

На правах рукописи



Кузнецова Юлия Александровна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПРОБИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНЫХ
ЖИДКОСТЯХ С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА КЕРРА

Специальность 2.4.3 «Электроэнергетика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Новосибирск — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Коробейников Сергей Миронович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ерин Константин Валерьевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра экспериментальной физики, профессор;

Дрожжин Алексей Петрович
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева» Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория динамики гетерогенных систем, научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Защита диссертации состоится: «22» мая 2025 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» марта 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. тех. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Интенсивное использование жидких диэлектриков в электроэнергетике, высокая стоимость высоковольтной аппаратуры и её ремонта, требуют всестороннего изучения процессов, протекающих в них при воздействии высокого напряжения. Целью таких исследований является повышение надёжности работы и предотвращение перерывов в электроснабжении важных объектов.

Постоянно растущее потребление энергии в мире требует поиска новых источников, самым перспективным и энергоёмким из которых является использование термоядерных реакций. Будущее использование управляемого термоядерного синтеза требуют решения ряда сложных научно-технических проблем, создания и освоения выпуска электрокомплексов на новых физических принципах.

В последние годы в Китае, России, США, Франции и ряде других стран ведутся интенсивные исследования по созданию генерирующих мощностей на основе инерциального термоядерного синтеза, при котором термоядерное топливо удерживается собственными силами инерции. В проектах, посвященных этой проблеме, необходимо импульсным образом нагреть оболочку, внутри которой находится дейтерий-тритиевая смесь, до нескольких миллионов градусов.

Все варианты импульсного нагрева основаны на быстром вводе энергии в мишень. Это достигается использованием множества лазерных пучков наносекундной длительности, сверхсильных импульсных магнитных полей, рентгеновских импульсов, устройств Z-pinch. Суммарная энергия в электрическом импульсе составляет десятки МДж. Подобные установки — это большие электрофизические и электроэнергетические системы, занимающие внушительные площади.

Для генерации импульсов огромной мощности нужны соответствующие импульсные накопители электроэнергии. Исследования, проведённые в мире, показали, что лучше всего для этих целей подходят ёмкостные накопители на воде. Эти накопители работают при напряжении от сотен киловольт и до примерно 10 МВ. Несмотря на многолетние исследования процессов, протекающих в воде в сильных электрических полях, существует ещё немало вопросов, требующих неотложного решения. Возникновение нежелательного пробоя в ёмкостном водяном накопителе может привести к выходу его из строя, что делает невозможной работу всего генерирующего комплекса. Выяснение возможности повышения импульсной электрической прочности накопителей невозможно без выяснения предпробивных процессов, происходящих в сильных электрических полях.

Предпробивные явления в жидкостях изучаются в течение нескольких десятилетий с целью определения задействованных физических механизмов, их моделирования, получения данных для проектирования высоковольтной изоляции, а также разработки и испытаний новых изоляционных материалов.

Наблюдение за распространением быстропротекающих процессов, предшествующих непосредственно пробой в жидкостях стало возможным благодаря развитию быстродействующих оптических методов, позволяющих выявлять эти процессы с помощью электрооптических, шлирен и теневых методов исследований.

Наиболее информативным методом исследования предпробивных процессов является использование эффекта Керра. Этот метод позволяет не только увидеть оптическую картину процессов, но и получить информацию об электрических полях, которую можно оценить и интерпретировать. Более того, с ростом напряжённости поля, вследствие нелинейности эффекта Керра, в электрооптической картине появляются дополнительные особенности, позволяющие заметить характерные процессы, предшествующие пробой.

Современные экспериментальные методы и развитие компьютерного моделирования позволяют найти ряд ответов на вопросы формирования предпробивных процессов в водяных ёмкостных накопителях энергии. Проведение подобных исследований способствует дальнейшему успешному развитию перспективного направления энергетики будущего.

Кроме того, существуют технологии для использования вторичных эффектов, вызванных разрядами в воде (генерация УФ-излучения, ударных волн, химически активных частиц), для использования различных процессов, таких как дезактивация химических загрязнений, уничтожение вредоносных живых организмов), обработка растительных продуктов, микроэрозия металлов и др.

Приведённые доводы указывают на наличие проблемных ситуаций. Поэтому проведение исследований, направленных на совершенствование методов изучения предпробивных электрических полей в жидкостях является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

Изучением предпробивных процессов с применением эффекта Керра занимались: С.М. Коробейников (НГТУ), К.В. Яншин, Э.В. Яншин И.Т. Овчинников (СибНИИЭ), А. В. Мелехов (ИЛФ СО РАН), Н.М. Hertz (Швеция), Н. Aben, Хуеуей Zhang (КНР), М. Zahn (USA), Т. Takada (Japan).

Исследованиями импульсного пробоя жидкостей занимались В.Я. Ушаков, В.В. Лопатин (ТПУ), В.С. Комельков (АО «Энергетический Институт им. Г. М. Кржижановского»), Торшин Ю.В. (ВЭИ), К. Takechi, К. Arii, S. Udo, Н. Ithori (Япония), Н. Cha, М. Hertz (Швеция), Е. Watson, М. Forster, Р. Wong (США).

Электрофизические и электрогидродинамические процессы в сильных полях рассматривали: во Франции - N. Felici, R. Tobazeon, J. P. Gosse, A. Denat, P. Atten, O. Lesaint, H. Romat, Touchard Gérard; в США - J. Seyed-Yagoobi, P.K. Watson, E. Forster, M. Zanh; в России — Г.А. Остроумов, Ю.К. Стишков, В.А. Чирков и А.И. Жакин, А.Л. Куперштох (ИГИЛ СО РАН).

Механизм образования пузырьков Н.Аkiyama (Япония) Р. Сeccato (Франция), А. Hamdan. and M.S. Cha (King Abdullah University of Science and

Technology, KAUST), K. Tachibana, Y. Takekata, Y. Mizumoto, H. Motomura, M. Jinno (Япония).

Наносекундный и субнаносекундный пробой в жидких диэлектриках D. Dobrynin, Y. Seepersad, M. Pekker, M. Shneider, G. Friedman, A. Fridman, (США).

Работы по численному моделированию процессов, происходящих в пузырьках, проводились в России: Г.В. Найдис, Н.Ю. Бабаева, Б.М. Смирнов, Е.Е. Сон (ИВТАН), А.Л. Куперштох (ИГИЛ СО РАН) и за рубежом А. Veroual (Франция), O. Lesaint, R. Kattan, A. Denat (Франция) и др.

Цель исследований заключается в моделировании предпробивных процессов и разработке методов оценки предпробивных электрических полей в полярных жидкостях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) Разработан алгоритм компьютерного моделирования экспериментальных керрограмм с визуализацией результатов расчётов.

2) Проведено моделирование и рассчитано распределение поля в случае возникновения неоднородностей (пузырьки, ионизованные области, инжектированные заряды).

3) Определена напряжённость поля возникновения анодного стримера с учётом нелинейности поляризации.

4) Определена напряжённость поля катодного стримера.

Объектом исследования являются предпробивные процессы в сильных электрических полях в воде и нитробензоле в микросекундном и наносекундном диапазонах.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.4.3 «Электроэнергетика», а именно: п.1 — Исследование физических закономерностей и разработка методов расчёта электрических разрядов в условиях, характерных для электроустановок высокого напряжения (молнии и другие возмущающие воздействия) и п.3. — Разработка методов расчёта электрических и магнитных полей, исследование закономерностей воздействия сильных электрических и магнитных полей на диспергированные и другие материалы и изделия.

Методология и методы исследования. Автором был разработан метод моделирования и визуализации электрических полей при исследованиях с помощью эффекта Керра. Разработка основана на оригинальной программе, позволяющей восстанавливать керрограммы по матрице значений относительных интенсивностей в градациях серого. Особенности предпробивных процессов выяснялись путём сравнения экспериментальных и расчётных керрограмм. Их совпадение позволило идентифицировать такие процессы, как инжекция носителей заряда, ионизация пузырьков, значения напряжённости поля вблизи стримеров.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) впервые показана необходимость учёта нелинейности диэлектрической проницаемости при анализе предпробивных электрических полей в полярных жидких диэлектриках.
- 2) впервые, на основе математического моделирования, установлено, что при учёте нелинейности диэлектрической проницаемости воды напряжённость электрического поля появления анодного стримера составляет $40 \div 50$ МВ/см.
- 3) впервые показано, что напряжённость электрического поля катодного стримера в воде лежит в пределах $2,2 \div 3,1$ МВ/см, нелинейность поляризации существенного вклада не вносит.
- 4) разработан метод расчёта электрических полей на предпробивной стадии электрического пробоя жидкостей с использованием эффекта Керра, основанный на воспроизведении в модели геометрических, физических и электрических параметров конкретной измерительной ячейки, построении картины поля и матрицы относительных интенсивностей по всему полю измерения, визуализации расчётной керрограммы, корректировки исходных данных модели путём сравнения полученной и экспериментальной керрограмм, определении напряжённостей поля по всей области измерения. Этот метод позволяет определять объёмный заряд, наличие пузырьков, выявлять предразрядные процессы.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии изучения предразрядных процессов на основе анализа керрограмм с учётом нелинейности диэлектрической проницаемости.

Практическая ценность работы. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы при проектировании мощных высоковольтных импульсных ёмкостных накопителей энергии. Предложенный метод обработки оптической информации путём составления и расчёта матриц может найти применение в различных областях.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработанная методика и программа обработки и визуализации расчётных керрограмм позволяет определять объёмный заряд, наличие пузырьков, ионизационные процессы;
- 2) В сильных неоднородных полях необходим учёт нелинейности диэлектрической проницаемости при анализе предпробивных полей в полярных жидкостях.
- 3) Катодный стример имеет высокую электропроводность, достаточную для усиления поля вблизи головки стримера до значения 3 МВ/см.

Личный вклад автора

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах составляет 60 % и состоит в разработке и реализации алгоритма восстановления

керрограмм, а также в построении математических моделей, расчётах и анализе керрограмм.

Постановка цели работы и задач выполнены совместно с научным руководителем Коробейниковым С.М. Разработка математической модели выполнена совместно с Ясинским В.Б. и Вагиным Д.В. Программа «Визуализация электрооптических расчётов аксиальных объектов» была разработана совместно с Ясинским В.Б. и Ковалёвым И.А.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на 7 научных мероприятиях, в том числе на: XII Всероссийской научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (СПЭФГД-2019), г. Санкт-Петербург, 2019; XI International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD 2019), Saint Petersburg, Russia, 2019; Международной научно-практической конференции «Университет ШОС: глобальные вызовы и возможности устойчивого развития до 2030 года», г. Новосибирск, 2020; Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства — основа реализации Плана нации, г. Караганда, РК, 2020, 2021 гг., Международной научно-практической онлайн конференции «Формирование интеллектуального капитала в условиях цифровой трансформации: опыт, вызовы, перспективы» г. Караганда, РК, 2022 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано всего 13 печатных научных работ, 2 статьи в журнале, входящем в перечень ВАК по специальности 2.4.3 «Электроэнергетика», 3 статьи, индексируемые в WoS / Scopus (их них одна статья опубликована в журнале IEEE Transactions on Plasma Science (Q2), две статьи опубликованы в журнале «Journal of Electrostatics» (Q2)), 7 — в сборниках трудов конференций. Получено свидетельство об охране интеллектуальной собственности на программу для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 131 наименования и трёх приложений. Общий объём работы составляет 134 страницы, включая 75 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, обозначен метод исследования, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой обзорной главе произведён анализ негативных факторов, влияющих на электрическую прочность полярных жидкостей и проблем,

связанных с получением информации из электрооптических измерений. Для более глубокого понимания поставленных вопросов и определения уровня исследований, проводимых различными группами ученых, были проанализированы результаты, опубликованные в ведущих международных научных журналах и книгах.

Обзор литературных данных содержит 4 основные части:

- оптические методы исследования в высоковольтном эксперименте;
- определение и роль микропузырьков и объёмного заряда в формировании пробоя жидкостей;
- исследования анодных и катодных стримеров;
- методы и алгоритмы расшифровки керрограмм.

Во **второй** главе приведено обоснование методики расчёта и визуализации электрических полей с помощью эффекта Керра, а также выбраны основные зависимости (1) и (2) для дальнейшей реализации исследований:

$$\Delta\Phi(x, y, t) = 2\pi \cdot B \cdot \int E^2(x, y, t) dx \quad (1)$$

$$\frac{I(x, y, t)}{I_0} = \sin^2 \left(\pi \cdot B \cdot \int E^2(x, y, t) dx \right) \quad (2)$$

где $\Delta\Phi$ — разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами; $I(x, y, t)/I_0$ — отношение интенсивностей падающего и прошедшего ячейку лучей в соответствии с законом Малюса.

По имеющимся данным об условиях проводимых экспериментов были построены 3D модели измерительных ячеек и воспроизведены все геометрические, электрические и физические параметры реальных экспериментов. Для рассмотрения различных процессов, возникающих в приэлектродной зоне, в неё вводились воздушные и ионизированные пузырьки, объёмный заряд, модели стримеров. Геометрические, оптические и физические параметры, законы изменения прикладываемых напряжений, род жидкости и пространственное разрешение были также продиктованы условиями реального эксперимента.

Так, при расчётах в электродной системе остриё-плоскость прилегающая к острию зона послойно сканировалась в плоскости XOY вдоль оси Y с заданным шагом по оси X. Затем плоскость сканирования смещалась по оси симметрии ячейки Z, и сканировался следующий слой (Рисунок 1).

В случае исследования хронограмм сканирование осуществлялось по одному направлению Y со сдвигом вдоль оси симметрии Z.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что исходя из расчёта результирующей разности фаз $\Delta\Phi$ и поворота вектора E , с достаточной степенью точности можно не учитывать поворот вектора напряжённости относительно оси симметрии в приострийной зоне и считать $E \approx E_z$, то есть и окончательные расчёты проводить по формулам (1) и (2), где под E подразумевается E_z , здесь E_z — проекция вектора E на направление приложенного к измерительной ячейке поля (перпендикулярно направлению

зондирующего излучения, см. Рисунок 1). Тем самым было зафиксировано направление оптической оси.

В главе описана методика визуализации керрограмм с различным разрешением и сравнение их с керрограммами, полученными экспериментально. При помощи аналогичной методики визуализации фазограмм и хронограмм было получено распределение электрического поля в приэлектродном промежутке и дана оценка процессам, возникающим во время эксперимента.

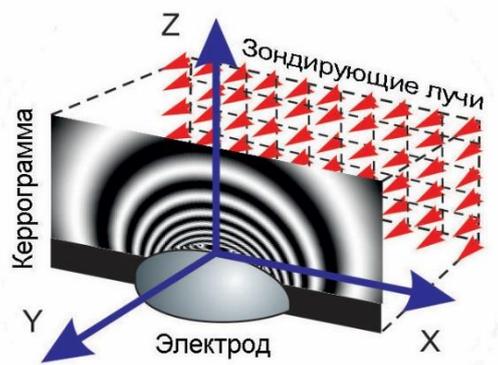


Рисунок 1 — Схема моделирования приэлектродной зоны

Ввиду аксиальной симметрии расчёты проводились только для одной из половин исследуемой области с некоторым шагом, значение которого выбиралось в зависимости от поставленной задачи и менялось от 2,5 до 10 мкм по обеим осям — X и Z. Полученные по каждому выделенному направлению значения относительных интенсивностей $I(x, z)/I_0$, сводились в двумерную матрицу $\|z, x\|$ (Рисунок 2).

Z \ X	0,110	0,105	0,100	0,095	0,090	0,085	0,080	0,075	0,070	0,065	0,060	0,055	0,050
0,000	0,97	0,96	0,66	0,28	0,03	0,04	0,31	0,68	0,96	0,96	0,67	0,27	0,01
0,005	0,97	0,96	0,67	0,28	0,03	0,04	0,30	0,68	0,96	0,96	0,69	0,28	0,01
0,010	0,96	0,97	0,68	0,30	0,04	0,03	0,28	0,67	0,95	0,97	0,71	0,29	0,02
0,015	0,95	0,97	0,70	0,31	0,05	0,02	0,26	0,64	0,94	0,98	0,73	0,33	0,03
0,020	0,94	0,98	0,73	0,34	0,07	0,01	0,23	0,61	0,92	0,99	0,77	0,38	0,05
0,025	0,92	0,99	0,77	0,38	0,08	0,00	0,19	0,56	0,89	1,00	0,81	0,44	0,08
0,030	0,90	1,00	0,81	0,43	0,11	0,00	0,14	0,49	0,84	1,00	0,86	0,51	0,13
0,035	0,86	1,00	0,85	0,48	0,15	0,00	0,11	0,41	0,79	0,99	0,91	0,58	0,19
0,040	0,82	1,00	0,90	0,56	0,21	0,01	0,07	0,34	0,71	0,97	0,95	0,67	0,27
0,045	0,77	0,98	0,94	0,63	0,28	0,03	0,04	0,28	0,63	0,94	0,98	0,75	0,39
0,050	0,70	0,96	0,97	0,71	0,35	0,07	0,01	0,20	0,54	0,87	1,00	0,85	0,51

Рисунок 2 — Фрагмент матрицы $\|z, x\|$

По этой матрице с помощью специально разработанной программы осуществлялась визуализация рассчитанной методом конечных элементов керрограммы.

Возможность произвольного изменения шага расчётов позволило более детально просматривать интересующую область (Рисунок 3).



Рисунок 3 — Шаг расчётов в выделенной области 2,5 мкм, в остальной части визуализированной керрограммы шаг 5 мкм.

В отличие от сбора данных с экспериментальной керрограммы, смоделированная керрограмма позволяет получить больше информации. Так, разность фаз $\Delta\Phi/\pi$ между обыкновенным и необыкновенным лучами при расчётах и позволяет получить распределение разности фаз по полю наблюдения, которое тоже можно визуализировать.

Применяемая методика компьютерного моделирования позволила не только объяснить результаты экспериментальных исследований, но и получить более обширную информацию по сравнению с традиционными методами обработки керрограмм.

В **третьей главе** при исследовании описанных процессов в нитробензоле было установлено, что на предпробивных этапах лучшее совпадение экспериментальной и расчётной керрограмм удалось получить при скорректированном значении постоянной Керра (Рисунок 4).

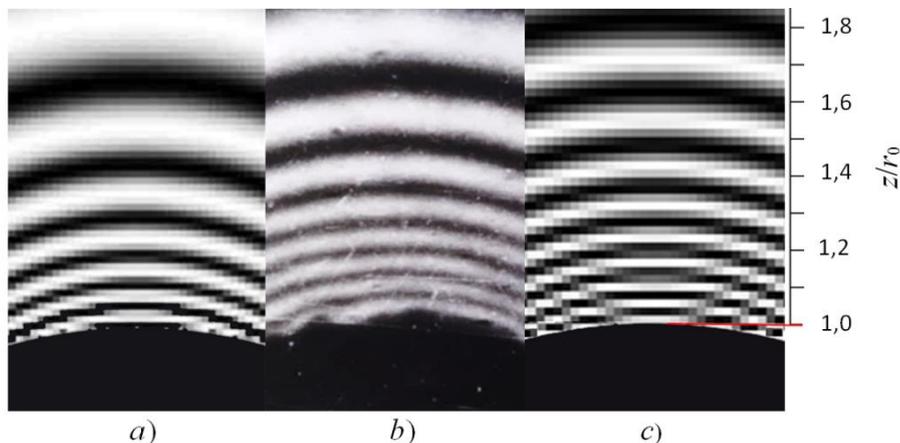
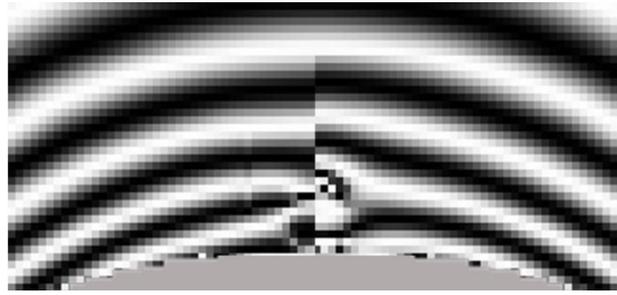


Рисунок 4 — Керрограммы: *a)* расчётная при $B = 3,0 \times 10^{-12}$ м/В²; *b)* экспериментальная; *c)* расчётная, уточнённая

Стоит отметить, что вышеприведенные рассуждения и оценки не оказывают значительного влияния на расчетные значения напряженности поля у электрода, т.к. возможная вариация постоянной Керра не превышает 3%. Более того, такая небольшая ошибка может возникнуть из-за неточности формы электрода и граничных условий.

Проведённое исследование посредством компьютерного моделирования позволило не только зафиксировать условия ионизации воздушного пузырька, но и чётко проследить закон изменения разности фаз. Тем самым по анализу

керрограммы определить точные границы и размеры пузырька до и после ионизации (Рисунки 5, 6).



a) b)

Рисунок 5 — Керрограммы. Напряжение 120 кВ, радиус кривизны острия 300 мкм. a) диэлектрический пузырёк, b) ионизированный пузырёк

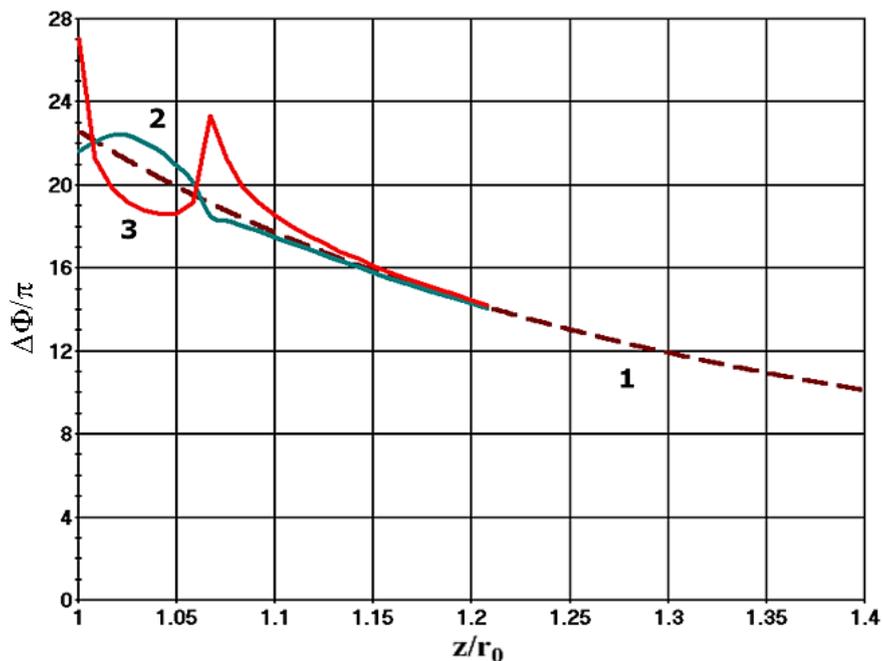


Рисунок 6 — Разности фаз $\Delta\Phi/\pi$: 1 — невозмущённый промежуток; 2 — с диэлектрическим пузырьком; 3 — с ионизированным пузырьком (z — расстояние от острия, r_0 — радиус закругления острия)

Кинограмма, полученная для набора напряжений на ячейке, позволила определить момент ионизации пузырька (Рисунок 7).



Рисунок 7 — Момент ионизации пузырька на расчетной керрограмме

В условиях анализируемого эксперимента ионизация наступает при 140 кВ, что подтверждается разрывом керровской полосы (Рисунок 7). Это значение совпадает с полученным по хронограмме, снятой в аналогичных условиях.

При помещении в анализируемую модель эксперимента объёмного заряда у острия по кинограмме (Рисунок 8) для набора его величин при сопоставлении расчётной и экспериментальной керрограмм удалось определить величину заряда.

Несмотря на некоторое различие, наиболее близкой по внешнему виду к экспериментальной керрограмме оказалась расчётная керрограмма, соответствующая $\rho = 200 \text{ Кл/м}^3$.

Снижение или увеличение величины объёмной плотности заряда от 200 Кл/м^3 приводит к расчётным керрограммам (Рисунок 7), которые коренным образом отличаются от экспериментальной керрограммы, показанной на Рисунке 8.

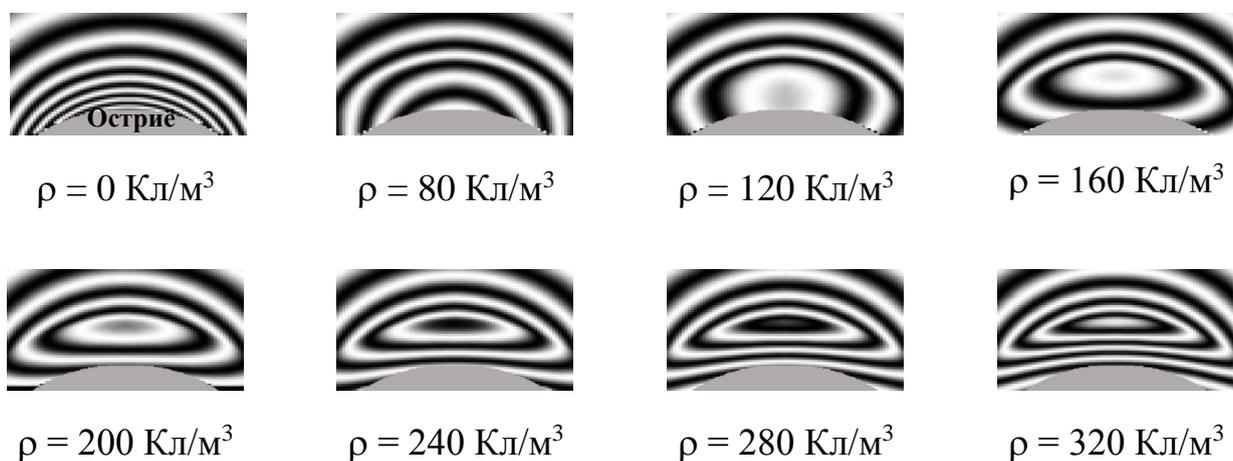


Рисунок 8 — Расчётные керрограммы. Кинограмма для набора однородных зарядов с разной объёмной плотностью ρ

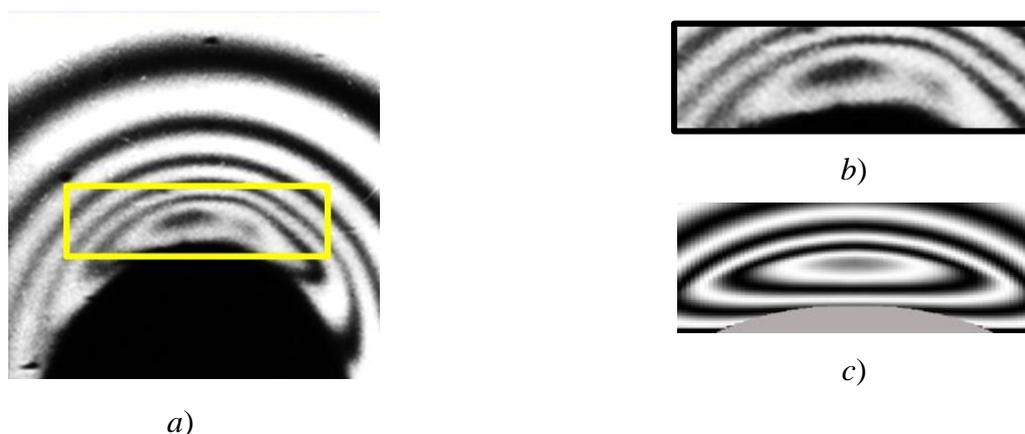


Рисунок 9 — Сравнение фрагментов экспериментальной *a* — экспериментальная керрограмма; *b* — выделенный фрагмент; *c* — расчётная керрограмма

По кинограмме рассчитаны и значения растягивающих напряжений, возникающих при появлении объёмного заряда у острия. Это позволяет утверждать, что именно кавитационные процессы способствуют возникновению микропузырьков, снижающих электрическую прочность полярных жидких диэлектриков.

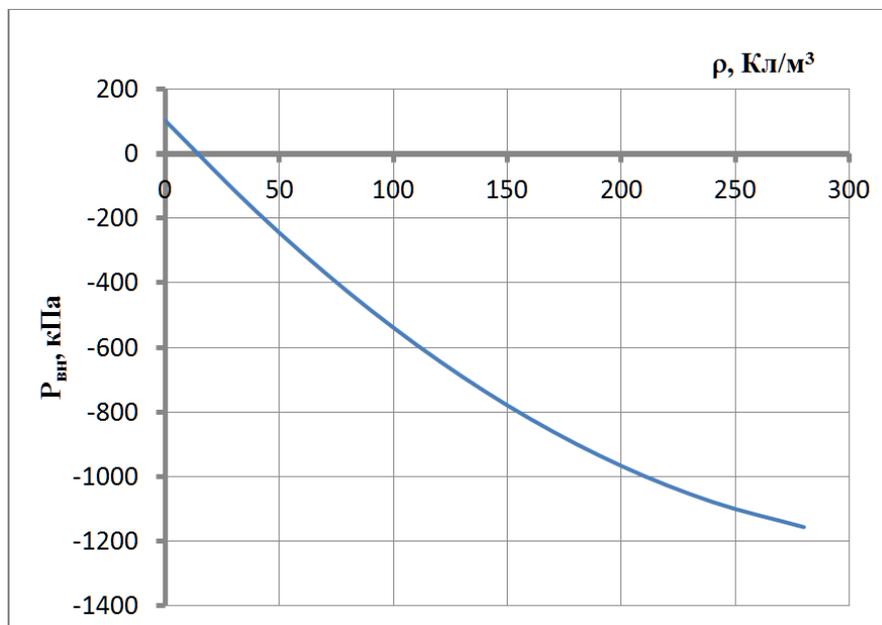


Рисунок 10 — Зависимость интегрального внутреннего давления

$P_{вн} = p_0 - \rho \int_{z_1}^{z_2} E_{\perp}(z) dz$ от значения гомогенного заряда в области 0,0-0,1 мм от острия. Напряжение 120 кВ. Внешнее (атмосферное) давление $p_0 = 101,3$ кПа

В **четвертой** главе приведены результаты компьютерного моделирования электрооптической регистрации электрофизических процессов в воде при воздействии импульсов субмикросекундного диапазона.

Глава разделена на две основные части.

В **первой** части моделировалась хронографическая керрограмма и рассматривалось распределение напряжённости электрического поля и разности фаз предпробивного состояния в системе острие-плоскость без анодного стримера и при его наличии.

Для этого была построена компьютерная 3D-модель измерительной ячейки. Далее в результате совмещения экспериментальной хронограммы и связанной с ней осциллограммы был получен набор пар напряжение-момент времени, представленных в таблице 1, по которым и проводились расчёты.

На хронограмме керровская полоса появлялась на расстоянии 100 мкм от острия. Именно это расстояние и было принято за начальный размер стримера. Оно соответствует моменту времени 7,2 нс и напряжению 145 кВ. Далее по хронограмме и осциллограмме определялись другие точки для расчётов. Скорость движения стримера получилась $0,5 \cdot 10^7$ м/с.

Таблица 1 - Пары данных, полученные при совмещении осциллограммы напряжения и хронограммы

t, нс	2,0	2,5	3,0	3,3	3,8	4,2	4,5	4,9	5,2	5,5
U, кВ	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
t, нс	5,9	6,3	6,9	7,2	8,7	10,1	11,4	12,9	14,2	15,0
U, кВ	120	130	140	145	154	157	156	153	150	148
Длина стримера, мкм				100	200	300	400	500	600	650

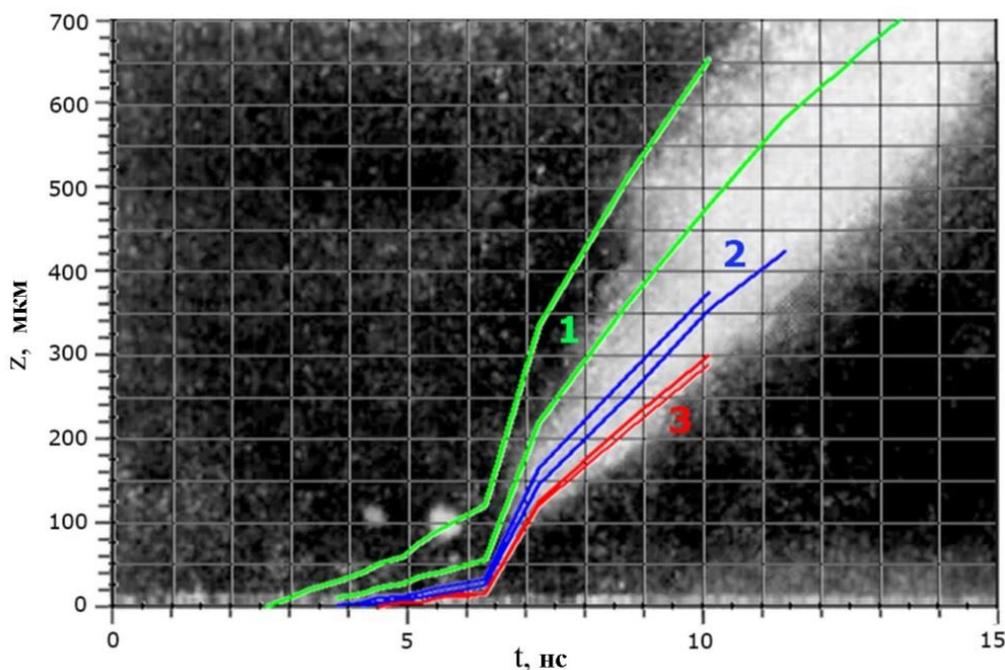


Рисунок 11 — Расчётные линии постоянной разности фаз $\Delta\Phi/\pi$, наложенные на экспериментальную хронограмму (Рис. 2). Линии соответствуют светлым полосам: 1-я полоса (зелёная) — $0,3\pi - 0,7\pi$; 2-я полоса (синяя) — $1,3\pi - 1,7\pi$; 3-я полоса (красная) — $2,3\pi - 2,5\pi$

Для каждой из точек Таблицы 1 была рассчитана одномерная керрограмма по методике, описанной в главе 2. Расстановка полученного набора керрограмм позволила воспроизвести внешний вид экспериментальной керрограммы, показанный на Рисунке 11.

Визуализированная керрограмма позволила определить качественную картину, но получить количественную информацию было затруднительно. Поэтому по формуле (1) в рамках предложенной математической модели по всем определённым реперным точкам был рассчитан сдвиг фаз и значения напряжённости электрического поля.

На Рисунке 11 линии равного сдвига фазы $\Delta\Phi/\pi$ наложены на экспериментальную хронограмму.

По экспериментальной хронограмме видно, что до седьмой наносекунды в зоне без стримера никаких полос нет, а расчёт показывает их наличие. Наблюдается значительное несоответствие эксперимента и моделирования. Наши расчёты проводились в предположении, что относительная

диэлектрическая проницаемость ε в воде в условиях эксперимента не меняется и всегда равна 80. Поэтому было предположено, что учёт возможной зависимости ε от напряжённости поля может повлиять на вид расчётной хронограммы.

В системе остриё-плоскость электрическое поле особенно вблизи острия является сильно неоднородным. При этом значения напряжённости поля могут достигать таких величин, что повышается вероятность эффектов, которые невозможны или слабо проявляются при меньших полях. В частности, это касается дипольного насыщения в полярных жидкостях. Его суть заключается в преимущественном ориентировании молекул вдоль поля. В результате после достижения некоторой напряжённости поля, при дальнейшем повышении напряжённости дипольный момент единицы объёма не может больше увеличиваться. Это эквивалентно уменьшению диэлектрической проницаемости полярной жидкости. Уменьшение же ε воды с ростом E приводит к дополнительному усилению поля $E = k_E \cdot E_0$ у поверхности электрода, т.е. дипольное насыщение приводит к концентрации поля в приэлектродной области. Это изменение ε происходит за время ориентации молекул воды $10^{-11} — 10^{-10}$ с, то есть практически безынерционно. Как следствие, это должно приводить к усилению электрического поля и сгущению картины полос Керра.

Для проверки этого предположения была использована оценка влияния дипольного насыщения в случае воды. Более правдоподобным и физически обоснованным нам представляются расчёты диэлектрической проницаемости, основанные на идеях Онзагера и Кирквуда.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε нелинейно зависит от напряжённости поля, поэтому качественная модель была построена следующим образом.

Распределение стационарного электрического поля в непроводящей среде описывается уравнением

$$-\operatorname{div}(\varepsilon \cdot \operatorname{grad} V) = 0 \quad (3)$$

с краевыми условиями

$$V|_{S_1} = 0, \quad V|_{S_2} = U, \quad \left. \frac{dV}{dn} \right|_{S_3} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon = \varepsilon(E)$ — это относительная диэлектрическая проницаемость вещества, а V — скалярный потенциал электрического поля такой, что $\vec{E} = -\operatorname{grad} V$, \vec{E} — вектор напряжённости электрического поля, S_1 и S_2 — поверхности электродов, U — разность потенциалов между электродами, а S_3 — удалённая граница расчётной области. Так как ε нелинейно зависит от E , то и уравнение (3) является нелинейным.

Для численного решения краевой задачи (3, 4) использовался метод конечных элементов (МКЭ) с треугольными конечными элементами (КЭ) в цилиндрических координатах. Для решения нелинейного уравнения использовался метод простой итерации, для которого уравнение (3)

представляется в виде:

$$-\operatorname{div}(\varepsilon_k \cdot \operatorname{grad} V_{k+1}) = 0, \quad \varepsilon_k = \varepsilon(V_k), \quad k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

Итерационный процесс, описываемый формулой (5), продолжался до тех пор, пока не выполнится условие:

$$\|V_{k+1} - V_k\| > \delta,$$

где δ — это малое положительное число, определяющее точность решения нелинейной задачи. Начальное значение $\varepsilon = \varepsilon(0)$ выбирается равным значению, соответствующему линейной задаче — $\varepsilon(0) = 80$. Минимальные значения ε были ограничены значением, соответствующим напряжённости поля, равным 20 МВ/см.

В результате было получено распределение напряжённости электрического поля на разных расстояниях от острия в достримерном временном интервале (см. Рисунок 11).

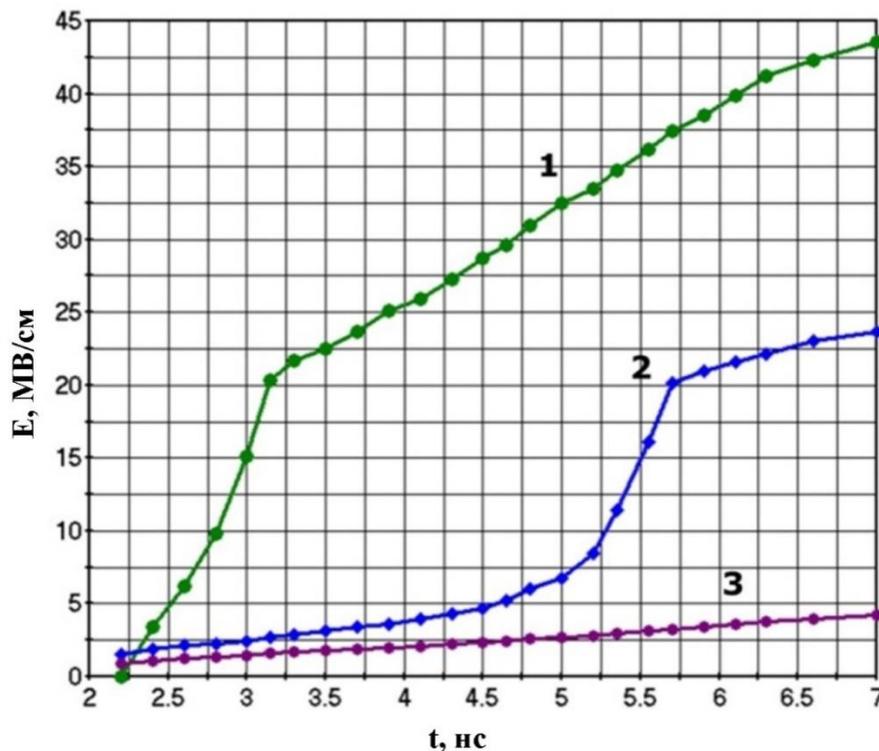


Рисунок 12 — Напряжённость электрического поля до появления стримера на трёх расстояниях z от острия в условиях эксперимента: 1 — $z = 0$ мкм; 2 — $z = 25$ мкм; 3 — $z = 50$ мкм

Анализ графиков (Рисунок 12) показывает, что в пристривной зоне при постоянной ε пороговое значение насыщения $E_n = 3$ МВ/см превышает уже начиная с момента времени 2,5 нс ($E|_{t=2,5 \text{ нс}} = 4$ МВ/см). К моменту появления стримера ($t = 7,2$ нс) напряжённость у острия достигает 20 МВ/см. То есть состояние дипольного насыщения и сжатие картины полос Керра уже вполне возможно. При учёте же нелинейности ε , уже к моменту 2,5 нс напряжённость поля становится равной 5 МВ/см, а дальше начинается её резкий рост. В результате через 1,25 нс напряжённость становится равной 30 МВ/см, а к

седьмой наносекунде её величина достигает 45 МВ/см.

Таким образом, у острейшего электрода напряжённость поля резко усиливается, а во всей остальной части разрядного промежутка ослабляется. Стягивание поля должно сопровождаться стягиванием керровской картины. Причём, из-за квадратичности эффекта Керра это стягивание будет происходить ещё значительно сильнее.

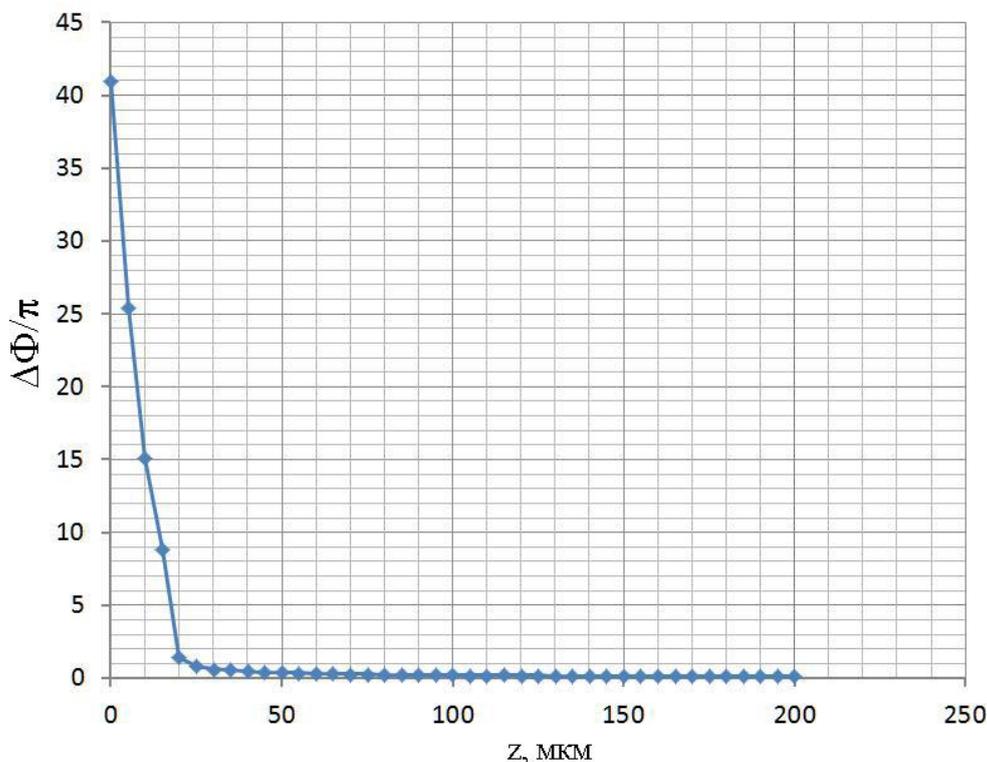


Рисунок 13 — Зависимость набег фазы $\Delta\Phi/\pi$ от расстояния до острия по оси z при напряжении 140 кВ

Из Рисунка 13 видно, что на первых 20 мкм от острия значение $\Delta\Phi$ настолько сильно возрастает, что керровские полосы полностью сливаются в одну серую полосу. Пространственное разрешение регистрирующей аппаратуры в эксперименте составляло 30 мкм. Набег же фазы на размере разрешаемого элемента 30 мкм становится меньше 1. Анализ полученных результатов показывает, что в интервале 2-7 нс (20-140 кВ) керровские полосы выше 25 мкм от острия дают слабую фоновую засветку, также как и ближние к острию полосы, имеющие размер много меньше разрешаемого элемента. В результате чего аппаратура не позволяла их зарегистрировать.

Таким образом, анализ экспериментальных данных и моделирование керрограмм позволяет получить непротиворечивый результат и объяснить несоответствие эксперимента и модели. Кроме того, расчёты позволяют сделать оценку напряжённости поля при возникновении стримера $E \sim 40-50$ МВ/см.

Все вышеизложенное говорит об определяющем влиянии дипольного насыщения в описываемых условиях в совокупности с ограниченной разрешающей способностью измерительной аппаратуры.

Вторая часть главы посвящена анализу керрограммы и теневой картины

формирования катодного стримера в поле сферических электродов.

Для анализа был выбран эксперимент, проводимый в измерительной ячейке (см. рисунок 14) с двумя сферическими электродами из нержавеющей стали радиусом 50 мм с зазором 4 мм.

Ячейка заполнялась деионизованной водой с удельной проводимостью $\sigma \approx 10^{-7}$ (Ом·см)⁻¹, поступающей из замкнутого контура очистки. На электроды подавалось напряжение с характерным временем нарастания $\tau_f \approx 0.6$ мкс и амплитудой 160 кВ.

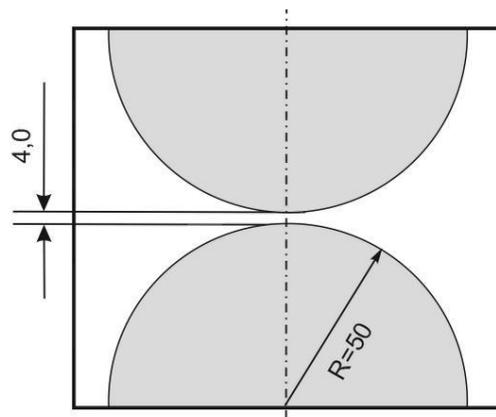


Рисунок 14 — Система сферических электродов

На рисунке 15 приведено изображение оригинальной керрограммы, снятой при изначально скрещенных поляроидах. Над стримером, распространяющимся от катода, просматривается тёмная керровская полоса. Такое возможно в случае искажения поля растущим стримером. Это искажение мы попытались оценить.

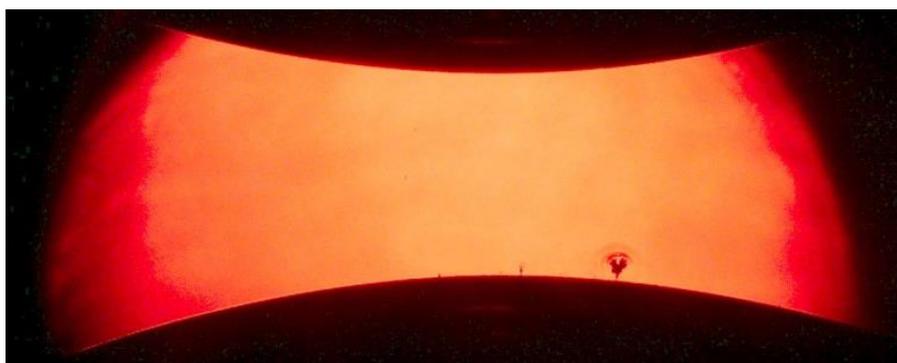


Рисунок 15 — Исходная керрограмма после увеличения контраста

Для удобства анализа оригинальный снимок керрограммы (Рисунок 14) был подвергнут обработке в графическом редакторе, что позволило более чётко выделить изменения в околостримерной зоне. При зазоре между электродами 4 мм стример находится на расстоянии 2,4 мм от оси симметрии измерительной ячейки. Проверка величины и конфигурации электрического поля вблизи катода показала, что условия на оси симметрии и в месте появления стримера практически идентичны. Поэтому решалась осесимметричная задача с расположением стримера на оси симметрии измерительной ячейки.

Для анализа была создана 3D-модель измерительной ячейки (Рисунок 14), далее был увеличен интересующий нас фрагмент керрограммы со стримером (см. Рисунок 16), а на катод была помещена выполненная в масштабе 3D-модель стримера. На первом этапе модель стримера была упрощённой.

Рассматривалась область, находящаяся над верхней точкой стримера. Высота модели стримера 410 мкм. Размеры расчётной области $z \times x = 200 \times 400$ мкм. Начало координат рассматриваемой области находилось в точке на

верхней поверхности головки модели стримера. Шаг дискретизации расчётов 2,5 мкм.

При необходимости по отдельным направлениям зона расчётов увеличивалась.

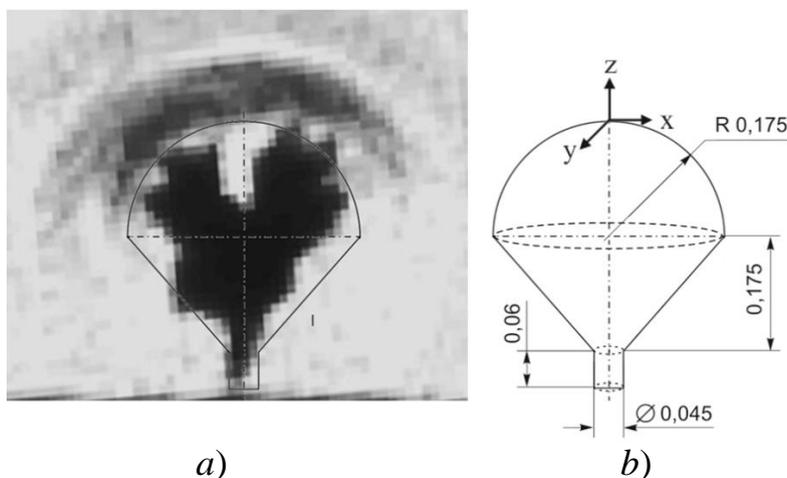


Рисунок 16 — (a) — увеличенный фрагмент керрограммы с рисунка 15, (b) — модель стримера (размеры стримера даны в миллиметрах)

Для большей наглядности на рисунке 17 показано в масштабе сравнение полученной картинки и реальной керрограммы.

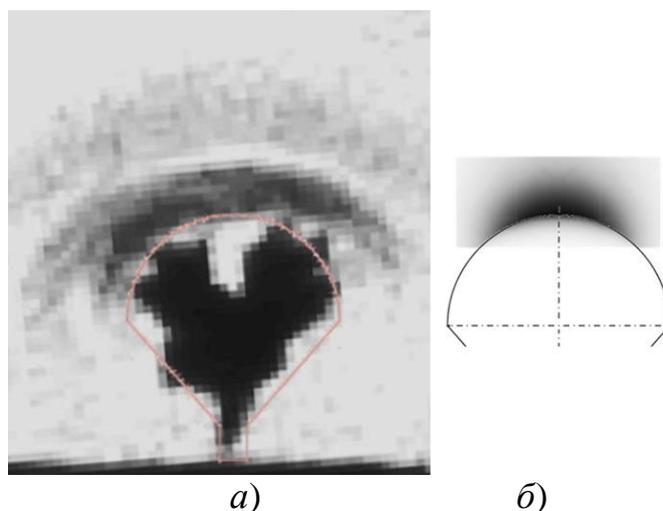


Рисунок 17 — Сравнение реальной (a) и расчётной (б) керрограмм. Контуры модели наложены на экспериментальную керрограмму

Из рисунков видно, что расчётная керрограмма в районе оси симметрии очень похожа на экспериментальную. Высота расчётной зоны над головкой модели стримера равнялась 70 мкм при зазоре между электродами 4 мм.

Из графика изменения относительной интенсивности I/I_0 (Рисунок 18) видно, что видимая тёмная полоса практически заканчивается уже на расстоянии $z = 70$ мкм от вершущки стримера. Дальше от стримера поле зрения продолжает светлеть и, начиная с 0,885 мм, I/I_0 равна 1, то есть весь разрядный промежуток становится полностью светлым. Это значение полностью коррелирует с экспериментальной керрограммой.

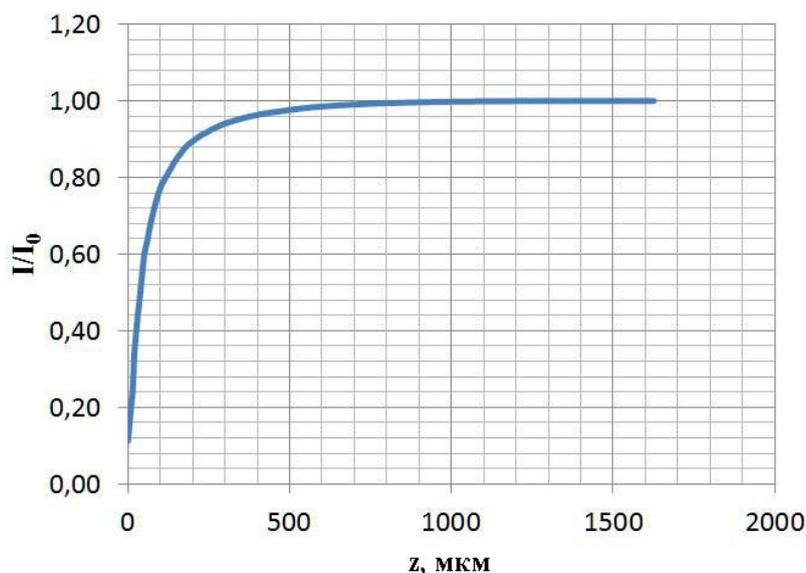


Рисунок 18 – Изменение относительной интенсивности I/I_0 на половине разрядном промежутке вдоль оси z

Сравнение расчётов с постоянной ε и $\varepsilon = \varepsilon(E)$ показало, что значения напряжённости электрического поля на переднем фронте катодного стримера при упрощённой модели лежат в пределах 1,9-2,2 МВ/см (Рисунок 19).

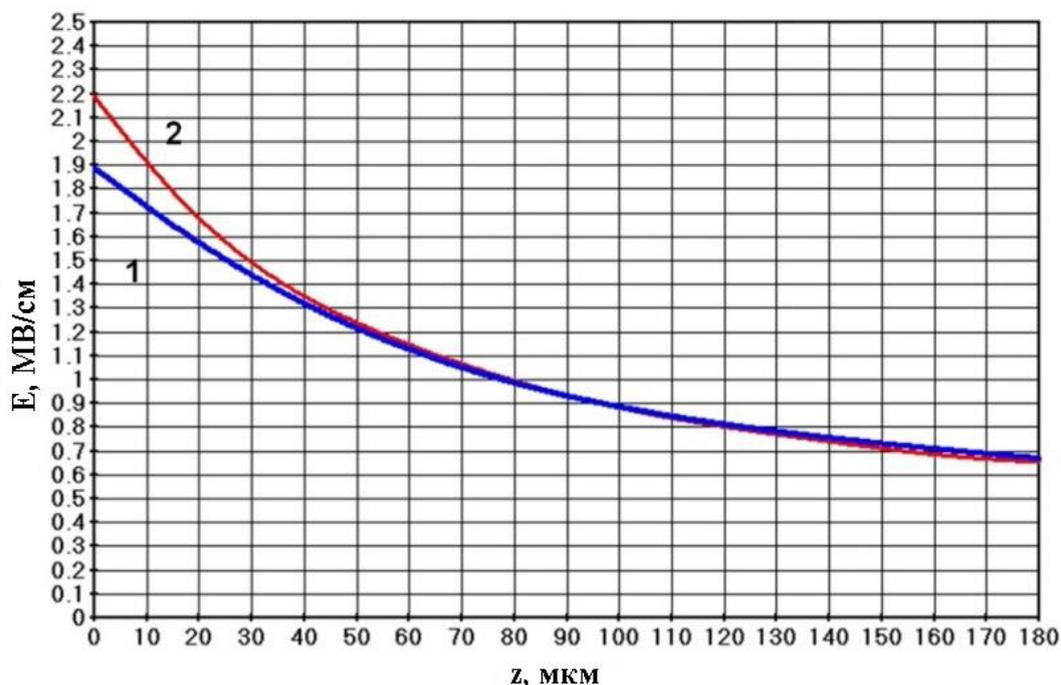


Рисунок 19 — Значения напряженности поля на различных расстояниях от стримера по оси z : кривая 1 — $\varepsilon = 80$, кривая 2 — $\varepsilon = \varepsilon(E)$

В данном случае учёт нелинейности ε приводит к возрастанию напряжённости всего на 13%.

Как отмечалось выше, в полярных жидкостях возможно состояние дипольного насыщения, приводящее к стягиванию полос Керра за счёт сильного увеличения напряжённости поля и снижения относительной

диэлектрической проницаемости. Для воды пороговое значение такой напряжённости составляет около 3 МВ/см. Но в нашем случае напряжённость поля $E = 2,2$ МВ/см не достигает порогового значения даже при учёте нелинейности ϵ . То есть, в отличие от анодного стримера, дипольное насыщение в рамках рассматриваемой модели катодного стримера не наступает.

Из сказанного можно сделать вывод, что учёт нелинейной зависимости относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости поля в рассматриваемых условиях не приводит к сколь-нибудь значимому изменению результата, и для данного случая ϵ можно считать константой.

Реальная форма стримера отличается сильно неоднородной поверхностью. Поэтому были выполнены расчёты для модифицированной модели стримера.



Рисунок 20 — Распределение напряжённости поля по поверхности модифицированной модели стримера. Белый — максимальное значение E

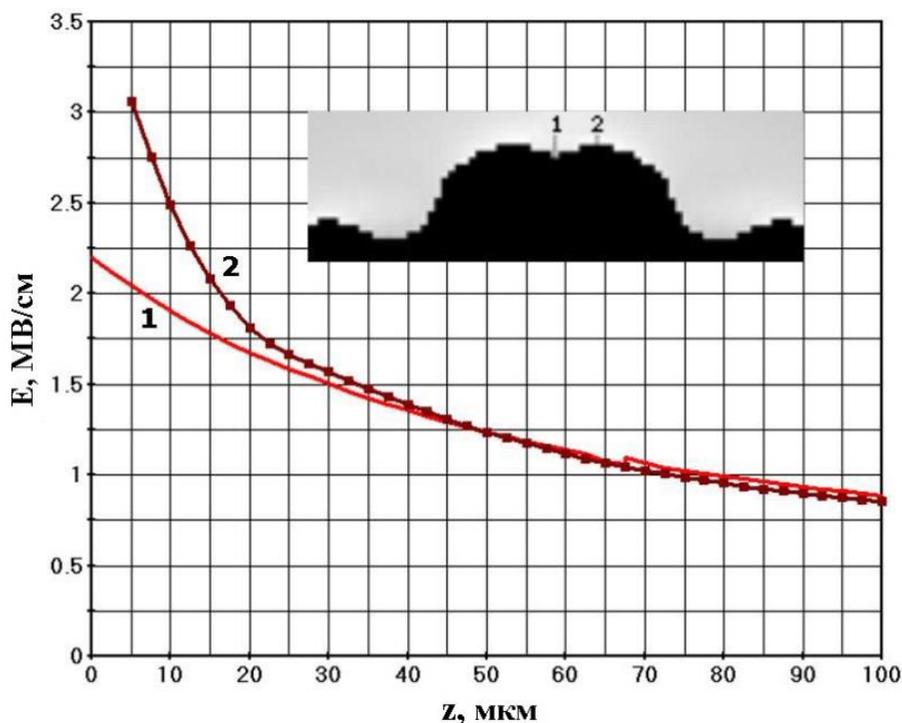


Рисунок 21 — Изменение проекции вектора напряжённости на ось z с модифицированной поверхностью модели стримера. Расстояние между точками 1 и 2 равно 15 мкм

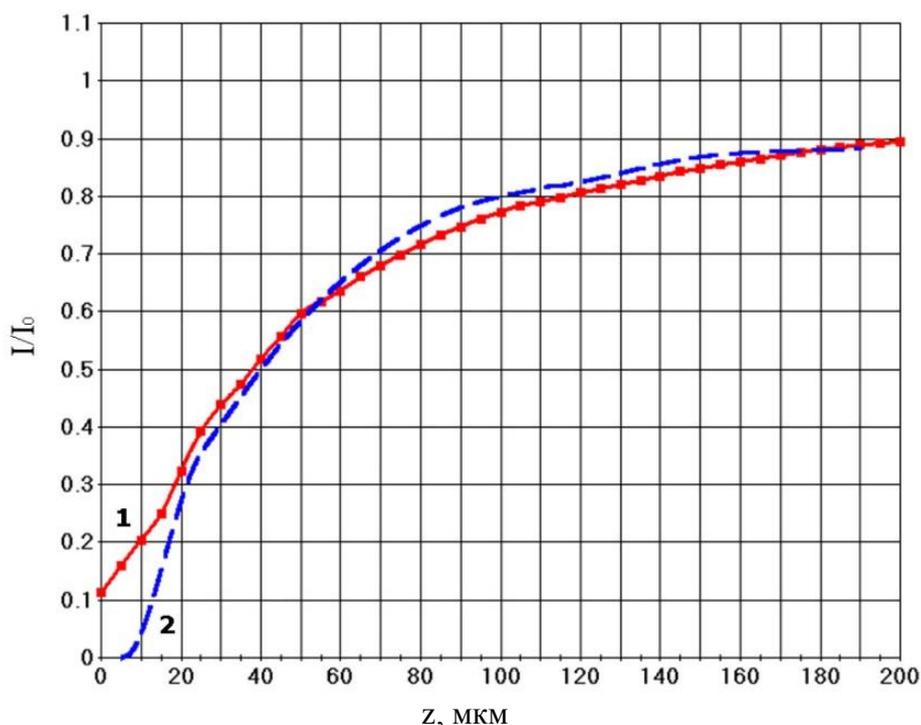


Рисунок 22 — Относительная интенсивность I/I_0 вдоль оси z :
 1 — «гладкая» модель, 2 — модифицированная поверхность

Из сказанного можно сделать вывод, что учёт нелинейной зависимости относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости поля в рассматриваемых условиях не приводит к сколь-нибудь значимому изменению результата (см. Рисунки 21 и 22), и для данного случая ϵ можно считать константой.

Сравнение полученного значения $E = 3,1$ МВ/см для модифицированной модели стримера с моделью с гладкой поверхностью ($E = 2,2$ МВ/см) показало, что напряжённость достигает и даже несколько превышает пороговое значение $E_n = 3$ МВ/см, при котором возможно дипольное насыщение. Однако область, в которой это наблюдается, настолько мала, что не оказывает практически никакого влияния на вид керрограммы (см. рисунок 22).

Разница при пробое при приложенных напряжениях и напряжённостях электрического поля в зависимости от полярности электродов объясняется достаточно просто. В результате эмиссии носителей с катода зажигается разряд, и медленно, с дозвуковой скоростью распространяется к аноду. Далее происходит задержка, и требуется большее напряжение, чтобы пробой успел произойти за время импульса.

На аноде же эмиссии нет, напряжённость поля у микроострий высокая, пробой возникает и распространяется со сверхзвуковой скоростью. Получается, что зазор успевает пробиться за меньшее время или при меньшем напряжении — эти две характеристики взаимосвязаны. Таким образом, полученные значения $E_A \sim 40-50$ МВ/см и $E_K \sim 2,2-3,1$ МВ/см подтверждают это заключение.

В приложении к диссертации представлен акт внедрения результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработан и реализован метод расшифровки экспериментальных керрограмм. Визуализация результатов расчётов позволяет сравнивать их с реальными керрограммами и определять объёмный заряд, наличие пузырьков и предразрядные процессы.

2) Исследованы случаи и возможные механизмы возникновения микропузырьков. При наличии объёмного заряда вблизи острия определено значение растягивающего отрицательного давления, которое способствует возникновению микропузырьков за счёт возникновения кавитационных процессов.

3) Впервые выполнен учёт нелинейности диэлектрической проницаемости при анализе предпробивных электрических полей в полярных жидких диэлектриках.

4) Впервые установлено, что при учете нелинейности диэлектрической проницаемости воды напряжённость электрического поля появления анодного стримера составляет $40 \div 50$ МВ/см.

5) Впервые по анализу керрограммы показано, что напряжённость поля катодного стримера в воде намного меньше напряжённости поля анодного стримера и лежит в области значений $2,2-3,1$ МВ/см, нелинейность поляризации при этом не играет значительной роли.

6) Разработан метод расчёта электрических полей на предпробивной стадии электрического пробоя жидкостей с использованием эффекта Керра, основанный на воспроизведении в модели геометрических, физических и электрических параметров конкретной измерительной ячейки, построении картины поля и матрицы относительных интенсивностей по всему полю измерения, визуализации расчётной керрограммы, корректировки исходных данных модели путем сравнения полученной и экспериментальной керрограмм, определение напряженностей поля по всей области измерения. Этот метод позволяет определять объёмный заряд, наличие пузырьков, выявлять предразрядные процессы.

7) Полученные результаты являются важным вкладом в создание и модернизацию мощных импульсных ёмкостных накопителей энергии, имеющих большое значение в энергетике будущего.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б., Коробейников С.М. Вагин Д.В. Определение предпробивного электрического поля вблизи катодного стримера в воде. *Электричество*, № 7, 2022, С. 61-67. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-7-61-67

2. Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б., Коробейников С.М. Оптические методы исследования предпробивных явлений в жидких диэлектриках. *Электричество*, № 12, 2022, С. 23-35. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-23-35

Научные публикации в журналах, индексируемых в WoS / Scopus:

3. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B.. Study of partial discharges in liquids. Journal of Electrostatics. Vol. 103, 2020, p. 103412. DOI: 10.1016/j.elstat.2019.103412

4. Korobeynikov S.M., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B. Simulation of electrooptical experiments in liquids. Journal of Electrostatics. Vol. 106, July 2020, p. 103452. DOI: 10.1016/j.elstat.2020.103452.

5. Yassinskiy V.B., Kuznetsova Yu.A., Korobeynikov S.M., Vagin D.V. Simulation of electrooptical measurements of prebreakdown electric fields in water. Part 1. Electric field near the anode streamer. IEEE Transaction on Plasma Science. — Vol. 50, iss. 5. — pp. 1262-1268. May 2022. DOI: 10.1109/TPS.2022.3166595

Свидетельство на программу для ЭВМ:

6. Ясинский В.Б., Кузнецова Ю.А., Ковалёв И.А. «Визуализация результатов электрооптических расчётов аксиальных объектов» / Республика Казахстан. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 19813 от «19» августа 2021 года. Вид объекта авторского права: Программа для ЭВМ.

Научные публикации в других материалах :

7. Коробейников С.М., Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б. Визуализация предпробивных процессов в нитробензоле // XII Всероссийская научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (СПЭФГД-2019), 24-26 июня 2019 года, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). – С. 97-99.

8. Korobeynikov S.M., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B. Simulation and analysis of prebreakdown processes in liquids // XI International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD 2019). Saint Petersburg, Russia. 2019 – pp. 254-256.

9. Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б., Коробейников С.М. Методика моделирования предпробивных полей в жидкости // Вопросы Электротехнологии. 2021. № 3 (32) – С. 38-47.

10. Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б., Коробейников С.М. Методика моделирования предпробивных полей в жидкости // Вопросы электротехнологии. 2021. № 3 (32). – С. 38-47.

11. Yassinskiy V.B., Kuznetsova Yu.A. About Kerr`s fringes formation // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия физика. Астрономия. 2021. Т. 136. №3 – С. 35-44.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57.

Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 213. Подписано в печать 21.03.2025 г.