Трофимова Н. Б.* Исследование пробоя проводящих недегазированных жидкостей // Пробой диэлектриков и полупроводников / под ред. А. А. Воробьева, Н. М. Торбина. — М., Л., 1964. — С. 219–224.
35. Positive discharge development in insulating oil: optical observation and simulation / V. Lopatin [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 1998. — Vol. 5, no. 2. — P. 250–255.
36. *Lesaint O.* Propagation of positive discharges in long liquid gaps // Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL '96., 12th International Conference on. — 1996. — P. 161–166.
37. *Massala G., Lesaint O.* On the correlation between propagation mode, charge and shape of streamers in mineral oil // Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL '96., 12th International Conference on. — 1996. — P. 255–258.
38. Streamer propagation and breakdown under AC in mineral oil for gaps up to 80 cm / O. Lesaint [et al.] // Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL '96., 12th International Conference on. — 1996. — P. 251–254.
39. *McKenny P. J., McGrath P. B.* Anomalous Positive Point Prebreakdown Behavior in Dielectric Liquids // IEEE Transactions on Electrical Insulation. — 1984. — Vol. EI-19, no. 2. — P. 93–100.
40. *Gournay P., Lesaint O.* A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane // Journal of Physics D: Applied Physics. — 1993. — Vol. 26, no. 11. — P. 1966.

41. *Lesaint O., Gournay P.* Initiation and propagation thresholds of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 1994. — Vol. 1, no. 4. — P. 702–708.
42. *Lesaint O., Top T. V.* Streamer initiation in mineral oil. Part I: electrode surface effect under impulse voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2002. — Vol. 9, no. 1. — P. 84–91.
43. *Linhjell D., Lundgaard L., Berg G.* Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 1994. — Vol. 1, no. 3. — P. 447–458.
44. *Lesaint O., Massala G.* Positive streamer propagation in large oil gaps: experimental characterization of propagation modes // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 1998. — Vol. 5, no. 3. — P. 360–370.
45. Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage / C. T. Duy [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2009. — Vol. 16, no. 6. — P. 1582–1594.
46. *Liu Q., Wang Z. D.* Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2011. — Vol. 18, no. 1. — P. 285–294.
47. Enhancements in the lightning impulse breakdown characteristics of natural ester dielectric liquids / M. Unge [et al.] // Applied Physics Letters. — 2013. — Vol. 102, no. 17. — P. 172905.
48. *Nieto-Salazar J., Lesaint O., Denat A.* Transient current and light emission associated to the propagation of pre-breakdown phenomena in water // 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — 2003. — P. 542–545.
49. Characterization and spectroscopic study of positive streamers in water / J. N. Salazar [et al.] // IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. — 2005. — P. 91–94.
50. Streamers in water and other dielectric liquids / J. F. Kolb [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2008. — Vol. 41, no. 23. — P. 234007.
51. Parallel streamer discharges between wire and plane electrodes in water / S. Katsuki [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2002. — Vol. 9, no. 4. — P. 498–506.
52. *Babaeva N. Y., Kushner M. J.* Streamer Branching: The Role of Inhomogeneities and Bubbles // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2008. — Vol. 36, no. 4. — P. 892–893.
53. *Руденко Н. С., Цветков В. И.* Исследование электрической прочности некоторых жидких диэлектриков при воздействии импульсов напряжения наносекундной длительности // ЖТФ. — 1965. — Т. 23, № 2. — С. 224–234.

54. *Bernardes J., Rose M. F.* Electrical breakdown characteristics of sodium chloride-water mixtures // Digest of technical papers: 4th IEEE Pulsed Power Conference, the Regent, Albuquerque, New Mexico, June 6-8, 1983. — 1983.
55. *Bruggeman P., Leys C.* Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2009. — Vol. 42, no. 5. — P. 053001.
56. *Henry H. F.* Velocity of the Anode Spark in Copper Sulfate Solutions Under Application of Impulsive Potential // Journal of Applied Physics. — 1948. — Vol. 19, no. 11. — P. 988–994.
57. *Jones H. M., Kunhardt E. E.* Pulsed dielectric breakdown of pressurized water and salt solutions // Journal of Applied Physics. — 1995. — Vol. 77, no. 2. — P. 795–805.
58. Effect of water conductivity on its pulse electric strength / P. Lubicki [et al.] // Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Volume:2). — 1996.
59. Characterization of a direct dc-excited discharge in water by optical emission spectroscopy / P. Bruggeman [et al.] // Plasma Sources Science & Technology. — 2009. — Vol. 18, no. 2. — P. 025017.
60. *Nor N. M.* Review: Soil Electrical Characteristics Under High Impulse Currents // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2006. — Vol. 48, no. 4. — P. 826–829.
61. *Towne H. M.* Impulse characteristics of driven grounds // General Electric Review. — 1928. — Vol. 31, no. 11. — P. 605–609.
62. *Вайнер А. Л., Потужный А. К., Фертик С. М.* Исследование заземлителей в плохо проводящих грунтах // Электричество. — 1947. — № 2. — С. 40–47.
63. *Вайнер А. Л.* Импульсные характеристики сложных заземлений // Электричество. — 1966. — № 3. — С. 23–26.
64. *Вайнер А. Л., Флору В. Н.* Экспериментальное исследование и метод расчета импульсных характеристик глубинных заземлителей // Электричество. — 1971. — № 5. — С. 18–22.
65. *Kosztaluk R., Loboda M., Mukhedkar D.* Experimental Study of Transient Ground Impedances // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — 1981. — Vol. PAS-100, no. 11. — P. 4653–4660.
66. Non-linear behaviour of ground electrodes under lightning surge currents: computer modelling and comparison with experimental results / A. Geri [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 1992. — Vol. 28, no. 2. — P. 1442–1445.
67. *Sonoda T., Takesue H., Sekioka S.* Measurement on surge characteristics of grounding resistance of counterpoises for impulse currents // Conference Proceedings: ICLP 2000, 25th International Conference on Lightning Protection : Rhodes, Greece, 18 - 22 September 2000. — 2000. — P. 411–415.

68. *Базелян Э. М., Райзер Ю. П.* Физика молнии и молниезащиты. — IOP Publishing, Bristol, Philadelphia, 2001.
69. *Chen Y., Chowdhuri P.* Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of rod-type ground electrodes // IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution. — 2003. — Vol. 150, no. 4. — P. 420–426.
70. *Bewley L. V.* Theory and tests of the counterpoise // Electrical Engineering. — 1934. — Vol. 53, no. 8. — P. 1163–1172.
71. *Armstrong H. R.* Grounding Electrode Characteristics from Model Tests [includes discussion] // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems. — 1953. — Vol. 72, no. 2. — P. 1301–1306.
72. Electrical Breakdown Characteristics of Soil / T. M. Flanagan [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1982. — Vol. 29, no. 6. — P. 1887–1890.
73. *Snowden D. P., Erler J. W.* Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1983. — Vol. 30, no. 6. — P. 4568–4571.
74. *Snowden D. P., Lint V. A. J. van* Vaporization and Breakdown of Thin Columns of Water // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1986. — Vol. 33, no. 6. — P. 1675–1679.
75. *Snowden D. P., Beale E. S., Lint V. A. J. van* The Effect of Gaseous Ambient on the Initiation of Breakdown in Soil // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1986. — Vol. 33, no. 6. — P. 1669–1674.
76. *Erler J. W., Snowden D. P.* High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1983. — Vol. 30, no. 6. — P. 4564–4567.
77. Effect of Ambient Gas on ARC Initiation Characteristics in Soil / R. E. Leadon [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1983. — Vol. 30, no. 6. — P. 4572–4576.
78. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Э. И. Асиновский [и др.] ; под ред. Э. И. Асиновский, В. Е. Фортвов. — М. : Наука, 2002.
79. *Анненков В. З.* Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты // Электричество. — 1993. — № 12. — С. 15–20.
80. *Gonos I. F., Stathopoulos I. A.* Soil ionisation under lightning impulse voltages // IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology. — 2004. — Vol. 151, no. 5. — P. 343–346.
81. *Motoyama H.* Experimental and analytical studies on lightning surge characteristics of a buried bare wire // Electrical Engineering in Japan. — 2008. — Vol. 164, issue 3. — P. 35–41.
82. Исследование искрового разряда в грунте при воспроизведении с помощью магнитокумулятивных генераторов импульса тока молнии отрицательной полярности / Ю. В. Вилков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2009. — № 2. — С. 75–80.

83. *Nor N. M., Haddad A., Griffiths H.* Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2006. — Vol. 21, no. 1. — P. 353–361.
84. В.-Н. Lee [et al.] // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. — 2009. — Vol. 4. — P. 98.
85. Кабели радиочастотные. Общие технические условия [Текст] : ГОСТ 11326.0-78. — Взамен ГОСТ 11326.0-71; введ. 01.01.1981. — М. : ИПК Издательство Стандартов, 2003. — 35 с. — (Межгосударственный стандарт).
86. Кабель радиочастотный марки РК 50-7-11. Технические условия [Текст] : ГОСТ 11326.4-79. — Взамен ГОСТ 11326.4-71; введ. 01.01.1981. — М. : ИПК Издательство Стандартов, 2003. — 4 с. — (Межгосударственный стандарт).
87. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В. П. Скрипов [и др.]. — М. : Атомиздат, 1980. — С. 208.
88. *Babaeva N. Y., Kushner M. J.* Structure of positive streamers inside gaseous bubbles immersed in liquids // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2009. — Vol. 42, no. 13. — P. 132003.
89. *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.
90. Streamer breakdown in elongated, compressed and tilted bubbles immersed in water / N. Y. Babaeva [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2017. — Vol. 50, no. 36. — P. 364001.
91. Streamer branching on clusters of solid particles in air and air bubbles in liquids / N. Y. Babaeva [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 774, no. 1. — P. 012151.
92. *Gershman S., Belkind A.* Time-resolved processes in a pulsed electrical discharge in argon bubbles in water // *The European Physical Journal D*. — 2010. — Vol. 60, no. 3. — P. 661–672.
93. *Hamdan A., Cha M. S.* Nanosecond Discharge in Bubbled Liquid n-Heptane: Effects of Gas Composition and Water Addition // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2016. — Vol. 44, no. 12. — P. 2988–2994.
94. Способ защиты маслонаполненного трансформатора от взрыва и маслонаполненный трансформатор с защитой от взрыва : 2516307 / В. Е. Фортов [и др.] ; О. акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (ОАО "ФСК ЕЭС") (RU), Ф. государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (RU). — Заявл. 2014.

95. Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС» / под ред. А. Е. Мурова. — М. : Издательство АО «ГТЦ ФСК ЕЭС», 2016. — С. 320.
96. *Бетчелор Г. К.* Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // *Механика*. — 1968. — Т. 109, № 3. — С. 67–84.
97. *Низматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М. : Наука, 1987. — С. 464.
98. *Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.* Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — С. 248.
99. *Накоряков В. Е., Донцов В. Е.* Мультисолитоны в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров // *Доклады РАН*. — 2001. — Т. 378, № 4. — С. 483–486.
100. *Донцов В. Е.* Распространение волн давления в газожидкостной среде кластерной структуры // *Прикладная механика и техническая физика*. — 2005. — Т. 46, № 3. — С. 50–60.
101. *Particle Image Velocimetry / M. Raffel [et al.]*. — New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. — P. 448.
102. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. — М. : Дрофа, 2003. — С. 840.
103. *Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., др А. М. Б. и* Физические величины: Справочник. / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — С. 1232.
104. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : Наука, 1972. — С. 720.
105. *Термодинамические свойства воздуха / В. В. Сычев [и др.]*. — ГСССД. Серия монографии. М. : Издательство стандартов, 1978. — С. 276.
106. *Аракелян В. Г.* Физическая химия электротехнических аппаратов: В 2 т. Т. 1. Физическая химия элегазового электротехнического оборудования. — М. : Издательство МЭИ, 2001. — С. 300.
107. *Ushakov V. Y., Klimkin V. F., Korobejnikov S. M.* Impulse Breakdown of Liquids. — Springer Berlin Heidelberg, 2007.
108. *Halpern B., Gomer R.* Field Ionization in Liquids // *The Journal of Chemical Physics*. — 1969. — Vol. 51, no. 3. — P. 1048–1056.
109. *Halpern B., Gomer R.* Field Emission in Liquids // *The Journal of Chemical Physics*. — 1969. — Vol. 51, no. 3. — P. 1031–1047.
110. *Klimkin V. F.* Bubble generation model for initiating breakdown from anode in n-hexane with quasi-uniform electrical fields // *Dielectric Liquids, 1999. (ICDL '99) Proceedings of the 1999 IEEE 13th International Conference on*. — 1999. — P. 199–202.
111. *Yanshin E. V., Yanshin K. V., Korobejnikov S. M.* Space charge and pre-breakdown bubbles formation near point electrodes under pulse voltage // *1984 Eighth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*. — 1984. — P. 194–198.

112. *Kattan R., Denat A., Bonifaci N.* Formation of vapor bubbles in nonpolar liquids initiated by current pulses // IEEE Transactions on Electrical Insulation. — 1991. — Vol. 26, no. 4. — P. 656–662.
113. Эволюция паровой каверны при взрывном вскипании на пленочном микронагревателе: эксперимент и численное моделирование / Ю. Д. Варламов [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. — 2007. — Т. 48, № 4. — С. 79–87.
114. *Базелян Э. М., Райзер Ю. П.* Искровой разряд. — М. : Изд-во МФТИ, 1997. — С. 320.
115. *Королёв Ю. Д., Месяц Г. А.* Физика импульсного пробоя газов. — М. : Наука, 1991. — С. 224.
116. Таблицы физических величин / под ред. И. К. Кикоина. — М. : Атомиздат, 1976.
117. *Ecker G., Kröll W., Zöller O.* Thermal Instability of the Plasma Column // Physics of Fluids. — 1964. — Vol. 7. — P. 2001.
118. *Ridley B. K., Watkins T. B.* The Possibility of Negative Resistance Effects in Semiconductors // Proceedings of the Physical Society. — 1961. — Vol. 78, no. 2. — P. 293.
119. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading / L. M. Vasilyak [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2015. — Vol. 48, no. 28. — P. 285201.
120. *Волков А. Ф., Коган Ш. М.* Физические явления в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // Успехи физических наук. — 1968. — Т. 96, № 12. — С. 633–672.
121. *Велихов Е. П., Письменный В. Д., Рахимов А. Т.* Несамостоятельный газовый разряд, возбуждающий непрерывные СО₂-лазеры // Успехи физических наук. — 1977. — Т. 122, № 7. — С. 419–447.
122. *Fridman A., Friedman G.* Plasma Medicine. — John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
123. К вопросу о механизме развития пробоя в несамостоятельном газовом разряде / А. С. Ковалев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — СПб., 1980. — Т. 6, № 12. — С. 743–746.
124. Pulsed electrical discharge in conductive solution / V. A. Panov [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2016. — Vol. 49. — P. 385202.
125. *Kim B. J., Kim K. D.* Rayleigh-Taylor instability of viscous fluids with phase change // Physical Review E. — 2016. — Vol. 93, issue 4. — P. 043123.
126. *Naidis G. V.* Modeling of Subnanosecond Discharge in Hydrocarbon Liquid // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2015. — Vol. 49, no. 9. — P. 3138–3141.
127. Fast ionisation waves under electrical breakdown conditions / L. M. Vasilyak [et al.] // Phys.-Usp. — 1994. — Vol. 37, no. 3. — P. 247.
128. *Asimakopoulou F. E., Gonos I. F., Stathopoulos I. A.* XVII International Symposium on High Voltage Engineering //. — 2011. — С. 101–107.
129. *Oettle E.* // IEEE Trans. Power Delivery. — 1988. — Т. 3. — С. 2020.

130. *Manna T., Chowdhuri P.* // IET Generation Transmission & Distribution. — 2007. — T. 1. — C. 811.
131. *Liew A. C., Darveniza M.* // Proc. IEEE. — 1974. — T. 121. — C. 123.

Список рисунков

1.1	Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как микровзрывная	13
1.2	Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как ионизационная [13]	14
1.3	Структуры канала разряда, инициация которого обычно трактуется как ионизационная [19]	14
1.4	Внешний вид анодо- и катодонаправленных лидеров в водном растворе NaCl, проводимость 14 мСм/см [4]	16
1.5	Области формирования различных форм разрядного канала. Ось абсцисс – длина разрядного промежутка, ось ординат – напряжение на промежутке [4] . . .	17
1.6	Типы стримеров, реализующиеся при пробое жидких диэлектриков [3]	19
1.7	Пример осциллограмм интенсивности свечения (верхняя кривая), тока (средняя кривая) и напряжения (нижняя кривая), характерных для различных типов положительных стримеров в циклогексане (межэлектродное расстояние 1.8 мм, радиус острия 1.2 мкм) [40]	20
1.8	Осциллограммы интенсивности свечения и пространственная структура стримеров различных типов в циклогексане (межэлектродное расстояние 6 мм, радиус острия 1 мкм) [3]	20
1.9	Распределение вероятности возникновения стримеров типа 1, 2 и 3 в циклогексане [3]	21
1.10	Области существования стримеров типа 1 и 2 на диаграмме «напряжение–радиус электрода» [40]	21
1.11	Зависимость длины стримера типа 2 от амплитуды приложенного напряжения и гидростатического давления в незавершенном разряде в пентане [41]	22
1.12	Распространение стримеров типов 2, 3 и 4 в рапсовом масле и его эфирах в промежутке 10 см [3; 45]	23
1.13	Зависимость средней скорости распространения и типа стримера от амплитуды напряжения	24
1.14	Распространение стримеров разных типов в деионизованной воде [3; 49]	25
1.15	Зависимость $U_{пр}(\sigma)$ напряжения пробоя от проводимости раствора, по данным [6; 31; 54; 58]	28
1.16	Зависимость средней скорости распространения разрядного канала в воде от напряжения при проводимости до 1500 мкСм/см	30
1.17	Зависимость распределения полного времени задержки пробоя в координатах Лауэ от величины ударной ёмкости, построено по данным [6]	31
1.18	Зависимость времени до пробоя от напряжения	32

1.19	Зависимость времени до пробоя от напряженности в промежутке с квазиоднородном полем	32
2.1	Принципиальная схема экспериментальной установки	37
2.2	Оптическая схема получения изображений разрядного промежутка с задней подсветкой	38
2.3	Фото разрядной камеры для исследования ЭР в проводящих жидкостях и трех-координатного держателя ВВ электрода	40
2.4	Электроды в разрядной камере для исследования ЭР в жидкости	40
2.5	Разрядная камера для исследования ЭР во влажном грунте	41
2.6	Последовательность синхроимпульсов при запуске элементов системы регистрации и ЭР	42
2.7	Схема для измерения импульсного напряжения на разрядной камере с помощью резистивно-ёмкостного делителя напряжения	43
2.8	Схема для измерения импульсного тока в цепи разрядной камеры с помощью токового шунта	44
3.1	Развитие предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см)	47
3.2	Осциллограммы напряжения и тока предразрядных и разрядных явлений в проводящей воде (330 мкСм/см) по мере увеличения амплитуды импульса напряжения от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$	48
3.3	Вольт-амперные характеристики разрядного промежутка в проводящей воде (330 мкСм/см) по мере увеличения амплитуды импульса напряжения от $0.5U_{пр}$ до $U_{пр}$	49
3.4	Характерные осциллограммы напряжения (кривые 1), тока (кривые 2), и динамического сопротивления на разрядном промежутке при различной начальной амплитуде напряжения U_0	51
3.5	Динамика развития ЭР в проводящей воде (330 мкСм/см) при начальной амплитуде напряжения $U_0 = 13.5$ кВ	52
3.6	Динамика развития ЭР в проводящей воде (330 мкСм/см) при начальной амплитуде напряжения $U_0 = 7.7$ кВ	53
3.7	Вольт-амперные характеристики разрядного промежутка при различной начальной амплитуде напряжения U_0	54
3.8	Динамика роста канала разряда при действии пробойного напряжения	55
3.9	Влияние перенапряжения на электрические характеристики разрядного промежутка в проводящей воде (330 мкСм/см)	57
3.10	Зависимости критического размера $l_{по.к}$ начальной парогозовой области (а), времени $\tau_{зз}$ задержки зажигания разряда (б), средней скорости распространения канала (в) и полного времени пробоя $\tau_{пр}$ (г) от амплитуды U_0 импульса напряжения в проводящей воде (330 мкСм/см)	58
3.11	Развитие электрического разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при действии пробойного напряжения ($U_{пр} = 9.3$ кВ)	59

3.12	Влияние амплитуды импульса напряжения на электрические характеристики разрядного промежутка в воде с проводимостью 90 мкСм/см	60
3.13	Зависимости времени $\tau_{\text{зз}}$ задержки зажигания разряда (а) и полного времени пробоя $\tau_{\text{пр}}$ (б) от амплитуды U_0 импульса напряжения в воде с проводимостью 90 мкСм/см	61
3.14	Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «быстрое начало—медленное продолжение»	62
3.15	Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при «быстром» механизме развития	63
3.16	Внешний вид (а), вольт-амперная характеристика (б), осциллограммы напряжения, тока (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде с проводимостью 90 мкСм/см при переходном механизме развития «короткая инициация на аноде—развитие катодного канала»	64
3.17	Зависимость энергии $E_{\text{по.к}}$, вложенной к моменту пробоя начальной парогазовой области, от критического размера $l_{\text{по.к}}$ парогазовой области (а), амплитуды U_0 начального напряжения (б) и объемной плотности энергии $e_{\text{по.к}}$ от $l_{\text{по.к}}$ (в)	65
3.18	Внешний вид (а-б), осциллограммы напряжения, тока (б), вложенной энергии (в) и динамического сопротивления (г) разряда в воде при двух значениях коэффициента поверхностного натяжения: $\gamma_1 \approx 72$ мН/м, $\gamma_2 \approx 28$ мН/м	67
3.19	Распределение диаметров микропузырьков, полученных методом декомпрессии при давлении растворения 7 атм, среднеарифметический диаметр $d_{10} = (40 \pm 10)$ мкм	69
3.20	Развитие электрического разряда в проводящей воде с микропузырьками при напряжении $1.5U_{\text{пр.мин}}$	70
3.21	Развитие электрического разряда в проводящей воде с микропузырьками и поверхностными пузырьками на обоих электродах при напряжении $U_0 = 1.5U_{\text{пр.мин}}$	71
3.22	Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с микропузырьками при напряжении $1.5U_{\text{пр.мин}}$	72
3.23	Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с микропузырьками и поверхностными пузырьками на обоих электродах	73
3.24	Развитие электрического разряда в дистиллированной воде с поверхностными пузырьками на обоих электродах	73
3.25	Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде с микропузырьками при повышенном газосодержании	74
3.26	Развитие электрического разряда в слабопроводящей воде с микропузырьками при пониженном газосодержании	74

3.27	Общий вид (а) рабочей ёмкости для исследования распространения волн в газожидкостной среде с установленными гидрофонами и рабочие концы гидрофонов в защитных резиновых поверхностях (б)	76
3.28	Зависимости объёмного газосодержания элегаза (1,2) и воздуха (3) в трансформаторном масле от времени после газации	78
3.29	Зависимость затухания акустических волн в микропузырьковой среде «трансформаторное масло–элегаз» от величины объёмного газосодержания, определенного по амплитуде $V_{\text{гр}}$ первого пика сигнала (а) и по амплитуде $V_{\text{рр}}$ установившегося сигнала (б)	79
3.30	Внешний вид установки (а) и электрическая схема (б) для исследования затухания волн давления конечной амплитуды в газожидкостной среде	80
3.31	Осциллограмма сигнала датчика давления (фиолетовая кривая), по которой определялась амплитуда V_{sw}	81
3.32	Зависимости давления $p_s w$ на фронте волны конечной амплитуды (а) и ослабления A_{sw} её интенсивности (б) в зависимости от объёмного газосодержания φ элегаза в трансформаторном масле	82
3.33	Схема установки для исследования электрического пробоя трансформаторного масла с пузырьками газа	83
3.34	Зависимость газосодержания (а) и напряжения пробоя (б) в смеси трансформаторного масла с пузырьками воздуха (1) и элегаза (2) от времени после газации	85
3.35	Пробой внутри уединенного элегазового пузырька диаметром ~ 1 мм в трансформаторном масле в квазиоднородном поле	86
4.1	Характерные осциллограммы напряжения (1), тока (2) и динамического сопротивления при растекании импульсного тока в песке при влажности 10 %	101
4.2	Зависимость импульсного коэффициента заземлителя α от плотности тока на электроде	102
4.3	Вольт-амперные характеристики заземлителей	102
4.4	Свечение с поверхности при развитии разряда в песке при влажности 25 %	105
4.5	Зависимость среднего пробойного электрического поля от длины промежутка d при различной влажности песка	106
A.1	128
A.2	129
A.3	130
A.4	Серия изображений для построения графика скорости разрядного канала	130
A.5	131
A.6	Иллюстрация появления свечения в канале перед замыканием при повышении начального напряжения до уровня $1.5U_0$. Возможно, следует причислить название рисунка, но смысл именно такой.	131

Б.1	Геометрия расчетной области	132
Б.2	Распределение напряженности электрического поля вдоль оси электродов	133
Б.3	Температурные зависимости физических характеристик воды из стандартной базы веществ COMSOL Multiphysics, использованные при моделировании	133
Б.4	Расчетное распределение температуры воды в межэлектродном промежутке вдоль оси электродов в моменты времени 50 (1), 100 (2), 150 (3) и 200 мкс (4) после подачи напряжения	134
Б.5	Образование паровых пузырьков вблизи острия анода при развитии электрического разряда в водопроводной воде	135
В.1	Вид плазмохимической ячейки со стороны высоковольтного электродного элемента (а), поперечное сечение (б), продольное сечение (в), фотография ячейки в работе (г)	138

Список таблиц

1	Сводная таблица работ по пробое в проводящих жидкостях с указанием основных полученных результатов	27
2	Результаты обработки графиков распределения времен задержки пробоя $\tau_{пр}$, построенных на основе данных [6]	31
3	Параметры резистивно–ёмкостного делителя напряжения	44
4	Результаты сопоставления наблюдаемых явлений и диапазонов напряжения их реализации	50
5	Значения скорости звука и плотности для использовавшихся веществ при нормальных условиях (давление 1 атм, температура 20 °С)	78
6	Результаты измерений напряжения при пробое трансформаторного масла, газированного воздухом и элегазом	84
7	Выходные данные полученного патента на полезную модель	139

Приложение А

Дополнительный иллюстративный материал

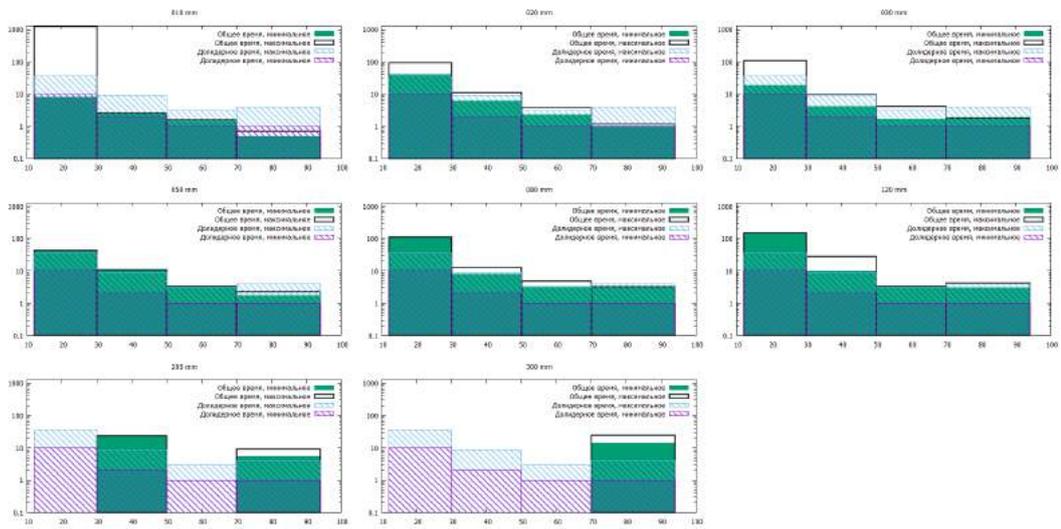
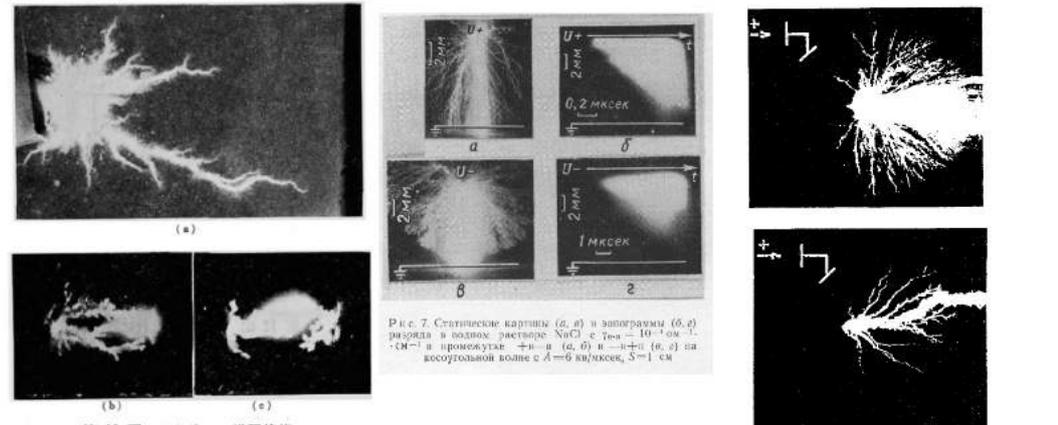
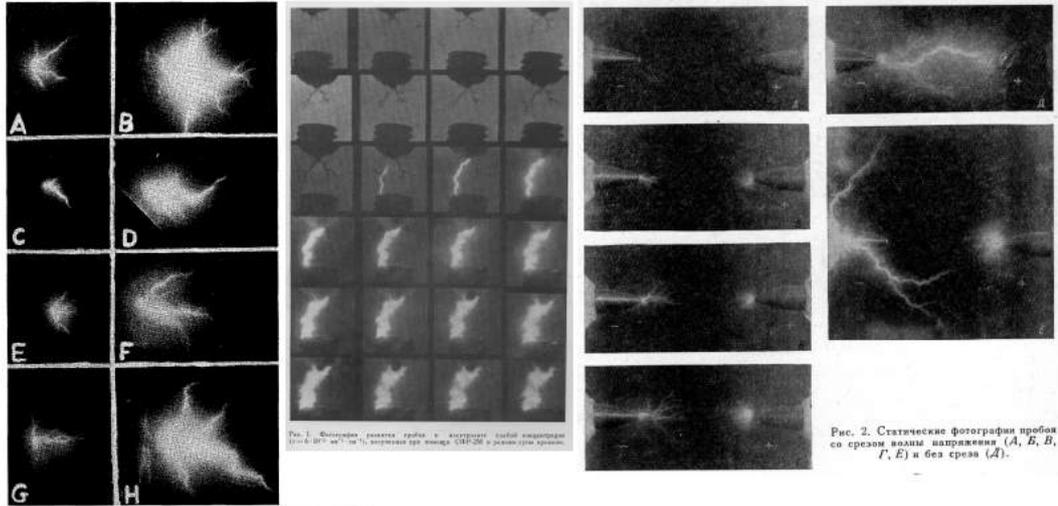


Рисунок А.1



第 10 図 ストリーマ進展状態

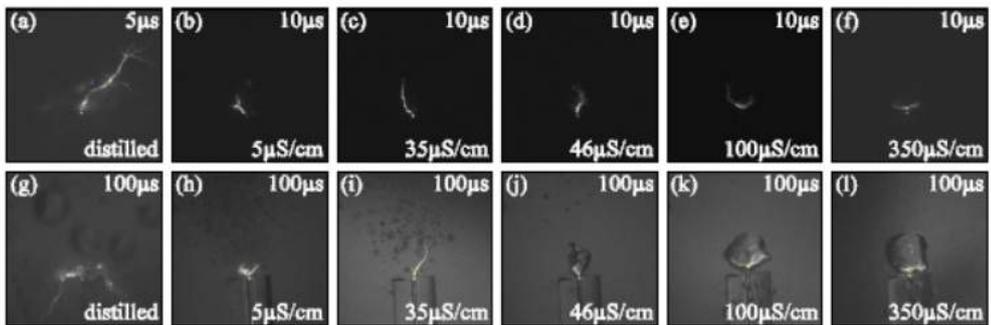


Рисунок А.2

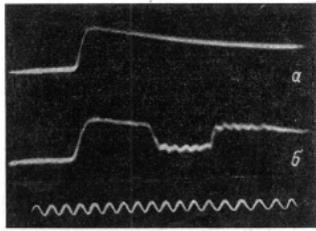
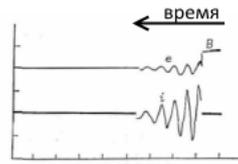


Рис. 2.
а — импульсы генератора, как его передает емкостной делитель; б — типичная осциллограмма пробоя образца. Период триггерных колебаний $2 \cdot 10^{-8}$ сек.



第 9 図 電圧-電流波形 (水中)
Fig. 9. Voltage and current wave form in water.

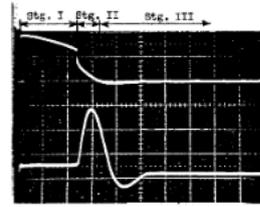


Figure 5. $V(t)$ and $I(t)$ for Test Cell.
 $t = 5 \mu s/div, V(t) = 2 kV/div, I = 3.7 kA/div, Cell Gap 3.0 mm, Resistivity = 15 \mu-cm$

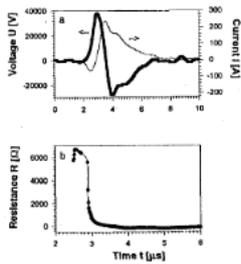


Figure 2. a) Current and voltage waveforms, b) resistance vs. time for impulse breakdown of $CuSO_4$ water solution with conductivity $\gamma=2 \times 10^5 S/m$, positive polarization of the point electrode.

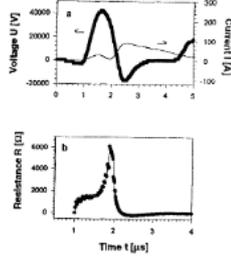


Figure 3. a) Current and voltage waveforms, b) resistance vs. time for impulse breakdown of $CuSO_4$ water solution with conductivity $\gamma=2 \times 10^5 S/m$, positive polarization of the point electrode.

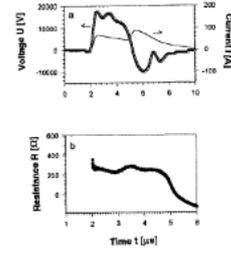


Figure 4. a) Current and voltage waveforms, b) resistance vs. time for impulse breakdowns of $CuSO_4$ water solution with conductivity $\gamma=5 \times 10^5 S/m$, positive polarization of the point electrode.

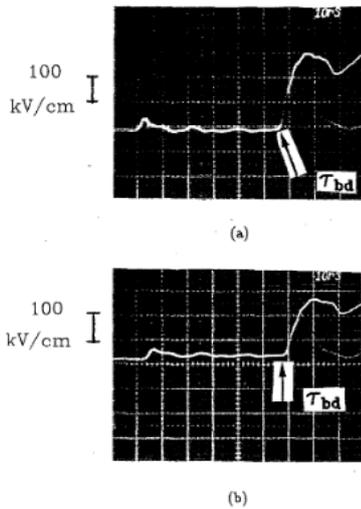


FIG. 2. Voltage wave form at the load: breakdown in water and salt solutions: (a) water ($d=0.11 cm, P=5000 psi$); (b) sodium chloride solution ($d=0.11 cm, P=4000 psi, C=0.001 M$).

Рисунок А.3

Рисунок А.4 — Серия изображений для построения графика скорости разрядного канала

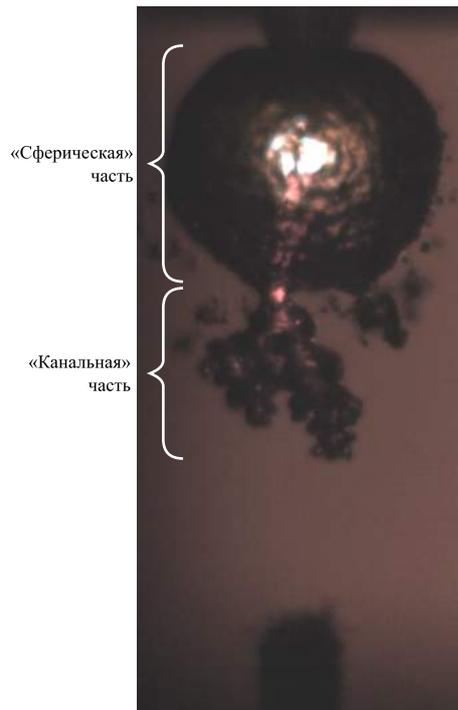
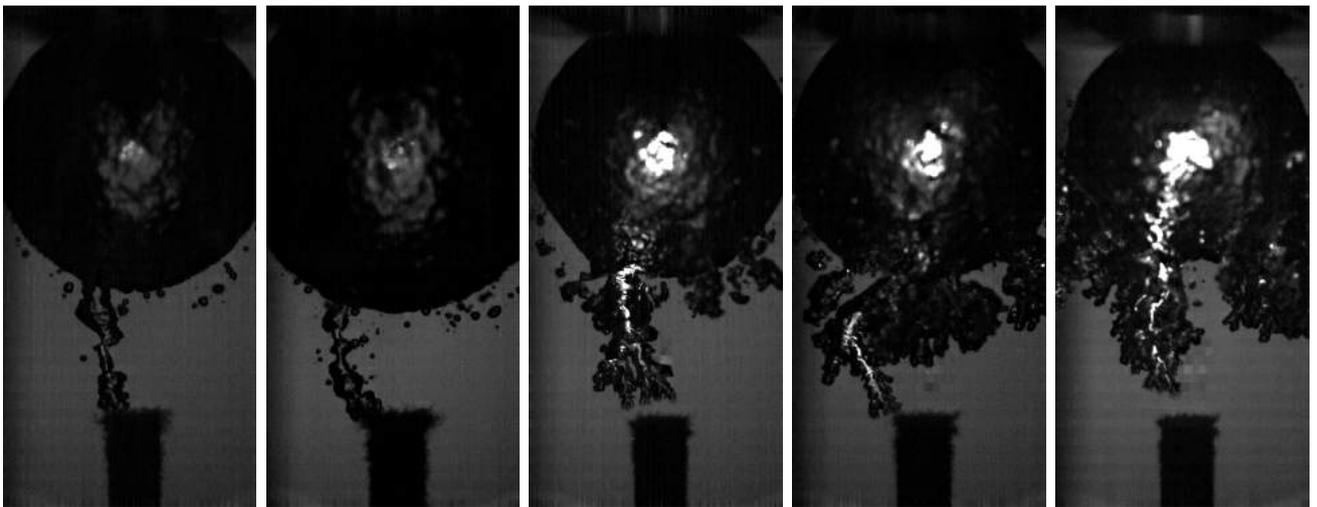


Рисунок А.5



а) caption

б) caption

в) caption

г) caption

д) caption

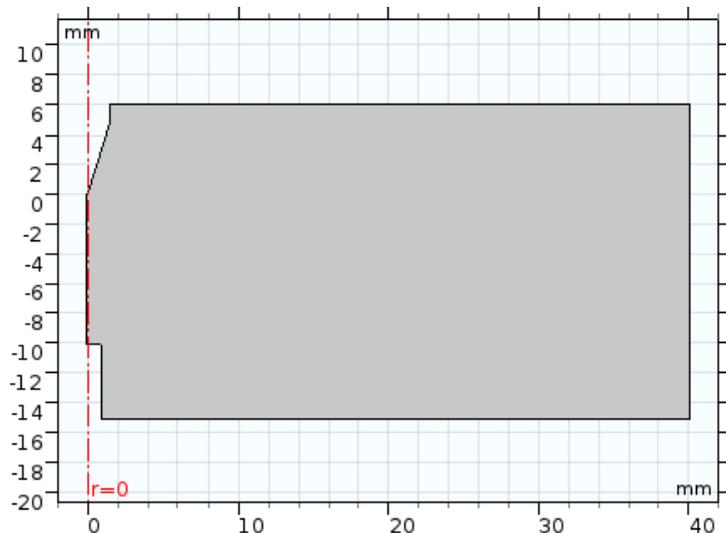
Рисунок А.6 — Иллюстрация появления свечения в канале перед замыканием при повышении начального напряжения до уровня $1.5U_0$. Возможно, следует причислить название рисунка, но смысл именно такой.

Приложение Б

Расчет напряженности и температуры в межэлектродном промежутке

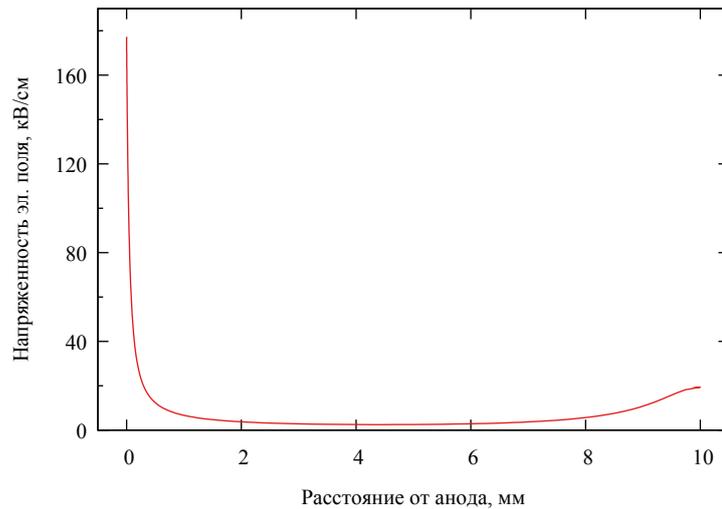
Б.1 Моделирование электростатического поля в межэлектродном промежутке

Моделирование распределения электростатического поля в межэлектродном промежутке было проведено в среде COMSOL Multiphysics, в осесимметричной постановке с помощью электростатического модуля, в котором решается уравнение $E = -\nabla U$ для расчетной области, в которой заданы потенциалы анода (U_a) и катода (U_k). Двумерная расчетная область (см. рисунок Б.1) представляет собой вертикальное сечения реальной разрядной ячейки с электродами, форма которых совпадает с использованной в экспериментах. Сверху область ограничена уровнем жидкости, снизу — уровнем нижнего края открытой в жидкость части катода, справа — внутренней поверхностью стенки ячейки, слева — осью электродов. На рисунке Б.2 приведены результаты численного расчета распределения напряженности электрического поля на оси симметрии (вдоль оси электродов).



Ось симметрии — пунктирная линия в левой части изображения, отмеченная как $r = 0$. Анод и катод в расчетной области заданы в виде криволинейных кромок, которые «срезают» левый верхний (для анода) и левый нижний (для катода) углы у расчетной области (сплошная серая область на рисунке, в модели заполненная воздухом). $U_a = 7$ кВ, $U_k = 0$ В, $d_{мэ} = 10$ мм.

Рисунок Б.1 — Геометрия расчетной области

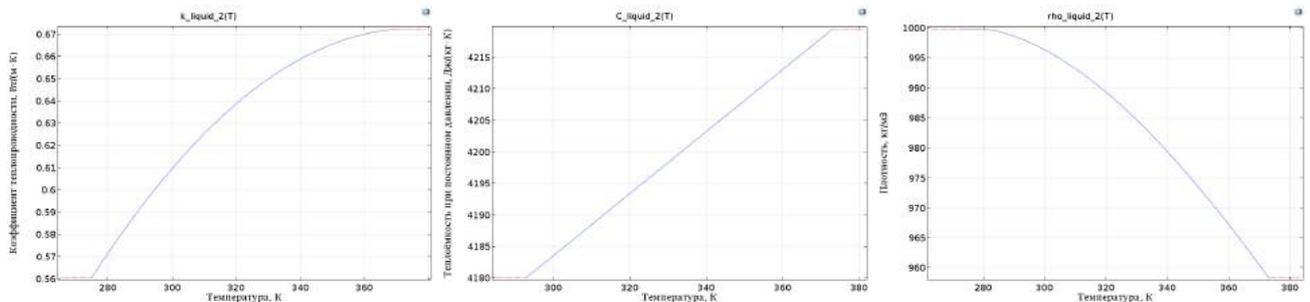


Расстояние по оси абсцисс откладывается от поверхности острого анода. $U_a = 7$ кВ, $U_k = 0$ В, $d_{\text{МЭ}} = 10$ мм.

Рисунок Б.2 — Распределение напряженности электрического поля вдоль оси электродов

Б.2 Моделирование прогрева жидкости начальными токами проводимости

Для оценки картины прогрева слоя воды вблизи высоковольтного острейного анода при подаче на него импульса напряжения в среде COMSOL Multiphysics проведено моделирование процесса джоулевого разогрева проводящей жидкости. Использована расчетная область, показанная на рисунке Б.1.



а) коэффициент теплопроводности

б) теплоёмкость при постоянном давлении

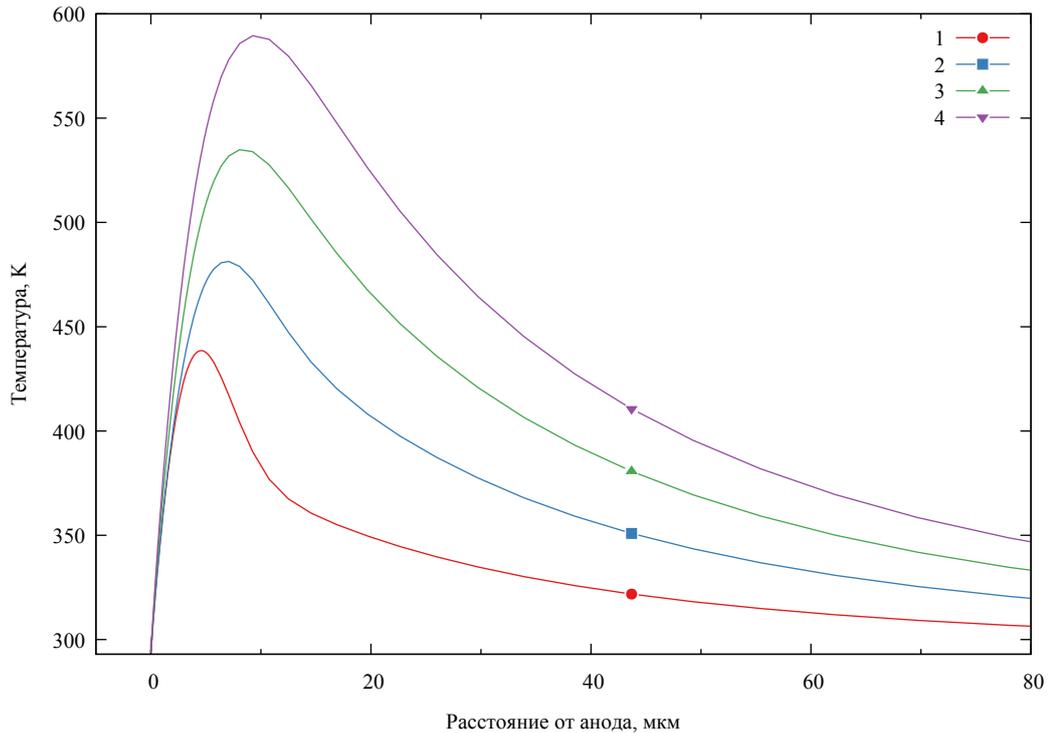
в) плотность

Рисунок Б.3 — Температурные зависимости физических характеристик воды из стандартной базы веществ COMSOL Multiphysics, использованные при моделировании

Температура поверхностей электродов задана постоянной и равной 293 К. Начальная температура жидкости также равна 293 К, проводимость задаётся постоянной и равной 330 мкСм/см. Для задания физических параметров воды (рисунок Б.3) использована стандартная база данных COMSOL Multiphysics. При моделировании в уравнении теплопроводности в качестве источника тепла учитывается джоулево тепловыделение $Q = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$, рассчитанное на основе решения уравнений для электрического поля и тока. В результате решалась нестационарная система уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \nabla U \\ \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \\ Q = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(k \nabla T) = Q \end{cases} \quad (\text{Б.1})$$

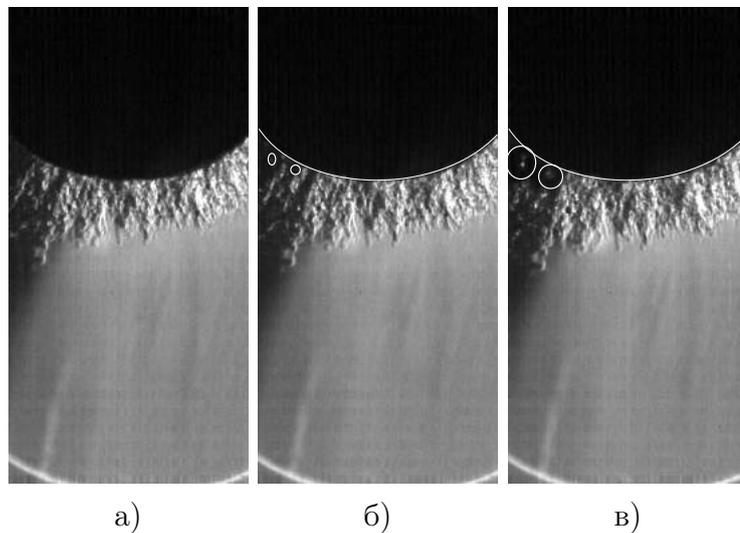
На рисунке Б.4 показано изменение распределения температуры вдоль оси электродов. На горизонтальной оси отсчитывается расстояние от кончика острого анода по направлению к катоду.



Напряжение на аноде 7 кВ, длина межэлектродного промежутка 10 мм, проводимость воды 330 мкСм/см. Расстояние по оси абсцисс откладывается от поверхности острого анода.

Рисунок Б.4 — Расчетное распределение температуры воды в межэлектродном промежутке вдоль оси электродов в моменты времени 50 (1), 100 (2), 150 (3) и 200 мкс (4) после подачи напряжения

Полученные кривые соответствуют ситуации, когда максимальная температура в жидкости достигается на некотором расстоянии от поверхности электрода. Данное обстоятельство, в первую очередь, связано с заданием постоянной температуры поверхности, но, по-видимому сообразно реальности, поскольку при фоторегистрации прианодной области с большим масштабом замечено появление пузырьков на небольшом расстоянии от поверхности электрода (рисунок Б.5).



а) б) в)
Белыми контурами обозначены кромка острия анода (большая дуга в верхней части изображений б) и в)) и видимые контуры растущих пузырьков (небольшие окружности под дугой на тех же изображениях).

Рисунок Б.5 — Образование паровых пузырьков вблизи острия анода при развитии электрического разряда в водопроводной воде

Приложение В

Многопиновая ячейка для плазмо-химической очистки загрязнённой жидкости

Одновременно с исследованием электрического разряда в проводящей жидкости без и с микропузырьками велась разработка устройства для эффективной очистки воды от химических загрязнений. В качестве основного модельного загрязнения был выбран изопропиловый спирт, широко используемый в микроэлектронной промышленности при изготовлении плат.

В качестве основной при разработке устройства (плазмохимической ячейки) принималась идея повышения эффективности протекания химических реакций окисления загрязняющего вещества за счет ввода в жидкость дополнительного кислорода в виде пузырьков воздуха и организации внутри них импульсного электрического разряда, который, в свою очередь, является источником неравновесной плазмы и активных химических частиц. Сложность реализации состоит в максимизации объёма, занимаемого плазмой разряда.

Исходя из этих предпосылок была предложена полезная модель. В качестве прототипа предлагаемой полезной модели выбрана плазмохимическая ячейка в составе плазменно-биохимического реактора по патенту RU86941U1, содержащая диэлектрический корпус с входным и выходным фланцами, в котором размещены анодный и катодный плазмформирующие элементы для обработки загрязнённой жидкости, протекающей через ячейку. В ячейке-прототипе катодный элемент выполнен в виде стержня, на конце которого имеется одна или несколько шайб с острыми гранями, а анодный элемент состоит из перфорированного цилиндра и кольца, охватывающего шайбы катодного элемента.

Способ насыщения раствора пузырьками оставлен относительно прототипа без изменений — жидкость и газ подаются отдельно на пористый элемент, состоящий из большого количества колец Рашига высотой 3 мм, где и происходит их смешение и дальнейшее движение в виде пузырьковой среды в область электродов ячейки.

Недостаток ячейки-прототипа заключается в большом объеме «мёртвой зоны», в которой протекающая через ячейку жидкость не подвергается полноценной плазменной обработке, что снижает эффективность окисления и очистки загрязнённой жидкости.

Для решения задачи устранения «мёртвых зон» была предложена электродная система с секционированными электродами и индивидуальной системой электропитания отдельных секций. Электроды с высоковольтной стороны выполнены в виде отдельных игл диаметром до 1 мм и расположены в 6 рядов, по 13 штук в каждом (всего 78 штук) на расстоянии 3 мм друг от друга и между рядами. С низковольтной стороны электроды выполнены в виде трех пластин шириной 6 мм. Расстояние между поверхностью пластин и кончиками игольчатых электродов может регулироваться в диапазоне 0–6 мм.

Электродная система запитывается переменным напряжением от повышающего трансформатора 220/2000 В через индивидуальные токоограничивающие ёмкости, по одной на

каждый игольчатый электрод. Такое решение позволяет избежать контракции какого-то одного разрядного канала и приводит к более равномерному распределению плазменной области в промежутке.

Технический результат полезной модели — повышение эффективности плазменной обработки загрязнённой жидкости, протекающей через ячейку.

Предметом полезной модели является ячейка для плазмохимической очистки загрязнённой жидкости, содержащая корпус с входным и выходным фланцами, в котором размещены анодный и катодный плазмформирующие элементы, отличающаяся тем, что указанные элементы размещены напротив друг друга на диэлектрических стенках корпуса в его средней части, при этом высоковольтный электродный элемент выполнен в виде набора игл, рядами закреплённых в одной диэлектрической стенке корпуса, а низковольтный — в виде набора пластин со скруглёнными углами, каждая из которых закреплена в другой диэлектрической стенке напротив двух соответствующих рядов игл катодного элемента. Это позволяет получить указанный технический результат.

Пример осуществления полезной модели представлен на рисунке В.1. На рисунке В.1а показан вид ячейки со стороны высоковольтного электродного элемента, на рисунке В.1б — её поперечное сечение, а на рисунке В.1в — продольное сечение. Ячейка содержит корпус, состоящий из боковин-держателей (1) и диэлектрических стенок (2) и (3), установленных между входным фланцем (4) и выходным фланцем (5). В средней части корпуса на диэлектрических стенках (2) и (3) напротив друг друга размещены плазмформирующие элементы (6) и (7). Высоковольтный электродный элемент (7) выполнен в виде набора игл (8), рядами закреплённых в диэлектрической стенке (2) корпуса, а низковольтный электродный элемент (6) — в виде набора пластин (9) закреплённых в другой диэлектрической стенке (3) корпуса напротив двух соответствующих рядов игл (8).

Ячейка работает следующим образом. Жидкость, предварительно доведенная до состояния микропузырьковой среды, подлежащая плазмо-химической очистке, подаётся в ячейку через центральное отверстие фланца (4). Скорость потока должна быть достаточной для реализации дополнительного дробления микропузырьков во фронте ударной волны, образующейся на элементах электродной системы. При подаче соответствующего напряжения питания на элементы (7) и элементы (6) между каждой пластиной (9) и двумя рядами игл (8), закреплённых напротив этой пластины (9), развивается электрический пробой, который занимает всю область ячейки между плазмформирующими элементами (6) и (7). При этом, как в жидкой, так и в газовой фазах образуются необходимые для реакции радикалы и активные частицы. Очищенная жидкость, в которой нежелательные примеси окислены с помощью плазменно-химической обработки, отводится через центральное отверстие фланца (5).

Предлагаемая конструкция плазмо-химической ячейки, в отличие от известной ячейки-прототипа, активирующей химическую реакцию одиночным контрагированным электрическим разрядом, активизирует протекание реакций преобразования за счет формирования квазиобъёмного электрического разряда.

При этом рабочая область ячейки (т. е. область ячейки, в которой протекают активные плазмохимические преобразования) увеличивается, а объем мертвых зон внутри ячейки, в

которых обрабатываемая жидкость не подвергается полноценной плазменной обработке, существенно уменьшается по сравнению с прототипом, повышая тем самым эффективность процесса очистки.

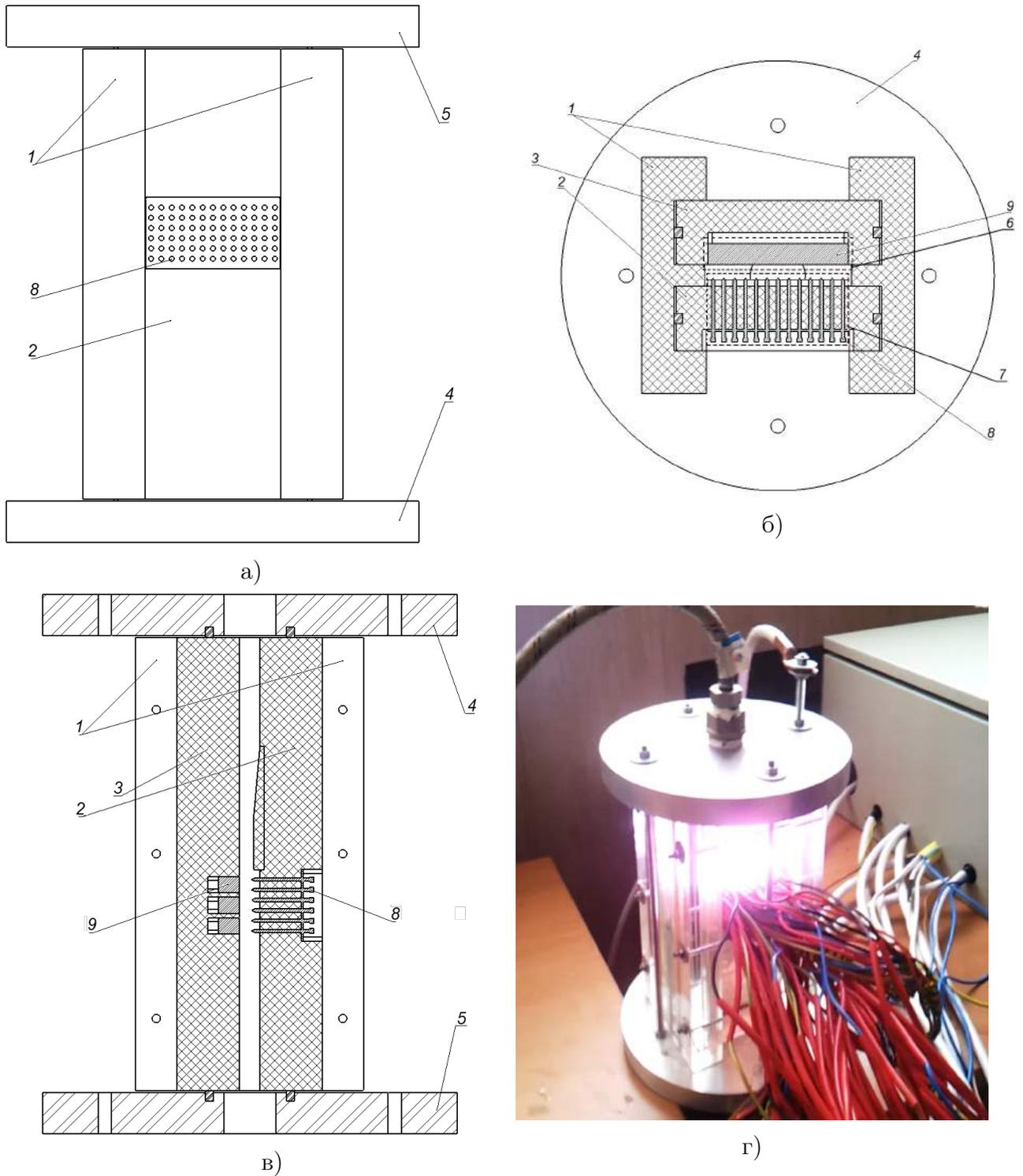


Рисунок В.1 — Вид плазмохимической ячейки со стороны высоковольтного электродного элемента (а), поперечное сечение (б), продольное сечение (в), фотография ячейки в работе (г)

Таблица 7 — Выходные данные полученного патента на полезную модель

Тип патента:	Полезная модель
Номер патента:	134921
Название:	Ячейка для плазмохимической очистки загрязненной жидкости
Патентообладатели:	Панов Владислав Александрович Куликов Юрий Матвеевич Сон Эдуард Евгеньевич
Авторы:	Панов Владислав Александрович Куликов Юрий Матвеевич Сон Эдуард Евгеньевич
Номер заявки:	2013117072
Приоритет полезной модели:	16 апреля 2013 г.
Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации:	27 ноября 2013 г.
Срок действия патента:	16 апреля 2023 г.
