

## ОТЗЫВ

официального оппонента Акишева Юрия Семёновича  
на диссертационную работу Панова Владислава Александровича  
«Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах» на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.08 – «Физика плазмы»

Электрические разряды в жидких средах (включая и воду) издавна являются объектом пристальных экспериментальных и теоретических исследований по причине их широкого применения в разнообразных научных и практических приложениях. В качестве примера таких приложений, перспективных в настоящее время, можно указать электроразрядную очистку промышленных вод от различных трудноудаляемых веществ, а также глубокую очистку питьевой воды от опасных для здоровья микропримесей, таких как антибиотики, которые плохо удаляются традиционными способами очистки воды. Электрофизические методы решения таких задач привлекательны тем, что они являются экологически более безвредными по сравнению с чисто химическими методами.

Эффективность плазмо-жидкостной системы при решении конкретной задачи не в последнюю очередь определяется свойствами разряда в обрабатываемой жидкости. По этой причине экспериментальное исследование разряда в жидких средах в новой области параметров как самой жидкости, так и электрического разряда не только расширяют физическую картину такого разряда, но позволяют более осмысленно выбирать конструкцию и условия эксплуатации плазмо-жидкостной системы при решении конкретной практической задачи. При этом одно из ограничений, которое необходимо учитывать при использовании плазмо-жидкостных систем, состоит в развитии пробоя в этих системах. В связи со сказанным, актуальность темы диссертации по экспериментальному исследованию электрического пробоя в газожидкостных средах не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы, трех приложений. Объем диссертации составляет 138 страниц (с приложениями), библиографический список цитируемой литературы содержит 131 наименование.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы и сформулирована цель работы. В рамках этой цели поставлена задача об исследовании развития начальных стадий импульсного разряда большой длительности вплоть до пробоя в проводящей воде и трансформаторном масле с пузырьками воздуха и элегаза, а также во влажном песке, имитирующем грунты заземляющих устройств, и выяснении основных механизмов каждой стадии разряда.

Далее автор перечислил задачи, решенные в диссертации, и привел основные положения, выносимые на защиту. В конце этой главы определен личный вклад автора и приведен список основных публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** проведён подробный анализ литературы по теме диссертации. С учетом длинной предыстории исследований разряда в жидких средах, перед автором стояла сложная задача в краткой форме изложить состояние проблемы по пробоям в воде, масле и грунтах, сложившееся к настоящему времени. Однако диссертанту удалось это сделать и даже на основе имеющихся публикаций рассчитать некоторые недостающие данные по указанной проблеме и свести их в таблицу. Представленный обзор

свидетельствует о хорошем знании работ других авторов, и достаточно полно отражает современное состояние исследуемых диссертантом вопросов. Выполненный анализ литературы позволил Панову В.А. четко определить свою нишу в области исследований электрического разряда в газожидкостных системах.

Так, необходимость исследований импульсного разряда в проводящей воде обоснована тем, что опубликованные результаты по разрядам в проводящей воде, в основном, относятся к дуговой, завершающей стадии разряда. Исследование электрического пробоя в трансформаторном масле обусловлено необходимостью создания новых систем защиты мощного маслonaполненного оборудования от разрушения при аварийном пробое изоляции и разрушения оборудования ударной волной, рожденной электрическим разрядом при пробое масла. Исследование импульсного разряда во влажном грунте связано с необходимостью защиты микроэлектроники и компьютерной техники в системах управления высоковольтными передающими сетями от перенапряжений, возникающих при ударах молнии и аварийных включениях. Проблема связана с тем, что для разрушения микроэлектроники и сбоя в работе компьютеров достаточны импульсы перенапряжения, которые многократно меньше, чем допускали спроектированные ранее защитные системы.

Во **второй главе** диссертации представлено подробное описание экспериментальной установки, созданной автором для проведения намеченных исследований разряда в проводящей воде, трансформаторном масле и влажном песке, имитирующем грунт. Диссертантом перечислены системы диагностики импульсного разряда и используемые методики подготовки газожидкостных сред и обработки экспериментальных результатов, а также проведен анализ погрешностей. Можно отметить, что методы исследования, использованные в диссертационной работе Панова В.А., являются современными и отвечают поставленной задаче.

В **третьей главе** диссертации приведены полученные экспериментальные данные по развитию электрического разряда в проводящей воде при напряжениях ниже и выше пробойного с подробным выяснением влияния на развитие разряда проводимости жидкости и коэффициента поверхностного натяжения, а также объёмных и поверхностных микропузырьков в слабопроводящей и проводящей воде. Кроме того, приведены полученные данные по пробое трансформаторного масла с пузырьками газа.

В **четвёртой главе** диссертации обсуждаются результаты экспериментальных исследований. На основе полученных результатов автором предложен тепловой механизм медленного развития длительного импульсного электрического разряда в проводящей жидкости. Физический механизм включает 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 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.

В этой главе автором сделаны также оценки параметров пробоя на разных этапах развития.

В **заключении** приведены основные выводы диссертации.

Среди полученных в работе результатов хотелось бы **особо отметить следующие**:

1. Экспериментальные данные о развитии разряда в воде с повышенной проводимостью и наличием газовой фазы, в трансформаторном масле с пузырьками воздуха и элегаза и во влажном песке. Впервые проведены систематические измерения скорости распространения электрического разряда в проводящей воде (330 мкСм/см) и установлено её среднее значение  $\sim 5$  м/с.
2. Результаты исследований о влиянии газовых пузырьков на поверхности электродов и в объеме жидкости на развитие разряда в проводящей воде. Особенно важным для практики является обнаруженный факт, что в проводящей воде (330 мкСм/см) на инициирование разряда и динамику начальной стадии влияют только пузырьки газа на поверхности электрода, а объёмные микропузырьки не оказывают заметного влияния на время развития разряда, механизм и структуру разрядного канала.
3. Результаты для смесей трансформаторного масла с элегазом и воздухом о том, что можно создать газожидкостную среду с объемным содержанием газа в несколько процентов, в которой будет значительное затухание волн давления конечной амплитуды при допустимом снижении электрической прочности смеси по сравнению с маслом.
4. Данные о том, что развитие разряда во влажном песке, как и в проводящей воде, связано с развитием тепловой неустойчивости вблизи высоковольтного электрода, которая (неустойчивость) приводит к контракции тока и формированию плазменного канала. Важен также предложенный новый метод определения величины критической напряженности электрического поля образования и развития плазменного канала во влажном грунте, основанный на анализе вида динамических вольт-амперных характеристик.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Для выяснения роли коэффициента поверхностного натяжения, который будет влиять на длительность начальной стадии в соответствии с предложенной в диссертации моделью, были проведены эксперименты с раствором спирта в воде. Результаты экспериментов кратко изложены в разделе 3.1.6. Однако, добавка спирта изменит также удельную теплоемкость, температуру кипения, теплоту испарения и диэлектрическую проницаемость смеси, которые тоже влияют, как следует из модели с тепловым механизмом на первой стадии, на время образования пузырьков пара. Автору следовало бы указать влияние данных факторов по сравнению с изменением коэффициента поверхностного натяжения.
2. В главе 3 в схеме эксперимента момент пробоя разряда фиксируется по измерению напряжения с помощью резистивных делителей без емкостной компенсации. Для используемых напряжений 70 кВ величина сопротивления в высоковольтном плече делителя будет на уровне десятков Мом, будут велики также геометрические размеры, чтобы избежать электрического пробоя, следовательно, будут велики монтажные емкости, которые будут определять фронт нарастания регистрируемого импульса, снижать полосу регистрируемых частот и вносить погрешности в регистрацию начала пробоя. Данный вопрос не обсуждается при изложении схемы эксперимента.
3. На странице 94 в разделе 4.1.2 указано, что «Лапласовым давлением можно пренебречь по сравнению с атмосферным и дополнительным электрострикционным». Как это утверждение согласуется с экспериментами по выяснению роли коэффициента поверхностного натяжения?

**Научная и практическая ценность** данной работы: результаты могут быть использованы при разработке и усовершенствовании моделей пробоя воды, разработке оборудования для очистки воды, усовершенствования систем заземления грозозащиты. Следует особо отметить, что по результатам данной работы Пановым В.А. с соавторами получен патент на многоэлектродную систему очистки воды.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением измерений на современном поверенном оборудовании при использовании проверенных ранее методик, анализом погрешностей измерений, согласием результатов, полученных различными методиками. Измерения многократно проводились на большом количестве экспериментальных образцов и показали хорошую воспроизводимость основных стадий развития разряда.

Основные материалы диссертации опубликованы в 26 печатных работах, из которых 10 - в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК и индексируемых в системах цитирования «Web of Science» и «Scopus», а также обсуждались на российских и международных конференциях. Статьи в полной мере отражают основное содержание диссертации.

Работа выполнена Пановым В.А. лично и с соавторами при решающем участии диссертанта.

Сделанные замечания не влияют на сделанные выводы и положения, выносимые на защиту, не умаляют ценность полученных результатов и не снижают общий уровень диссертации.

В целом диссертация Панова В.А. является законченным научным исследованием, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство.

Автореферат отражает содержание диссертации и даёт полное представление о ней. Диссертация «Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Панов Владислав Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Даю свое согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент

начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
д.ф.-м.н.  
профессор

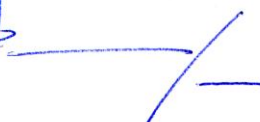


Ю.С. Акишев  
6 марта 2018г.

Подпись Ю.С. Акишева заверяю:

Ученый секретарь  
Акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации  
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (АО «ГНЦ РФ  
ТРИНИТИ»)

к.ф.-м.н.



А.А. Ежов