ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию СИТНИКОВА АНДРЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА на тему: «Экспериментальное описание высоковольтного токопрохождения в слабопроводящих жидкостях на основе динамических вольт-амперных характеристик», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — Электрофизика, электрофизические установки.

Жидкие диэлектрики представляют достаточно широкий класс веществ, отличающихся как химической природой и физическими свойствами, так и спецификой применения. К таким средам относятся насыщенные ароматические, хлорированные и фторированные углеводороды, ненасыщенные парафиновые и вазелиновые масла, триглицериды жирных кислот, кремнийорганические соединения (полиорганосилоксаны), сжиженные газы, деионизированная вода, расплавы некоторых халькогенидов и др. Жидкие диэлектрики применяются в электроизоляционной технике с 1875 года, когда компания General Electric впервые применила нефтяное масло в качестве изолирующей жидкости в трансформаторе. Спектр применения диэлектрических жидкостей достаточно широк. Они используются для повышения электрической прочности твердой пористой изоляции в конденсаторах и кабелях, для отвода тепла от обмоток трансформатора в системах охлаждения выпрямительных установок и турбогенераторов, для гашения электрической дуги в масляных выключателях и др.

В настоящее время достаточно хорошо изучены различные факторы, влияющие на электрическую проводимость жидких диэлектриков: диссоциация молекул и миграция ионов под действием поля, инжекция зарядов в сильных электрических полях, электрогидродинамический перенос заряда, наличие примесных частиц. Преимущественно ионный механизм электропроводности жидких диэлектриков, по словам Г.А. Остроумова, позволяет отнести эти системы не к диэлектрикам, а скорее к слабым электролитам. В настоящее время популярен термин слабопроводящие жидкости. Известен ряд крупных работ, посвященных вопросам электропроводности изолирующих жидкостей, таких авторов как: Г.И. Сканави, И. Адамчевский, Н. Фелиси, Г.А. Остроумов, Ю.К. Стишков, М.К. Болога, А.И. Жакин и других. Несмотря на то, что в научной литературе сформировалось устойчивое представление об основных

механизмах переноса заряда в жидких диэлектриках одним из важных направлений остается разработка надежных экспериментальных методов измерения электропроводности с учетом всех возможных факторов, на нее влияющих. Очевидно, что электрическая проводимость наряду с устойчивостью к пробою, диэлектрической проницаемостью и теплопроводностью является одной из наиболее важных характеристик изолирующих жидкостей. Поэтому создание усовершенствованных экспериментальных методов изучения особенностей протекания электрического тока, в т.ч. позволяющих выявить различные механизмы зарядообразования в таких системах – это важная задача электрофизики. В свете этого актуальность диссертационной работы Ситникова А.А. не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка используемых обозначений, а также библиографии из 110 наименований.

Во введении автор традиционно обосновывает актуальность темы исследований, формулирует цели и задачи, положения, выносимые на защиту, описывает научную новизну результатов работы, их теоретическую и практическую значимость, приводит сведения, подтверждающие достоверность результатов диссертации.

Первая глава диссертации представляет собой обзор современного состояния экспериментальных и теоретических исследований в области электропроводности жидких диэлектриков и электрогидродинамических процессов в них.

Во второй главе описаны методики экспериментальных исследований электропроводности слабопроводящих жидких диэлектриков, визуализации гидродинамических течений в изолирующих жидкостях и численного моделирования высоковольтного токопрохождения в различных условиях с использованием метода конечных элементов в COMSOL Multiphysics. Особого упоминания заслуживает разработанная автором методика динамической вольт-амперной характеристики (ДВАХ), которая лишена недостатков, присущих более традиционным методикам исследования (вольт-амперным и ампер-секундным характеристикам). В ДВАХ можно достаточно просто учесть многие факторы, которые осложняют проведение исследований электропроводности в жидких диэлектриках (влияние емкостных токов, наличие катафоретической проводимости, образования объемного заряда и др.). При этом важным достоинством ДВАХ является

простота их получения. Для создания экспериментальной установки требуется практически тот же набор приборов, что и для получения классических ВАХ. Автором разработано специальное программное обеспечение в среде Matlab, которое позволяет автоматизировать и существенно упростить получение и обработку экспериментальных данных.

Третья глава посвящена анализу факторов, влияющих на протекание электрического тока в слабопроводящих жидкостях в сильно неоднородных полях при постоянном и переменном напряжении на электродах. Сделан вывод о том, что в реальных жидкостях нельзя пренебрегать ни одним из механизмов зарядообразования, однако возможны случаи преобладания одного из них. Задача выделения вклада различных механизмов может быть решена из анализа особенностей динамических вольт-амперных характеристик.

В четвертой главе автор анализирует особенности применения метода динамических вольт-амперных характеристик для исследования проводимости жидких диэлектриков. Показано, что ДВАХ являются полноценной характеристикой высоковольтного токопрохождения и, кроме того, при очень больших временах модуляции напряжения (по сравнению с характерными временами релаксации системы) они совпадают с классическими ВАХ. Изучены условия возникновения гистерезиса в ДВАХ и оценена возможность применения этой методики для изучения сложных систем, в которых есть явно выраженное изменение свойств со временем, присутствуют механические загрязнения или оказывается значителен джоулев нагрев при приложении напряжения.

В пятой главе изложена методика восстановления функции инжекции заряда на основе данных динамических вольт-амперных характеристик. Методика сочетает эксперимент и моделирование и позволяет восстанавливать функцию инжекции и получать корректные распределения скорости с учетом данных о подвижности ионов.

В целом диссертация оставляет приятное впечатление. Результаты диссертации представляются новыми. В работе подробно описаны результаты измерений и проведено сравнение с данными численного моделирования. Результаты неоднократно докладывались на авторитетных научных конференциях в России и за рубежом и признаны в научном сообществе. Автором опубликовано по теме диссертации 6 статей в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Диссертация А.А. Ситникова выполнена на весьма высоком научном уровне, однако при её чтении возникает ряд вопросов и замечаний:

- Описание учета вклада емкостного тока при измерении динамической вольт-амперной характеристики дано весьма лаконично без использования математического аппарата, что не позволяет уяснить некоторые детали. Например, не разъяснена природа всплесков тока на рисунках 2.1.2 и 2.1.3. в момент времени около 3 с, а также отсутствие изменений в емкостном токе в момент изменения знака производной напряжения в момент времени около 8 с.
- При анализе ампер-секундной характеристики (рис. 3.1.4) автором обнаружен квазистационарный участок от 0,05 до 0,3 секунд, на котором величина ионного тока не меняется. Это подтверждается, по мнению автора, графиком на рис. 3.1.5 *b*, где для этого же интервала времени напряженность поля в межэлектродном промежутке меняется мало. Этот эффект может быть объяснен частичной экранировкой внешнего поля объемным зарядом, накапливающимся у острия. Однако на рис. 3.1.5 *a* можно увидеть, что за этот же интервал времени объемная плотность заряда возрастает примерно в 5 раз. Было бы интересно мнение автора о природе квазистационарного участка и его связи с ростом плотности объемного заряда.
- Несмотря на то, что графический материал диссертации выполнен достаточно качественно, некоторые затруднения вызывает разделение графиков, представляющих собой результаты эксперимента и кривые, полученные в ходе расчетов и моделирования. Так, например, такая неясность возникает в отношении рисунков 3.1.7, 3.1.11, 3.1.14, 3.3.1, 3.3.6, 4.1.1 и др. Если это экспериментальные данные, то для каких образцов и при каких условиях они получены? Если – результаты моделирования, то каковы основные расчетные параметры?

Некоторые замечания не снижают научной ценности результатов и носят в большей степени характер рекомендаций для дальнейшего развития научной работы в данном направлении. Результаты диссертационной работы являются достоверными и имеют высокую научную значимость.

Диссертация Ситникова Андрея Александровича на тему: «Экспериментальное описание высоковольтного токопрохождения в слабопроводящих жидкостях на основе динамических вольт-амперных характеристик» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых

степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Ситников Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — Электрофизика, электрофизические установки. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета –
профессор кафедры экспериментальной физики
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
доктор физико-математических наук, доцент

Ерин Константин Валерьевич

ПОДПИСЬ ПОДТВЕРЯЮ
Начальник Управления делами СКФУ
Логачева А. В.

23 ноября 2020 г.

355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
www.ncfu.ru, тел. (8652)33-02-81
e-mail: kerin@ncfu.ru