

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН ИСЭ СО РАН

академик

Н. А. Ратахин

/ Н. А. Ратахин /

« 26 » февраля 2018 г.

М.П.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Панова Владислава Александровича

«Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы»

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию динамики импульсного электрического разряда в жидкостях и газожидкостных смесях. Предметами изучения являются такие разные на первый взгляд среды, как вода с повышенной проводимостью, двухфазные среды на её основе, а именно: вода с парогазовыми микропузырьками и мокрый песок, а также трансформаторное минеральное масло с пузырьками различных газов. Исследования, представленные в работе, и анализ полученных результатов позволили выделить общие закономерности развития импульсного электрического разряда в указанных средах и указать на некоторые принципиальные отличия. Была создана современная экспериментальная установка, позволяющая регистрировать электрические характеристики, собственное свечение, а также реализовать теневой метод наблюдений разрядных явлений.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений, а также списков сокращений и условных обозначений, литературы, рисунков и таблиц. Полный текст диссертации изложен на 139 страницах, список цитируемой литературы содержит 131 наименование.

Во введении дано краткое обоснование направления исследований, формулируются цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, с учетом актуальности работы, её научной новизны и практической ценности, а также представлен список основных публикаций автора по теме диссертации, и отмечен его личный вклад.

В первой главе дан обзор существующих механизмов развития импульсного электрического разряда в однофазных и двухфазных средах и на основе этого детально сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе описаны использованные в работе экспериментальные установки и методики исследований, даны оценки основным погрешностям измерений. Значительное

внимание уделено особенностям методики наблюдений разрядных явлений с пространственным и временным разрешением.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты применительно к разрядам в различных условиях. Результаты можно разделить на три блока в соответствии с условиями, в которых проведены эксперименты. Один блок данных соответствует развитию пробоя в воде, которую автор характеризует как имеющую повышенную проводимость (около 330 мкСм/см). Основной цикл экспериментов посвящен: выявлению временных стадий развития разряда и определению влияния перенапряжения на их длительность. Отдельный эксперимент посвящен качественному определению влияния добавок изопропилового спирта к воде.

Другой блок соответствует исследованию разряда в воде с более низкой проводимостью (на уровне от 35 до 90 мкСм/см). Для данного диапазона проводимости также определены характерные времена установленных ранее стадий развития разряда. Кроме того, при пониженной проводимости продемонстрировано резкое увеличение скорости распространения разрядного канала при превышении некоторого порогового значения напряжения.

В качестве отдельного блока можно рассматривать данные по пробоям в трансформаторном масле в специфических условиях, когда газовые микропузырьки в предпробойной стадии создавались искусственно.

В четвертой главе проведен анализ полученных экспериментальных данных и их интерпретация. Данная глава по сути охватывает интерпретацию во всем трем выделенным выше блокам.

В заключении сформулированы основные результаты работ.

В приложениях содержится дополнительная поясняющая информация. В частности, приведены данные о патенте на полезную модель «Многопиновая ячейка для плазмо-химической очистки загрязненной жидкости», полученном диссертантом с соавторами.

Актуальность темы диссертации. Как отмечается в обзоре литературы, в большинстве работ основное внимание уделялось исследованию развития электрического пробоя в диэлектрических жидкостях и в жидкостях с малой проводимостью. Однако и исследования пробоя проводящих жидкостей, имеет некоторую историю развития. Здесь основная идея для объяснения пробоя базируется на представлениях о тепловом механизме образования газовых микрополостей и последующего развития разряда в них. Актуальность темы работы связана с тем, что детали процессов в предпробойной стадии и стадии пробоя к настоящему времени разработаны не в полной мере. С другой стороны, изучаемые разряды довольно широко используются в практике, включая технологические применения, что также является существенным стимулом для постановки физических исследований.

Научная новизна работы. Отметим некоторые из представленных в диссертации результатов, которые имеют научную новизну и представляются теоретически и практически значимыми.

Наиболее важные новые результаты и их непротиворечивые объяснения с проведением соответствующих оценок относятся к условиям пробоя в воде с повышенной

проводимостью. Здесь автор привлекает подход, который он называет тепловым механизмом развития пробоя. Вводится понятие некоторого импульсного пробивного напряжения, при котором при заданной длительности импульса (обычно несколько миллисекунд) происходит перекрытие промежутка высокопроводящим искровым каналом. В соответствии с обоснованной экспериментально моделью возникновение канала происходит в несколько характерных этапов. Вначале вблизи острия возникают газовые микрополости и происходит возникновение разряда в микрополостях. Затем в жидкости вблизи фронта плазмы образуются новые газовые полости, и в них также загорается разряд, и образующийся фронт плазмы последовательно продвигается от острейшего анода к катоду. Характерное время перекрытия промежутка плазмой оказывается довольно большим, поскольку оно определяется характерным временем образования микропузырьков вблизи электрода и на фронте распространяющегося канала. Именно такой механизм автор называет тепловым.

Показано, что при превышении начального напряжения над пробивным напряжением время перекрытия промежутка каналом резко уменьшается, что формально можно интерпретировать, как резкое увеличение скорости роста канала. Автор интерпретирует данный эффект как смену механизма пробоя (переход от теплового механизма к, так называемому, стримерному).

Представляет интерес полученный автором набор данных по влиянию газовых пузырьков, искусственно создаваемых в различных средах на пробивное напряжение и на время развития разряда в предпробойной стадии.

Наконец, важными в плане развития представлений о пробое в двухфазных средах являются результаты по изучению распространения канала разряда во влажном песке. Здесь автор привлекает для объяснений подходы, развитые ранее для интерпретации процесса развития разряда в воде с повышенной проводимостью.

Научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы.

Например, получены данные по инициированию разряда и развитию пробоя в воде с повышенной проводимостью при воздействии импульсов напряжения миллисекундной длительности. Интересны также результаты по влиянию газовой фазы на развитие разряда в воде и на электроизоляционные и демпфирующие свойства газожидкостной смеси с трансформаторным маслом.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Сформулированные представления о механизме развития электрического разряда в проводящей воде могут быть использованы в области плазменных методов водоподготовки при выборе наиболее эффективного режима работы источника питания, а именно: при выборе формы импульса напряжения, его амплитуды, периода и скважности. Данные о влиянии сосредоточенной и распределенной газовой фазы в проводящей воде представляют ценность для развития этих методов водоподготовки с предварительной аэрацией жидкости с целью повышения эффективности протекания химических реакций.

Полученные данные о демпфирующих и электроизоляционных характеристиках газожидкостной смеси трансформаторного масла с пузырьками элегаза могут быть

использованы для разработки конструкций высоковольтного маслонаполненного энергетического оборудования.

Данные о формировании и развитии плазменного канала в песке с различной влажностью и установленный критерий начала ионизационных процессов в грунте представляются значимыми для создания более эффективных заземляющих систем молниезащиты.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, разрабатывающих энергетическое оборудование и системы очистки воды, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН), в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН, в Санкт-Петербургском, Московском, Дагестанском государственных университетах, Институте нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, в Институте Общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Физико-энергетическом институте им. А. И. Лейпунского, Московском физико-техническом институте (государственном университете), в Национальном исследовательском университете «МЭИ», НИЦ «Курчатовский институт», НПО «ЛИТ», ПАО «ФСК ЕЭС», АО «НПО «Стример».

Апробация работы. Материалы диссертации довольно полно представлены на ведущих российских и международных конференциях. Соответствующий список, представленный в автореферате диссертации, содержит 16 наименований.

Публикации. По теме работы (кроме трудов конференций) автор имеет 10 статей в журналах из перечня ВАК, причем 8 из этих статей опубликованы в авторитетных изданиях, индексируемых в базе данных *Web of Science*.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Замечания и пожелания. Ясно, что практически любая диссертационная работа имеет некоторые недостатки. Наиболее существенный из них сводится к следующему.

В работе действительно продемонстрировано, что увеличение перенапряжения (особенно применительно к воде с пониженным удельным сопротивлением) приводит к уменьшению времени образования высокопроводящего канала, т.е. фактически времени запаздывания пробоя. Однако тот факт, что в условиях эксперимента происходит смена механизма явлений в предпробойной стадии является скорее декларированием, чем убедительно обоснованным утверждением. Точно также, опираясь на так называемую тепловую модель, можно сказать, что уменьшение времени запаздывания связано с тем, что при повышенном напряжении газовые микропузырьки образуются за существенно более малые времена.

В качестве пожелания можно отметить, что автору следовало бы уделить больше внимания представлению результатов исследований условий начала ионизации во влажном песке. Этот раздел работы обладает самостоятельной практической ценностью, а не только является некоторым вспомогательным материалом для сравнения с обнаруженными закономерностями для пробоя в проводящей воде.

Отмеченные выше недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор Панов Владислав Александрович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы».

Диссертация была обсуждена и одобрена на научном семинаре лаборатории низкотемпературной плазмы Института сильноточной электроники СО РАН (протокол №2 от 21 февраля 2018 г.).

ОТЗЫВ СОСТАВИЛ

Зав. лабораторией низкотемпературной плазмы
доктор физико-математических наук

Ю.Д. Королёв

Подпись Королёва Юрия Дмитриевича заверяю.
Ученый секретарь ИСЭ СО РАН
д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
634055 г. Томск, проспект Академический, 2/3
(3822) 491-947, scientific-secretary@hcei.tsc.ru



И.В. Пегель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).
634055, Томск, проспект Академический 2/3 (3822)491-544 contact@hcei.tsc.ru.