

ОТЗЫВ

председателя 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.

В диссертации Ситникова А.А. рассматривается метод динамических вольтамперных характеристик (ДВАХ), который позволяет охарактеризовывать высоковольтное токопрохождение в жидких диэлектриках. Суть метода заключается в измерении вольтамперной характеристики при подаче высокого напряжения в форме треугольного импульса, после чего проводится анализ особенностей получившейся зависимости или сравнение с результатами предыдущих измерений. В работе проводятся исследования воспроизводимости и информативности данного метода; совмещаются экспериментальное исследование и компьютерное моделирование. Основное внимание уделяется изучению токовых характеристик, но также исследуются и структуры электрогидродинамических течений в ряде систем электродов.

Охарактеризовать состояние жидкого диэлектрика проще всего по токовым характеристикам, чем каким-либо другим способом. Поэтому исследование особенностей методов измерения высоковольтной проводимости диэлектрических жидкостей, к которым относится и метод динамических вольтамперных характеристик, крайне актуально. Тема исследования значима, так как предложенный метод может применяться как для проведения исследований в области электрогидродинамики, так и для диагностики различных диэлектрических жидкостей, используемых в качестве изоляции в различных устройствах. Достоверность результатов обеспечивается использованием широко используемого программного обеспечения для проведения компьютерного моделирования и современного оборудования для экспериментальных исследований с автоматизированным процессом обработки данных. Представленные в тексте диссертации результаты и положения, выносимые на защиту, считаю в достаточной степени обоснованными.

Работа состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием методик экспериментального исследования и численного моделирования, трех глав с основными результатами, заключения, благодарности, перечня обозначений и списка используемой литературы, который содержит 110 источников.

В введении представлена необходимая информация о теме исследования, об актуальности, цели и задачах исследования, представлены положения, выносимые на защиту, указана их новизна, теоретическая и практическая значимости. Также здесь даны сведения об апробации результатов и о соавторстве.

В первой главе диссертации представлен обзор современного состояния исследований, касающихся высоковольтного токопрохождения в слабопроводящих жидкостях и электрогидродинамических течений. В обзоре отмечается необходимость учета движения среды при описании токопрохождения сквозь жидкие диэлектрики; освещаются проблемы, возникающие при экспериментальных исследованиях электрической

проводимости диэлектриков; рассматриваются методы исследования токовых характеристик. Отдельно рассматриваются работы, направленные на изучение феномена электрогидродинамических течений.

Во второй главе описываются используемые в работе методики экспериментального исследования и численного моделирования. Подробно описывается, как проводится измерение тока в системе, и каким образом ток, обусловленный движением свободных зарядов в жидкости, отделяется от емкостного тока. Описывается написанная автором программа в Matlab, которая позволяет быстро обрабатывать и визуализировать экспериментальные данные. Далее подробно описывается используемый метод регистрации поля скоростей электрогидродинамических течений, и приводятся примеры экспериментальных данных. Компьютерное моделирование производится в программе Comsol, где решается полная система уравнений электрогидродинамики, и, в зависимости от постановки задачи, учитывается как поверхностное зарядообразование (инжекция), так и объёмное (диссоциация, в том числе усиленная электрическим полем).

В третьей главе рассматривается токопрохождение сначала при постоянном напряжении, а затем и при модулированном напряжении. Исследование режима при постоянном напряжении при помощи компьютерного моделирования позволило выделить особенности ампер-секундных характеристик и полей скоростей в зависимости от механизма зарядообразования. Исследование режима при модулированном напряжении позволило выявить особенности динамической вольтамперной характеристики в зависимости от скорости модуляции напряжения и механизмов зарядообразования.

Также в данной главе отдельное внимание уделяется факторам, приводящим к невоспроизводимости или изменению высоковольтных токовых характеристик жидких диэлектриков: наличию механических загрязнений, изменению поверхности электрода и изменению химического состава исследуемой жидкости с течением времени, изменению температуры жидкости.

В чётвёртой главе рассматривается ряд особенностей ДВАХ.

Во-первых, описываются эффекты, которые могут привести к отсутствию воспроизводимости ДВАХ при повторном измерении: изменение температуры и испарение примеси, которая обеспечивает проводимость, накопление электрического заряда в объёме жидкости, налипание частиц на активный электрод. При этом описываются меры, при помощи которых во многих случаях можно добиться воспроизводимости данных.

Далее описывается одна из основных особенностей ДВАХ – гистерезис. Описываются физические причины его возникновения, и как он зависит от скорости модуляции напряжения. Также приводятся данные, согласно которым наличие гистерезиса характерно лишь для систем, где преобладает инжекционное зарядообразование.

Затем рассматриваются преимущества большой скорости модуляции напряжения (до десятков киловольт в секунду): измерение характеристик таким образом позволяет минимизировать эффекты накопления заряда в объеме и на стенках кюветы и нагрева жидкости вследствие джоулева тепловыделения. Кроме того, продемонстрировано, что при помощи динамических вольтамперных характеристик можно наблюдать процессы изменения проводимости одновременно во всём диапазоне напряжений на масштабах

времени от нескольких секунд, чего не удается достигнуть ни при помощи классической вольтамперной характеристики, ни при помощи ампер-секундной характеристики.

В пятом разделе описывается метод восстановления так называемой функции инжекции — зависимости плотности тока инжекции от напряженности электрического поля для данной системы электрод-жидкость. Суть методики заключается в итеративном подборе зависимости в виде простых функций с минимальным количеством коэффициентов, чтобы расчетная ДВАХ совпала с экспериментально измеренной.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, приведены направления дальнейших исследований.

К работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. В главе 3 показывается, каким образом особенностям на динамической вольтамперной характеристике соответствует катафоретическая проводимость. Помимо этого, говорится об эффекте, который приводит к схожему искажению ДВАХ — о прилипании частиц к высоковольтному электроду и усилении высоковольтного зарядообразования вследствие этого.

В четвертой же главе, при обсуждении рис.4.1.4, используется термин «катафоретическая проводимость», но из текста следует, что имеется в виду эффект прилипания частиц к электроду. В результате появляется путаница: есть два различных физических механизма, как частица может приводить к изменению регистрируемого тока, и непонятно, о каком идет речь.

2. В главе 5 при описании методики восстановления функции инжекции не описано, как именно определяются коэффициенты функции инжекции для следующей итерации. Если имеются экспериментальные данные и результаты моделирования для начального приближения, то каким образом вычисляются значения коэффициентов для следующей итерации? В частности, как были получены значения коэффициентов, представленные в таблице 1 в разделе 5.3.5?

Несмотря на отмеченные недостатки 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.

Председатель диссертационного совета
Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры оптики СПбГУ

Ключарев Андрей Николаевич

Дата 16.10.2020