

ОТЗЫВ

официального оппонента Ерина Константина Валерьевича на диссертацию
КУЗНЕЦОВОЙ ЮЛИИ АЛЕКСАНДРОВНЫ

**«Моделирование предпробивных процессов в полярных жидкостях с
помощью эффекта Керра»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.4.3 – Электроэнергетика

Исследование процессов развития электрического разряда в жидких диэлектриках представляет большой интерес не только ввиду широкого практического использования таких сред в различного рода электрических установках, но и представляет собой значительную фундаментальную проблему. Изучение механизмов проводимости, зарядообразования, а также предпробивных состояний в жидких диэлектриках тесно связаны с вопросом о распределении электрического поля в межэлектродном промежутке. Оптические методы измерения электрических полей, основанные на эффекте Керра, сравнительно просты и, что немаловажно, дешевы. Для исследования напряженности электрических полей эффект Керра применяется с 30-х годов XX века. Существенным преимуществом эффекта Керра перед другими методами исследования электрофизических процессов в жидкостях под действием электрического поля является его экстремально малая инерционность. Как известно, в нитробензоле время релаксации эффекта Керра составляет около 10^{-12} с. Это позволяет использовать эффект Керра для изучения быстропротекающих процессов в жидкостях, в том числе развития пробоя диэлектрика и его особенностей при воздействии ультракоротких импульсов высокого напряжения.

С учетом этого заявленную автором цель диссертационной работы, состоящую в моделировании предпробивных процессов и разработке методов оценки предпробивных электрических полей в полярных жидкостях, следует признать актуальной.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в рецензируемой диссертации, обоснованы результатами комплекса проведенных автором экспериментальных и теоретических исследований, не противоречат

известным фактам и теоретическим представлениям об электрооптических эффектах и электрофизических процессах в жидкостях. Выносимые на защиту положения обладают необходимой научной новизной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений.

Во введении автор традиционно обосновывает актуальность темы, формулирует цели и задачи работы, обозначает метод исследования, излагает сведения о научной новизне и практической значимости, приводит основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы, включающий анализ проблем интерпретации электрооптических измерений, а также физических и химических факторов, влияющих на электрическую прочность полярных. Автором обзор литературных данных структурирован на 4 раздела, описывающих современное состояние проблем оптических методов исследования в высоковольтном эксперименте; методов и алгоритмов расшифровки керрограмм, а также физических механизмов развития электрического пробоя в жидкостях за счет формирования объёмного заряда, роста микропузырьков, развития анодных и катодных стримеров.

На основе анализа литературы автором сделаны выводы, позволившие сформулировать задачи исследования.

Во второй главе автор представляет обоснование методики расчёта и визуализации электрических полей с помощью эффекта Керра. Автором на основе экспериментальных данных построены 3D модели измерительных ячеек и воспроизведены все геометрические, электрические и оптические параметры реальных экспериментов. Для учета условий реального эксперимента предусмотрена возможность введения в рассматриваемый объем диэлектрических и ионизированных пузырьков, возникновения объёмного заряда и различных моделей стримера. На основе анализа результатов компьютерного моделирования автором показана возможность учета только проекции вектора напряженности E на ось, что значительно упрощает расчеты в системе электродов сложной конфигурации. Разработанная методика имеет значительно более широкие возможности для интерпретации результатов

экспериментальных исследований и получения большего объема информации по сравнению с традиционными методами обработки керрограмм.

В третьей главе автором проведен анализ факторов, влияющих на экспериментальные керрограммы, а также характеризующих предпробойные состояния в диэлектрических жидкостях. Показано, что расчетные керрограммы лучше совпадают с экспериментальными при скорректированной постоянной Керра, величина которой незначительно меняется с увеличением расстояния от острия. Проведённые исследования позволили подтвердить по керрограммам наличие приэлектродного объёмного заряда и определить его величину. Продемонстрированы возможные искажения поля в присутствии вблизи электрода диэлектрического и ионизированного газового микропузырька. Автор показывает, что именно кавитационные процессы, возникающие при быстром нарастании поля, способствуют возникновению микропузырьков, снижающих электрическую прочность полярных жидких диэлектриков.

Четвертая глава диссертации посвящена электрооптическим исследованиям быстропротекающих процессов при развитии электрического пробоя в жидкостях. Показано, что при анализе полей стримеров в полярных жидкостях необходимо учитывать нелинейность зависимости поляризации от напряженности поля. На основе анализа электрооптических хронограмм продемонстрировано значительное различие напряженностей полей в анодном и катодном стримерах в воде. Анодный стример характеризуется гораздо большей напряженностью поля на его фронте, величина которой соответствует области нелинейности поляризации. Напряжённость поля катодного стримера в воде намного меньше и лежит в области значений 2-3 МВ/см, нелинейность поляризации при этом не играет значительной роли.

В целом, диссертация оставляет впечатление качественной научной работы. В ней подробно описаны используемые установки, приборы и методы, а также детально описываются полученные результаты. Каждая глава начинается заканчивается выводами, что значительно упрощает ознакомление с работой. Графический и иллюстративный материал работы качественный. Результаты диссертации представляются новыми и достоверными.

Автором получены новые важные результаты в части экспериментального исследования и моделирования электрооптических эффектов в диэлектрических жидкостях в сильных электрических полях. Разработан новый метод моделирования и визуализации расчётных керрограмм, который позволяет исследовать комплекс параметров, определяющих диэлектрическую прочность жидких сред, в том числе приэлектродный объёмный заряд, наличие пузырьков, развитие ионизационных процессов. Показано, что при анализе предпробивных полей в полярных жидкостях в сильных неоднородных полях необходим учёт нелинейности зависимости поляризации от напряженности поля. Определены по данным электрооптических экспериментов характерные напряженности поля вблизи головки анодного и катодного стримеров.

Практическая значимость результатов заключается в разработке новых оптических методов мониторинга электрофизических процессов, которые могут быть использованы при проектировании мощных высоковольтных импульсных ёмкостных накопителей энергии. Предложенный автором метод обработки оптической информации путём составления и расчёта матриц может найти широкое применение в различных областях, имеющих отношение к автоматизированной обработке изображений.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на авторитетных научных конференциях в России и признаны в научном сообществе. Автором опубликовано по теме диссертации 13 работ, в том числе 5 статей в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, а также входящих в перечень ВАК Минобрнауки России. Автореферат в полной мере передает содержание диссертационной работы.

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

1. Не вполне ясен выбор автором конфигураций электродов в измерительной ячейке. При исследовании факторов, влияющих на экспериментальные керрограммы используется ячейка типа «острие плоскость». Однако при моделировании (стр. 54) радиус острия принимается равным 30 мкм, а на экспериментальных и обработанных по авторской методике керрограммах (рис. 2.12, 3.2, 3.8, 3.12, 3.17 и др.) показаны результаты для гораздо большего радиуса 300 мкм. Было бы разумно провести моделирование для разных радиусов острия вплоть до

значений, соответствующих эксперименту. Также не приводятся керрограммы для «классической» плоскопараллельной конфигурации электродов, что могло бы подтвердить корректность используемых автором приближений.

2. Автор использует методы численного моделирования для исследования профиля электрического поля в аксиально симметричной системе электродов и влияния распределения поля на керрограммы и интенсивность прошедшего света. При этом автором не обсуждаются основанные на преобразованиях Абеля аналитические методы, предложенные для решения подобной задачи в работе *Shimizu R. Matsuoka M., Kato K., Hayakawa N., Hikita M., Okubo H. Development of Kerr Electro-optic 3-D Electric Field Measuring Technique and its Experimental Verification // IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 1996. V. 3. P. 191-196.*
3. На стр. 65-69 автор определяет поправку в постоянную Керра для наилучшего согласования экспериментальных и расчетных керрограмм. На мой взгляд, физический смысл этой поправки не раскрыт в достаточной мере. Для понимания смысла поправки автор на стр. 66 анализирует различные температурные зависимости постоянной Керра для полярных и неполярных жидкостей, но на стр. 69 неожиданно делает вывод о том, что поправка может быть связана с неточностью формы электрода и граничными условиями. Непонятно, как постоянная Керра может быть связана с формой электродов, и о каких граничных условиях идет речь?

Несмотря на высказанные замечания, считаю необходимым выразить мнение о том, что:

– диссертационная работа Кузнецовой Юлии Александровны «Моделирование предпробивных процессов в полярных жидкостях с помощью эффекта Керра» содержит решение научной задачи, имеющей важное значение для развития оптических методов исследования предпробивных состояний в электроустановках высокого напряжения;

– диссертация по актуальности выбранной темы, уровню проведенных исследований, научной и практической значимости, а также степени обоснованности результатов полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в ред. от 01.01.2025 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и соответствует специальности 2.4.3 – Электроэнергетика;

– автор достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Я, К.В. Ерин, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

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

Ерин Константин Валерьевич

14 апреля 2025 г.

355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
www.ncfu.ru, тел. (8652)95-68-00 доб. 4914
e-mail: exiton@inbox.ru

Свое согласие 23.04.2025г. *Осипов А.А.*
С отрисовкой ознакомился 23.04.2025г. *Кузнецов Ю.А.*