

На правах рукописи

Ридель

Ридель Александр Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ЖИДКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

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: **Ушаков Василий Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
отделение электроэнергетики и электротехники, 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 профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань).

Защита диссертации состоится: «29» июня 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 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 «__» мая 2021 г.

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

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Аварии на объектах энергетики влекут за собой серьезные экономические, социальные и экологические проблемы. Также известно, что при увеличении срока эксплуатации единицы оборудования увеличивается вероятность ее отказа.

В настоящее время в Российских энергосистемах наблюдается превышение нормативных сроков эксплуатации высоковольтного маслонаполненного электрооборудования (ВМЭО). Данный вывод сделан на основании ежегодных отчетов Ростехнадзора, в которых приводится информация об оборудовании, признанном аварийным и требующим скорой замены. При этом планируемые сроки замены варьируются от одного года до семи лет. В это время оборудование находится на учащённом диагностическом контроле. Качественная оценка состояния ВМЭО, в совокупности с другими мероприятиями позволяет минимизировать риск возникновения аварийной ситуации. Наиболее актуальными остаются два уже ставших традиционными способа оценки – это регистрация частичных разрядов (ЧР) в бумажно-масляной изоляции и хроматографический анализ растворенных в трансформаторном масле газов (ХАРГ).

Однако, в некоторых случаях исправные (по результатам проведенного анализа) единицы оборудования, в том числе и новые, выходят из строя. Ярким примером является выход из строя блочного трансформатора на Бурейской ГЭС. Как выяснилось в ходе расследования, авария произошла из-за пробоя масла, при этом минимальное расстояние между так называемыми «реперными точками» силовой дуги составляло 360 мм, а пробой происходил вблизи амплитудного значения напряжения 429 кВ. Эксперты предположили, что такая низкая электрическая прочность трансформаторного масла может быть связана с наличием газовых включений в масле именно в том участке, в котором произошел пробой. Косвенно на этот фактор указывает то, что пробы масла, взятые из бака трансформатора за три месяца до аварии, показали вполне удовлетворительные результаты физико-химического анализа.

Степень разработанности темы исследования

Работы по возникновению стримеров в пузырьках и разряда в газожидкостных системах проводились в ИВТАНе: теоретические - Г. В. Найдис, Н. Ю. Бабаева; экспериментальные - А. В. Панов, М. Х. Гаджиев и др.

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 и D. Koulova; в США - J. Seyed-Yagoobi, P. K. Watson, E. Forster, M. Zanh; в России - Стишков Ю. К., Чирков В. А. и А. И. Жакин.

Более практическими задачами, связанными с жидкой электрической изоляцией, в частности с ЧР в маслонаполненном электрооборудовании, занимаются: Lars Lundgaard, H. Borsi, E. Gockenbach, M. Muhr, Masayuki Hikita, Y. Tanaka, W. McDernid, Fofana I., G. C. Montanari, Massimo Pompili и Andrea Cavallini. В России ЧР и газообразованием занимались В. Г. Аракелян, Л. А. Дарьян, А. Г. Овсянников, А. Е. Монастырский и др.

Целью настоящей работы является выявление факторов, определяющих электрическую прочность жидкой электрической изоляции с микровключениями, что позволяет снизить аварийность ВМЭО.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) исследованы факторы, влияющие на растворение пузырьков газа в трансформаторном масле;
- 2) определены коэффициенты газообразования в трансформаторном и рапсовом маслах при возникновении ЧР;
- 3) изучено поведение газовых пузырьков и водяных капель под действием переменного напряжения;
- 4) исследовано инициирование ЧР в газовых пузырьках;
- 5) выявлены факторы, влияющие на частоту возникновения ЧР в свободно плавающих пузырьках.

В диссертационной работе использовались **экспериментальные методы решения** поставленных задач.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- выявлена причина нарушения закона Пашена при возникновении ЧР в свободных газовых пузырьках и показано выполнение закона Пашена при воздействии рентгеновского излучения;
- показано, что коэффициент поверхностного натяжения остается неизменным до напряженности поля 4 кВ/мм;
- зарегистрирована длительная деформация капель воды в течение нескольких периодов воздействия напряжения;
- обнаружено возникновение и исчезновение водяного мостика между электродами в период воздействия напряжения и преобразование его в отдельные капли при переходе напряжения через ноль;
- выявлено инициирование ЧР в газовых пузырьках при добавлении углеродных нанотрубок в трансформаторном масле;
- оптически зарегистрированы 3 механизма пробоя трансформаторного масла при аномально низких напряженностях электрического поля.

Практическая ценность работы

Полученные в ходе исследования результаты направлены на улучшение качества диагностирования ВМЭО, в частности:

- использование ионизационного излучения позволит повысить вероятность обнаружения газовых дефектов;
- определенные в ходе исследования коэффициенты диффузии можно использовать для оценки срока сохранности проб в пробоотборных устройствах различного типа, а также времени подготовки пробы при проведении оценки состояния ВМЭО методом хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ).

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) в свободных газовых пузырьках закон Пашена не соблюдается из-за дефицита инициирующих электронов;
- 2) при воздействии переменного электрического поля на капли воды в масле в слабых полях в них возникают повторяющиеся деформации, а в сильных полях –

деформации, которые увеличиваются на каждом полупериоде напряжения. В некоторых случаях между электродами возникает водяной мостик, в других случаях неустойчивость формы приводит к выбросу микрокапель из кончиков капель;

3) при напряженности электрического поля от 0 до 4 кВ/мм коэффициент поверхностного натяжения трансформаторного масла не изменяется;

4) стример, развивающийся с кончика свободно плавающего пузырька, может приводить к пробое масляного канала.

Личный вклад автора

Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Постановка цели работы и задач выполнены совместно с научным руководителем Коробейниковым С.М. Все экспериментальные исследования выполнены автором лично. Разработка математической модели растворения пузырьков газа в жидкости выполнена совместно с Коробейниковым С.М. и Вагиным Д.В.

Публикации и апробация работы

По теме диссертационной работы опубликовано всего 11 печатных научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus / Web of Science. Получено 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Результаты работы были представлены на 18 научных мероприятиях, в том числе на: 47 CIGRE SESSION, Paris, France, 2018; III, IV и V Всероссийских научных конференциях «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 2018, 2019 и 2020; Международном научном форуме молодых ученых «Наука будущего – наука молодых», Севастополь, Республика Крым, 2015; Конференции «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования», Пермь, 2020; XI Международной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», Санкт-Петербург, 2015.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 160 наименований и одного приложения. Общий объем работы составляет 136 страниц, включая 73 рисунка и 13 таблиц.

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 главе произведён анализ негативных факторов, влияющих на электрическую прочность трансформаторного масла. Для более глубокого понимания проблемы и определения уровня исследований, проводимых группами исследователей, были проанализированы результаты, опубликованные в ведущих международных научных журналах.

Обзор литературных данных поделен на 4 основные части:

- газообразование и диффузия;
- влияние примесей на электрическую прочность трансформаторного масла;
- поведение капель воды в масле;

- ЧР в газовых включениях в трансформаторном масле.

Во второй главе приведены результаты исследования по определению коэффициентов диффузии основных диагностических газов в кремнийорганической жидкости, трансформаторном, рапсовом и касторовом маслах методом растворения этих газов.

Методика определение коэффициентов диффузии основана на растворении пузырька газа в жидкости. В результате видео регистрации процессов растворения метана, этана, этилена и водорода в трансформаторном, рапсовом и касторовом маслах, а также кремнийорганической жидкости, были получены зависимости размера пузырька от времени. Далее, методом сопоставления кривых растворения, построенных по экспериментальным и математически рассчитанным данным, определялись коэффициенты диффузии. Значение коэффициента в математической модели подбирались до тех пор, пока расчетная и экспериментальная кривые не совпадут (Рисунок 1).

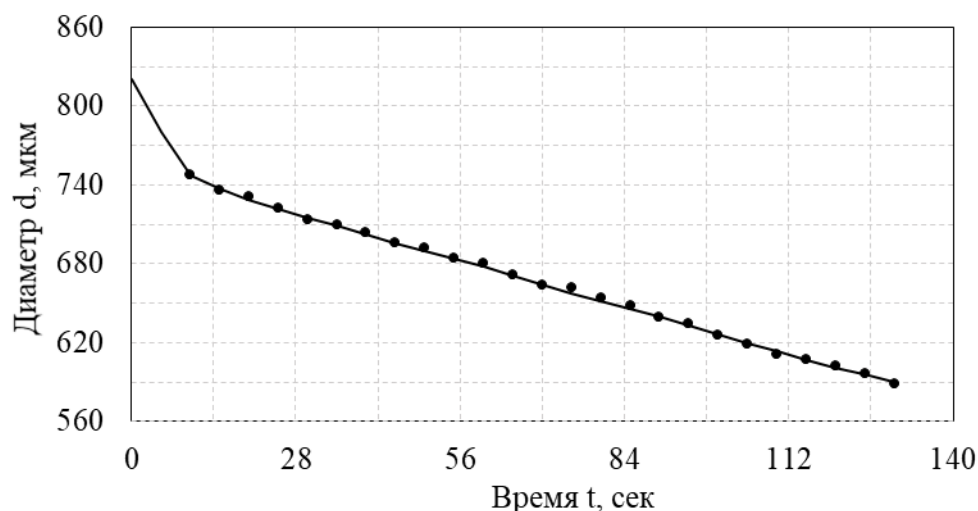


Рисунок 1 – Кривые растворения пузырьков водорода в рапсовом масле при 30 °C: линия - результат моделирования; точки – результат эксперимента

По разработанной нами методике были определены коэффициенты диффузии основных диагностических газов для 4 различных электроизоляционных жидкостей. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты диффузии основных диагностических газов

Изоляционная жидкость	Значение коэффициентов диффузии, м ² /с			
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄
Рапсовое масло	10 ⁻⁸	3 x 10 ⁻⁹	1.3 x 10 ⁻⁹	1.2 x 10 ⁻⁹
Трансформаторное масло	1.4 x 10 ⁻⁸	2.3 x 10 ⁻⁹	1.1.x 10 ⁻⁹	1.2 x 10 ⁻⁹
Касторовое масло	7.5 x 10 ⁻⁹	-	-	-
Кремнийорганическая жидкость	2.3 x 10 ⁻⁸	9 x 10 ⁻⁹	-	-

Разработанная методика была апробирована на системе «пузырек метана в воде». Эта комбинация «жидкость – газ» была выбрана потому, что только для неё

в справочных данных приведены значения коэффициентов диффузии и растворимости газа. Экспериментальные и расчетные кривые растворения представлены на Рисунке 2.

График убедительно показывает чувствительность метода моделирования к подбору коэффициента диффузии. Значение полученного коэффициента диффузии для метана составляет $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Это значение на 13% меньше эталонного значения, приведенного в справочнике.

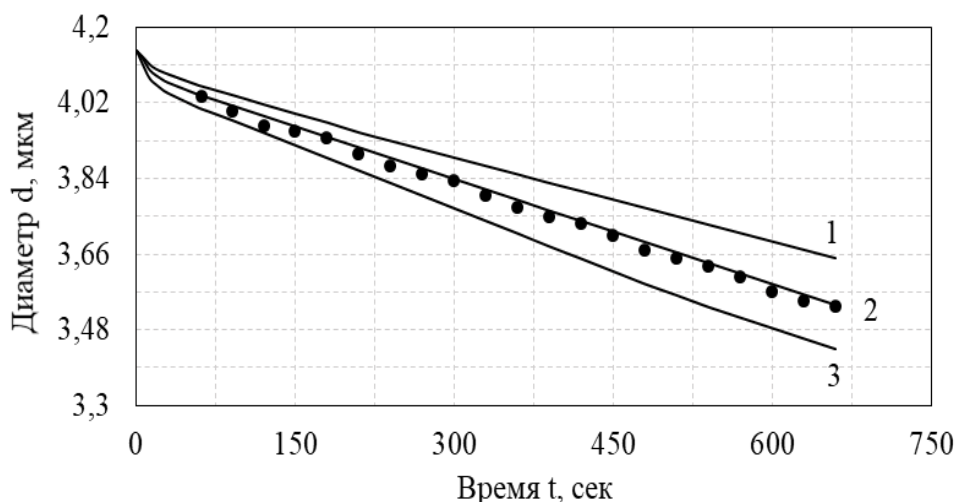


Рисунок 2 – Кривые растворения пузырьков метана в воде: точки – экспериментальные данные; 2 - расчетная кривая, 1, 3 - кривая, полученная с коэффициентами ниже на 20% и выше на 20% относительно подобранного коэффициента

В **третьей главе** приведены результаты исследования по определению коэффициентов газообразования при ЧР в электродной системе «острие–плоскость» в рапсовом и трансформаторном маслах.

Известно, что значение порога ударной ионизации в жидкостях варьируется в пределах от 7 до 20 МВ/см. Для снижения рабочего напряжения при соблюдении этих условий в качестве высоковольтного электрода в экспериментальной ячейке (Рисунок 3) использовалась медно-платиновая иголка, радиус скругления которой после травления в растворе кислоты равнялся 2 мкм. Расстояние между плоским электродом и кончиком иголки устанавливалось равным 18 мм. Оценка амплитудных значений напряженности электрического поля возле острия дают значения, превышающее 15 МВ/см.

Методика определения коэффициентов газообразования заключалась в определении количества газов, образовавшихся в результате воздействия ЧР в трансформаторном и рапсовом маслах на протяжении более 15 часов. Экспериментальная ячейка заливалась чистым дегазированным маслом с одновременным отбором двух проб. Затем она устанавливалась в экспериментальную установку. С момента установления и до момента снятия напряжения счетчиком импульсов регистрировалось общее количество ЧР на протяжении всего исследования. В реальном времени с использованием осциллографа выборочно измерялся кажущийся заряд случайных импульсов ЧР. Через 2 дня после окончания исследования из ячейки отбиралось еще 2 пробы

масла. Затем, методом хроматографического анализа растворенных газов определялись объемы газа в отобранных пробах. В таблице 2 приведены коэффициенты газообразования для основных диагностических газов. Из таблицы видно, что основным диагностическим газом, характеризующим активность ЧР, для обоих масел является водород.

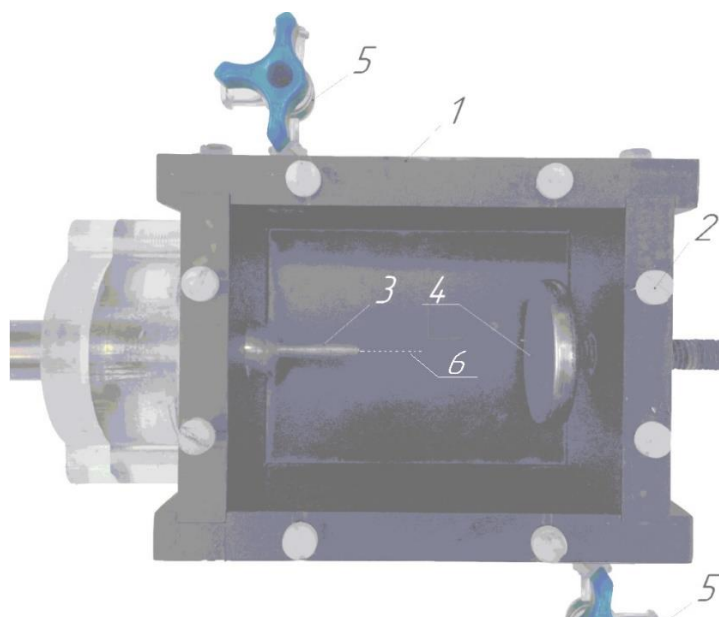


Рисунок 3 – Фотография экспериментальной ячейки

1 – корпус ячейки; 2 – фторопластовые болты; 3 – корпус острейного электрода; 4 – плоский электрод; 5 – трехходовой краник; 6 – острейный электрод

Таблица 2 – Коэффициенты газообразования

	Трансформаторное масло		Рапсовое масло	
Количество импульсов	17459		37897	
Суммарная энергия, Дж	0,0139		0,023611	
Газы	V_г, мкл	K, мкл/Дж	V_г, мкл	K, мкл/Дж
Метан	0,1	0,0015146	0,37	0,00875
Водород	1,9	0,0266571	3	0,070003
Суммарный объем, мкл	2		3.37	
На один импульс ЧР	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-6}$

В четвертой главе приведены результаты оптической и электрической регистрации электрофизических процессов в трансформаторном масле, содержащем графеновые нанотрубки Tuball.

Глава разделена на две основные части. В первой исследуется поведение наноуглеродных агломератов в трансформаторном масле под действием переменного напряжения. Для этого, экспериментальная ячейка, изображенная на Рисунке 4, заполнялась трансформаторным маслом, с добавленным в него спиртовым раствором, содержащим углеродные нанотрубки. После перемешивания по объему трансформаторного масла углеродные нанотрубки объединялись в агломераты (в дальнейшем, на рисунках они выглядят как черные линии в объеме масла). После подачи напряжения на экспериментальную ячейку

хаотично расположенные в объеме масла нанотрубки вытягивались вдоль направления электрического поля.

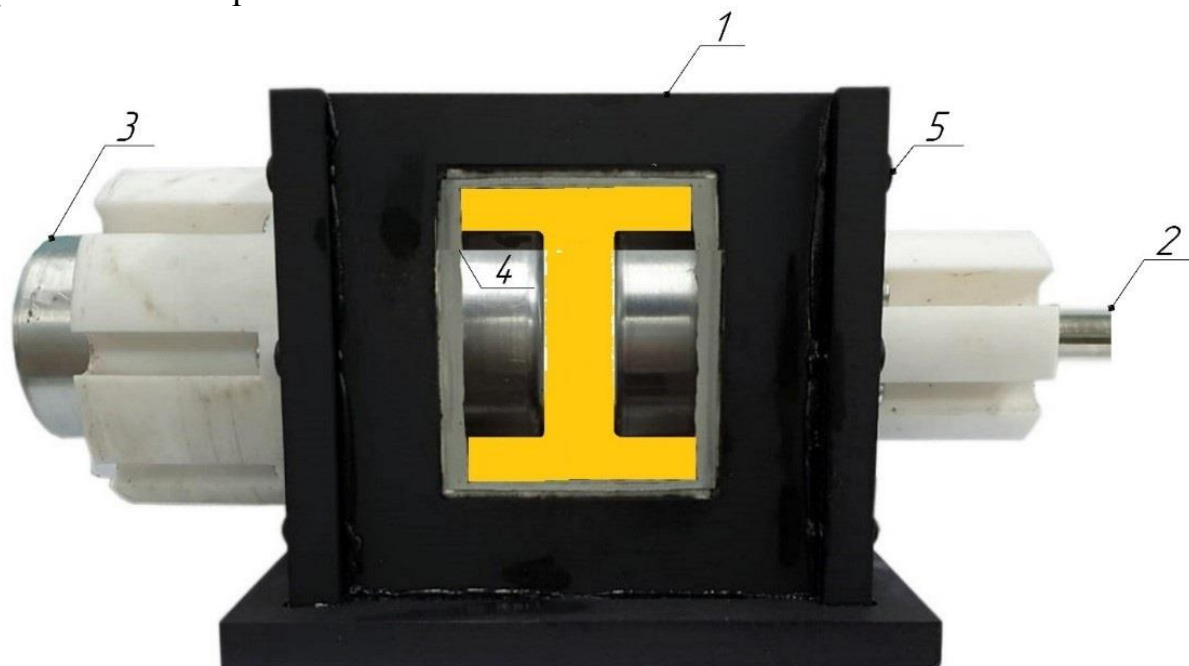


Рисунок 4 – Фотография экспериментальной ячейки с плоскопараллельными электродами: 1 – корпус ячейки; 2, 3 – высоковольтные электроды; 4 – окно для обеспечения оптической регистрации; 5 – фторопластовые болты

При дальнейшем увеличении напряжения некоторые из агломераций графеновых нанотрубок начинали соединяться в направлении электрического поля и образовывать «углеродный мостик», замыкающий межэлектродный промежуток. Данный процесс наблюдался при увеличении зазора вплоть до 20 мм. При детальном рассмотрении кадров, представленных на Рисунке 5, можно увидеть, что скопления углеродных нанотрубок образовали мостик (Рисунок 5, 1 кадр), по которому протекал ток (Рисунок 5, 2 кадр). Протекание тока в этом случае приводило к повышенному газообразованию (Рисунок 5, 9 кадр), вызванному локальным увеличением температуры слоя масла вблизи углеродного мостика.



Рисунок 5 – Пробой углеродного мостика из агломератов наночастиц

Также, при проведении дальнейших исследований, было выявлено однонаправленное движение агломераций углеродных нанотрубок. Как видно из Рисунка 6, в определенный момент группа нанотрубок начинала движение в сторону противоположного электрода, вдоль направления электрического поля. В

представленном случае она продолжала движение на протяжении $t \approx 25$ мсек. За это время знак напряжения менялся как минимум 2 раза. Однако агломерат направления своего движения не менял. Средняя напряженность электрического поля при этом составляла $E_{\text{ср}} \approx 1,2$ кВ/мм.

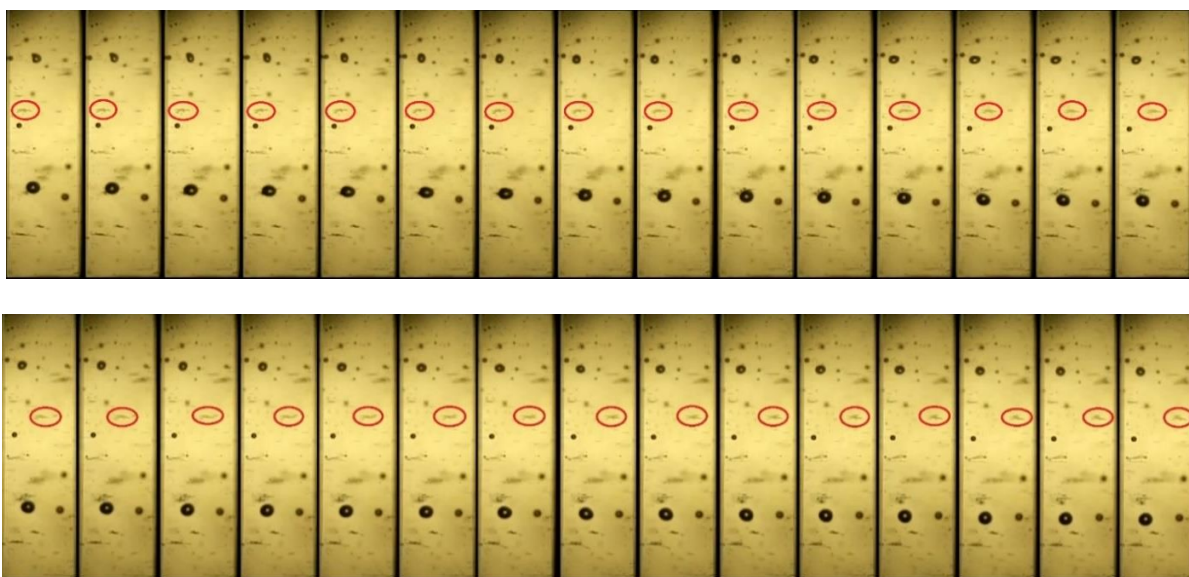
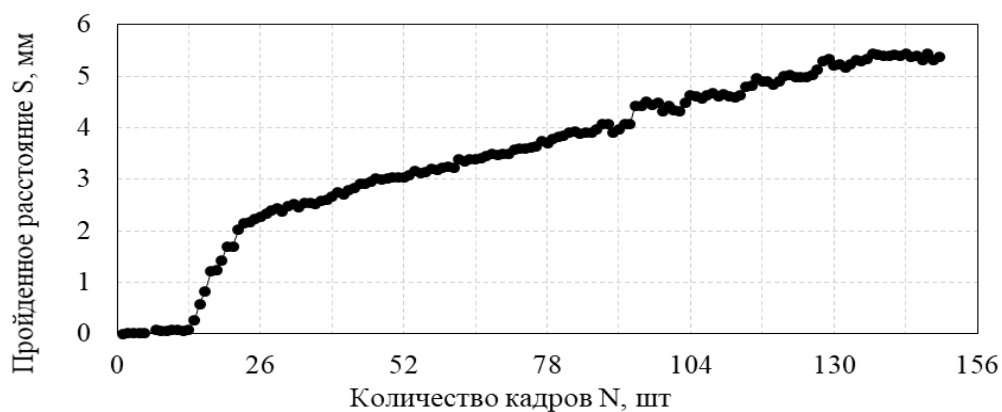
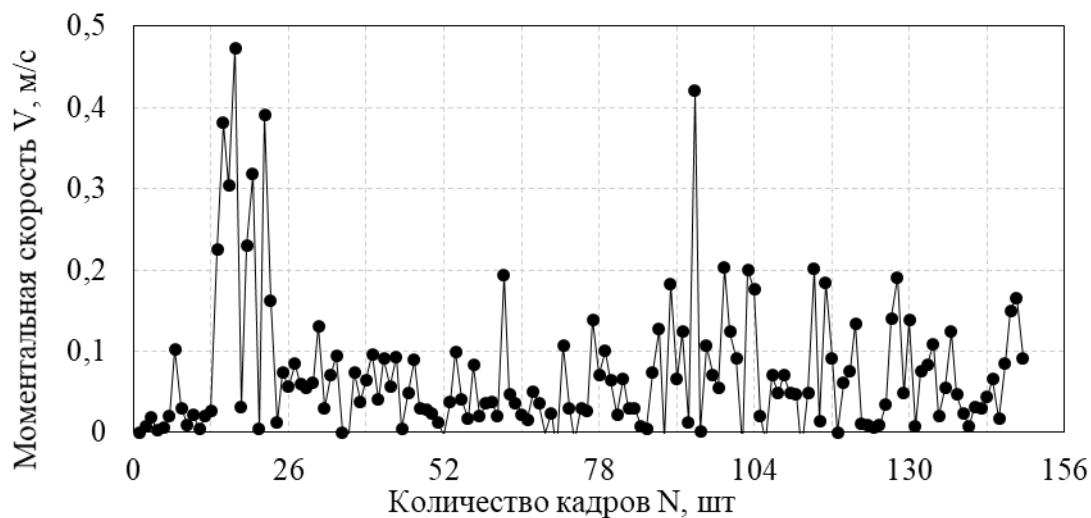


Рисунок 6 – Движение графеновых скоплений. Красным кружком выделен отслеживаемый агломерат.

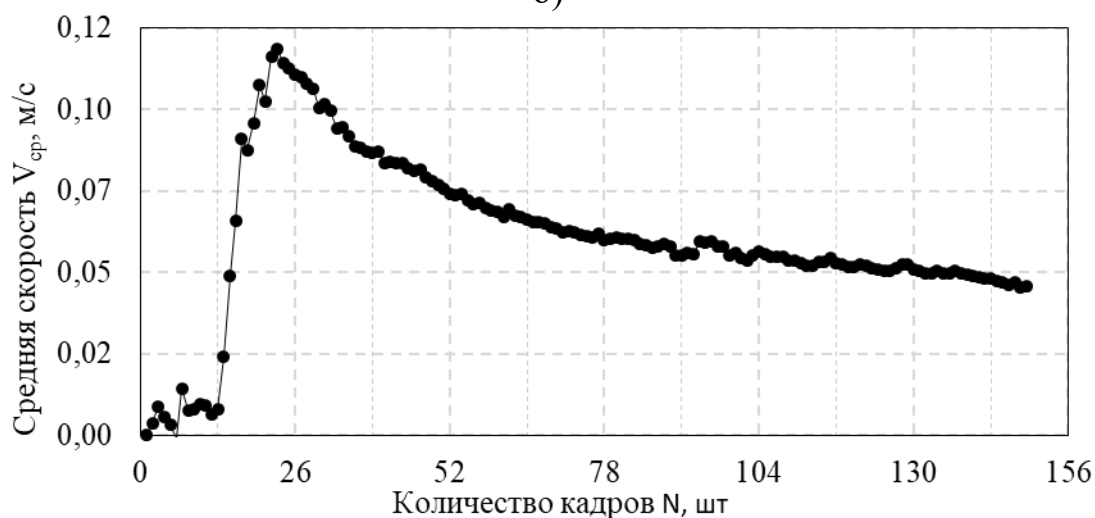
На Рисунке 7 приведены результаты измерения динамики самого продолжительного (≈ 6.5 периодов напряжения) движения подобного скопления графеновых нанотрубок. Для наглядности диаграммы (Рисунок 7) дополнены схематическим изображением синусоиды частотой 50 Гц. На графиках приведены три параметра:

- а) пройденное расстояние – определялось путем измерения перемещения относительно начального положения скопления. Для определения расстояния в мм были сняты электронные размеры с реперного образца;
- б) моментальная скорость - определялась путем деления расстояния, пройденного графеновой группой, от предшествующего места измерения, за $t \approx 0,83$ мсек;
- в) средняя скорость – определялась делением общего пройденного группой расстояния, на все время ее движения.





б)



в)

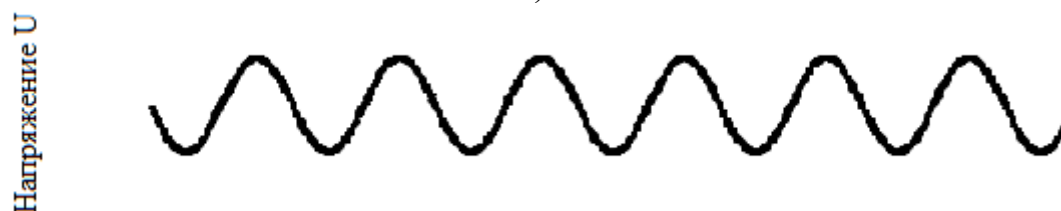


Рисунок 7 – а), б), в) измерения характеристик движения агломераций углеродных нанотрубок

Во второй части проводились измерения значения электрической прочности трансформаторного масла в зависимости от концентрации графеновых нанотрубок, диспергированных в нем.

Методика исследования заключалась в измерении электрической прочности на установке АИМ-90 проб трансформаторного масла, содержащих различное количество графеновых нанотрубок. Исследуемая жидкость изготавливалась путем добавления, с последующим диспергированием на ультразвуковом генераторе И10, мощность которого составляла 1 кВт при диаметре излучателя 33 мм в течение 2 минут.

В результате проведенных измерений были получены следующие результаты:

- при межэлектродном зазоре 2,5 мм и концентрации ≈ 400 мкг/л электрическая прочность варьировалась в интервале от 0,8 до 1,2 кВ/мм;

- при увеличении межэлектродного зазора до 7.5 мм электрическая прочность изменялась в интервале от 0,8 до 8,5 кВ/мм.

Во втором случае производилось измерение электрической прочности модифицированного углеродными нанотрубками трансформаторного масла, которое подвергалось ультразвуковому воздействию. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Электрическая прочность модифицированного масла

С, мкг/л	Среднее значение $E_{ср}$, кВ/мм	Среднеквадратичное отклонение
0	22.4	0.66
87	13.2	0.5
174	12.2	0.67
261	11.1	0.8
348	10.5	0.69
435	9.8	0.6

В пятой главе приведены результаты исследования характерного поведения газовых пузырьков и водяных капель в трансформаторном масле.

В первой части исследовалась деформация пузырьков воздуха различного диаметра в трансформаторном масле под действием переменного электрического поля. Методика исследования заключалась в видео регистрации процесса деформации пузырьков воздуха, которые подавались в ячейку, подробно описанную ранее в четвертой главе. Для этого в дно ячейки была вмонтирована медицинская игла. После включения видео регистрации на ячейку подавалось переменное напряжение частотой 50 Гц. По полученным из записи кадрам определялись максимальные значения изменения размера пузырьков воздуха.

Покадровый анализ видеозаписи выявил частоту деформации, которая была равна 100 Гц — это удвоенная частота действующего напряжения. На Рисунке 8 показано изображение плавающих пузырьков разного диаметра, помещенных в центр экспериментальной ячейки: (а) в момент времени, когда напряжение проходит через ноль, (б) в момент значения амплитуды напряжения. Электроды располагаются вертикально слева и справа от плавающих пузырей. Стрелка показывает направление всплывания.

Эти кадры дали возможность измерить размеры пузырьков и определить экспериментальные значения деформаций разных пузырьков $\Delta\varepsilon$. Однако, при сравнении результатов экспериментальных измерений деформации $\Delta\varepsilon$ и теоретических $\Delta\varepsilon_r$ было выявлено их несоответствие. Это несоответствие легко устраняется, если учесть, что в экспериментах использовано масло, много лет бывшее в эксплуатации, причем известно, что при этом его коэффициент поверхностного натяжения значительно уменьшается. На Рисунке 9 значения деформации рассчитаны с использованием уменьшенного коэффициента $\sigma = 0,031$ Н/м.

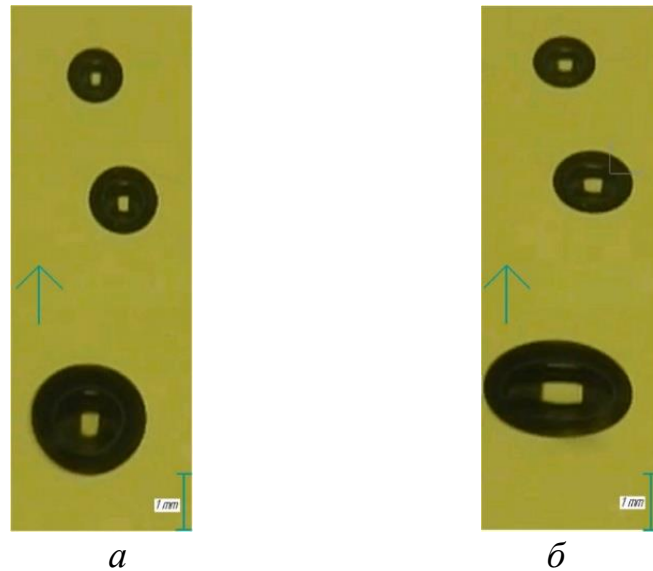


Рисунок 8 – (а) Пузырьки разного диаметра в момент, когда величина электрического поля равна нулю. (б) Те же пузыри при амплитудном значении напряжения

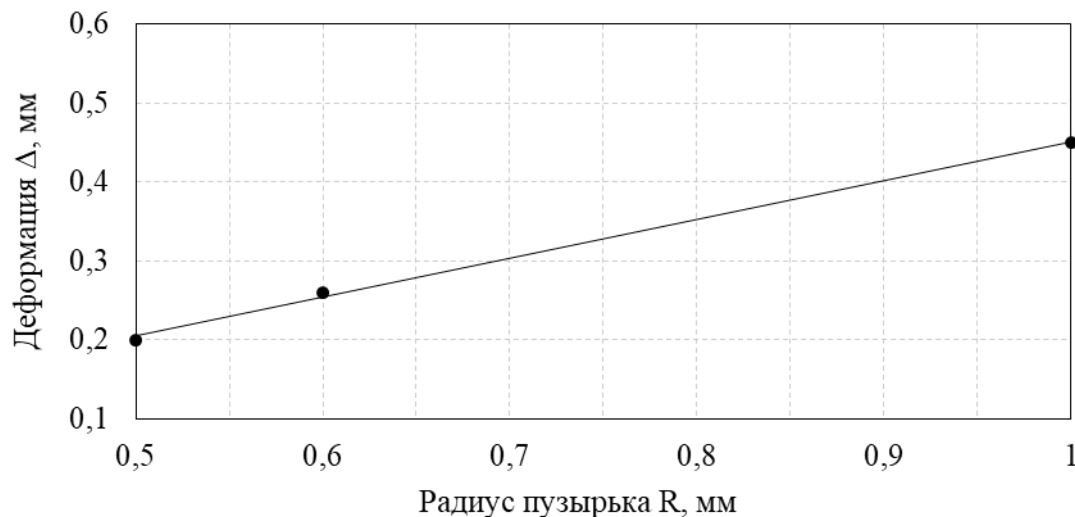


Рисунок 9 – Экспериментальные (кривая) и теоретические (точки) значения деформации пузырька при $\sigma = 0,031$ Н/м

В целом, экспериментальные и расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что значение σ не изменяется в электрическом поле с напряженностью до 4 кВ/мм. Этот вывод важен, поскольку в некоторых моделях поведения пузырьков предполагается, что значение σ зависит от направления электрического поля. В экспериментах степень деформации пропорциональна размеру пузырька, это и указывает на постоянство значения коэффициента поверхностного натяжения σ .

Во второй части исследовалась деформация капель воды под действием переменного электрического поля разной напряженности. Методика исследования осталась прежней за малым изменением: подача капель воды в межэлектродное пространство производилась через верхнюю часть ячейки. Измеренный диаметр капли воды составил 2,6 мм, напряженность электрического поля изменялась от 0,5 кВ/мм до 0,9 кВ/мм. В слабых электрических полях $E_{\text{амп}} < 0,5$ кВ/мм деформация практически незаметна, капля слабо осциллирует с удвоенной

частотой действующего напряжения. В более сильных полях $E_{amp} \approx 1,0$ кВ/мм деформация капли сначала происходит в режиме колебаний, как и в предыдущем случае. Затем при каждом последующем удлинении пузыря его форма начинает изменяться. Капля становится длиннее, ее деформация увеличивается. Затем возможны два варианта дальнейшего развития деформации: из кончиков капли начнут выбрасываться микрокапельки в объем трансформаторного масла (Рисунок 10), либо капля может удлиняться вплоть до касания электродов (Рисунок 11). Здесь, на Рисунках 10 и 11, представлена не вся последовательность кадров, выбираются только последовательные моменты, когда напряжение достигает амплитудных значений, и моменты, когда напряжение приближается к нулю.



Рисунок 10 – Длительная деформация капли воды под действием переменного напряжения. $E_{amp} \approx 0,9$ кВ/мм

Со временем, после того как капля замыкает электроды, ее поведение изменяется и становится еще более сложным (Рисунок 11). В моменты, когда напряжение близко к нулю, водяной мост превращается в отдельные сферические капли с промежутками между ними. При амплитудном напряжении отдельные капельки исчезают, превращаясь в сплошной столб между электродами.

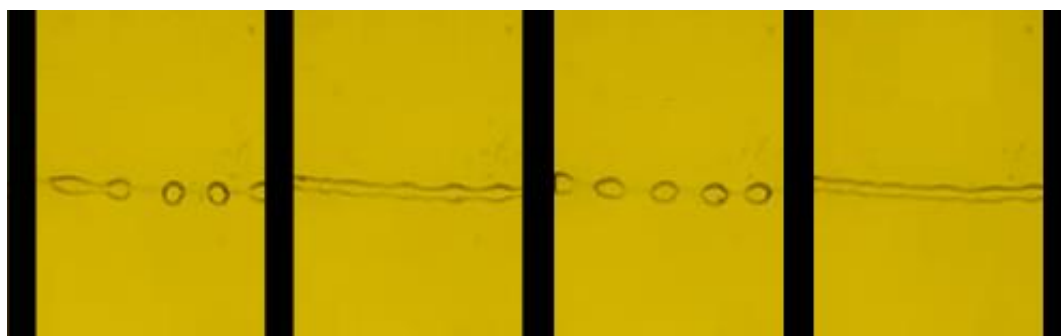


Рисунок 11 – Различные формы элементов водяного моста под действием переменного напряжения. Кадры, снятые в последовательные моменты отсутствия напряжения и максимума напряжения. $E_{amp} \approx 0,85$ кВ/мм

При дальнейшем воздействии напряжения в водяном мостике начинают образовываться паровые пузыри (Рисунок 12). Они появляются и исчезают, постепенно увеличиваясь в размерах. Более того, под действием выталкивающей силы, вся конструкция «пузырьки-капли» меняет направление движения и начинает всплывать вверх.

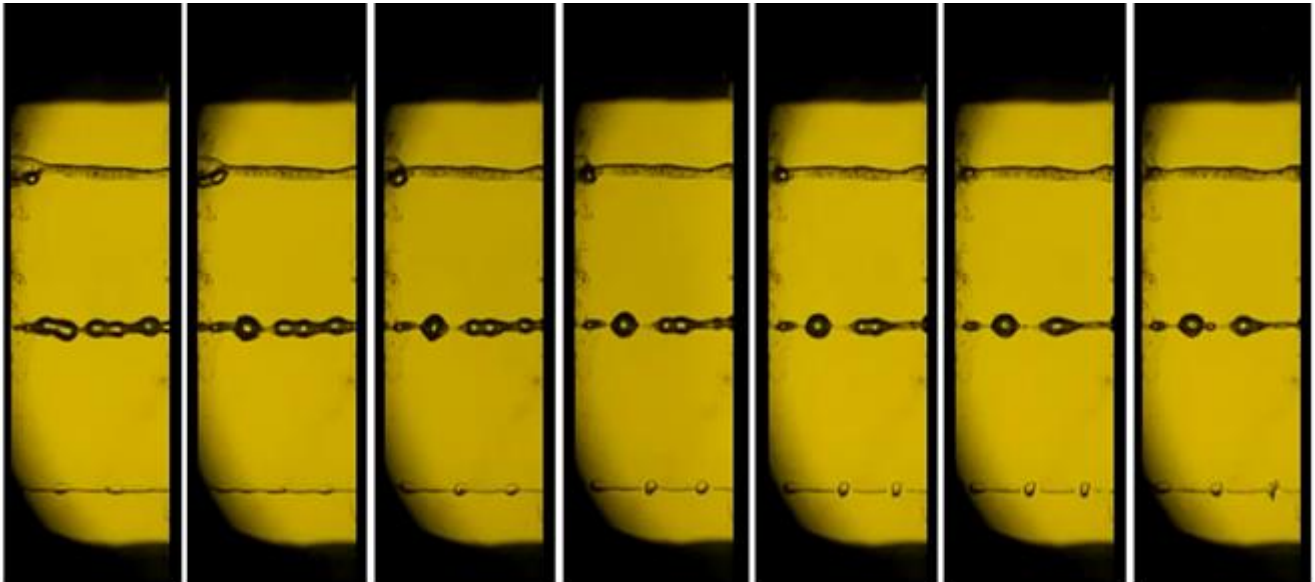


Рисунок 12 – интенсивное испарение в растянутой капле воды. $E_{амп} \approx 0,9$ кВ/мм

В **шестой главе** приведены результаты исследования характеристик ЧР в газовых пузырьках в трансформаторном масле. Межэлектродный зазор был равен 6.8 мм, а диаметр пузырька – $d \approx 1.5$ мм.

Методика исследования идентична той, которая описана в первой части пятой главы. К описанному ранее способу оптической видео регистрации процессов, добавлялась регистрация электрических и световых сигналов ЧР в пузырьке. Значение напряжения 6 кВ первоначально было установлено согласно расчету по закону Пашена для газового промежутка, равного диаметру пузырька. При данном напряжении ЧР зарегистрированы не были. Первые ЧР были зарегистрированы при напряжении, примерно в 3 раза превышающем расчетные значения. Значение напряжения при этом составляло $U_{амп} \approx 21$ кВ.

На Рисунке 13 показана типичная картина развития ЧР в пузырьке. При этом отметим, что между электродами (на картинке они обозначены черными линиями слева и справа от пузырьков) одновременно находятся 4 пузырька (2 по центру, 1 в нижней части на границе съемки и еще один в верхней части в неосвещаемой области). На кадрах 1-15 видно, как пузырьки поднимаются вверх, деформируясь под действием приложенного напряжения. На 16 кадре один из пузырьков деформируется сильнее остальных. На 17 и 18 кадрах он продолжает удлиняться, что приводит к его разрыву на два, более маленьких пузырька на 19 кадре. Затем на кадрах 19-40 видно, что остальные 3 пузырька не подверглись такой деформации и продолжают деформироваться согласно значению приложенного напряжения.



а)



б)

Рисунок 13 – а), б) ЧР в пузырьке гелия

Одновременно с оптической регистрацией производилась также и электрическая регистрация сигнала ЧР. Осциллограмма типичного ЧР представлена на Рисунке 14.

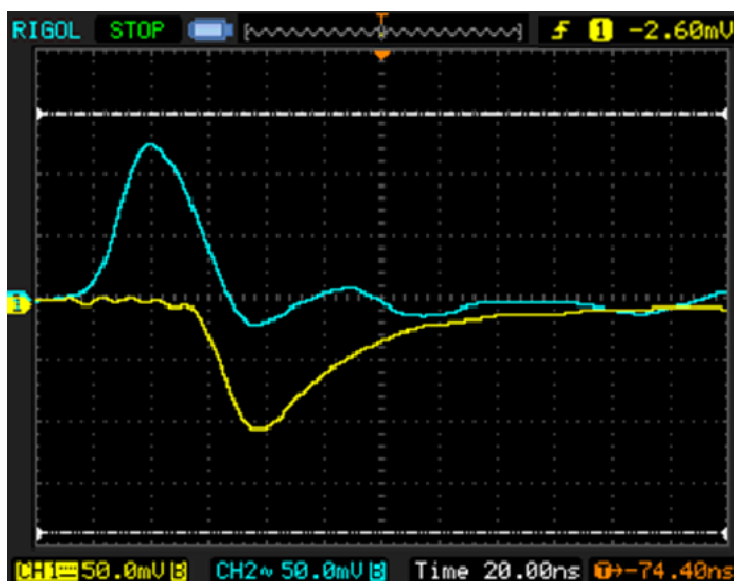


Рисунок 14 – Электрические сигналы ЧР в пузырьке гелия
желтый – сигнал с ФЭУ; синий – со схемы регистрации

По электрическому сигналу мы определили такие характеристики ЧР, как ток и кажущийся заряд. В среднем, для этих условий, значение кажущегося заряда варьировалось от 70 до 110 пКл. Этот диапазон хорошо коррелирует с полученными в результате математического моделирования процесса значениями.

Также было исследовано фазовое распределение ЧР в свободно плавающих пузырьках гелия. Типичная характеристика фазового распределения ЧР представлена на Рисунке 15.

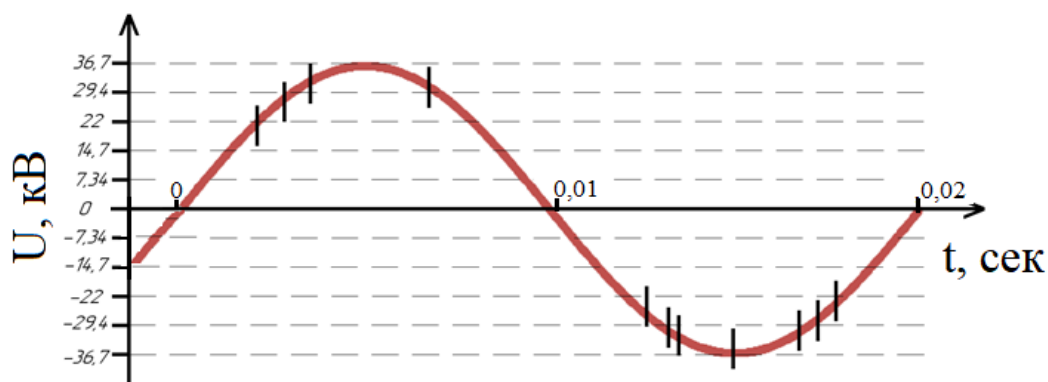


Рисунок 15 – Типичная картина фазового распределения ЧР (черные штрихи)

Столь малое количество экспериментальных данных связано в первую очередь с тем, что ЧР в свободно плавающем пузырьке – очень редкое явление. Вероятность развития ЧР, исходя из общего количества проплывающих в межэлектродном промежутке пузырьков гелия, равна примерно 0,003%.

В ходе работы экспериментально подтверждено влияние дефицита иницирующих электронов на вероятность развития ЧР. Для устранения дефицита, под углом 45 градусов соосно с межэлектродным пространством устанавливался рентгеновский аппарат МИРА 2Д. После установления напряжения (начиная с расчетных значений 6 кВ) при подаче рентгеновского излучения регистрировались ЧР одновременно во всех пузырьках и без времени ожидания.

Оптически зарегистрированы случаи пробоя масляного промежутка при аномально низких напряженностях электрического поля.

В первом случае, при $E_{амп} \approx 3.3$ кВ/мм после развития ЧР (Рисунок 16, 2 кадр) кулоновскими электрическими силами пузырек разрывался на два заряженных пузырька. Они двигались к противоположному по заряду электроду (Рисунок 16, 6 кадр). Затем в момент смены полюса напряжения между одним из пузырьков и электродом происходил разряд (Рисунок 16, 10 кадр), который приводил к пробое масляного промежутка (Рисунок 16, 11 кадр).



Рисунок 16 – Развитие стримеров с границ пузырька при $E_{амп} \approx 3.3$ кВ/мм

Во втором случае, при напряженности поля $E_{амп} > 4$ кВ/мм, когда напряжение подавалось на экспериментальную ячейку не постепенно, а толчком, наблюдалась следующая картина. После развития ЧР в пузырьке (Рисунок 17, 1 кадр) пузырек удлинялся в направлении электрического поля. В большинстве случаев пузырек разрывался кулоновскими электрическими силами на два пузырька. Однако, в некоторых случаях, вместо деления пузырьков мы регистрировали развитие нитевидных структур с границ деформированного пузырька (Рисунок 17, 2 кадр). В дальнейшем по этим структурам происходил пробой масляного промежутка (Рисунок 17, 3 кадр).



Рисунок 17 – Развитие стримеров с границ пузырька при $E_{амп} \approx 4.4$ кВ/мм

Также, при использовании рентгеновского излучения для инициирования ЧР, было замечено, что после развития первого ЧР в пузырьке (на Рисунке 18 этот момент не показан) пузырек удлинялся, однако не успевал разрываться на два пузырька. При смене полюса напряжения в уже деформированном пузырьке происходил повторный ЧР (Рисунок 18, 1 кадр), который вызывал еще большую деформацию. После очередного ЧР (Рисунок 18, 7 кадр) с границ деформированного пузырька наблюдалось развитие нитевидных структур (Рисунок 18, 8 кадр), по которым происходил пробой масляного промежутка (Рисунок 18, 9 кадр).

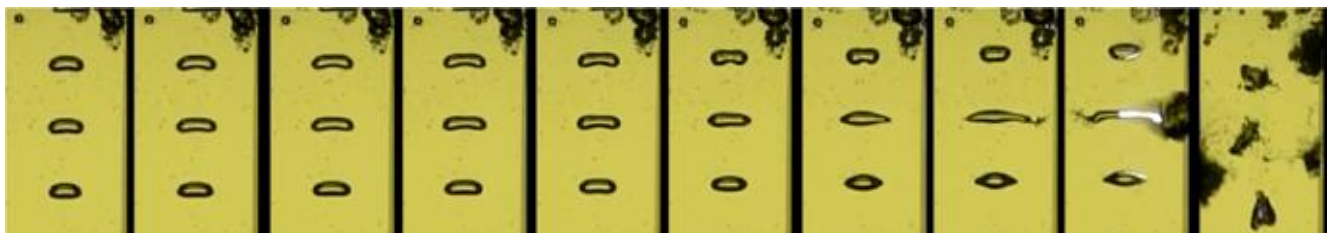


Рисунок 18 – Развитие стримеров с границ пузырька при $E_{амп} \approx 1.4$ кВ/мм

В приложении к диссертации представлен акт внедрения результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Уточнен и апробирован новый метод определения коэффициентов диффузии, основанный на сопоставлении экспериментальных кривых и кривых, рассчитанных с подобранным коэффициентом диффузии. Определены коэффициенты диффузии основных диагностических газов в рапсовом и трансформаторном маслах.

2) Экспериментально определены газы, характеризующие наличие разрядных процессов в рапсовом масле. Получены значения коэффициента газообразования вследствие развития ЧР в системе электродов «острие-плоскость» для рапсового масла и уточнены значения коэффициента для трансформаторного масла.

3) Экспериментально исследована зависимость электрической прочности трансформаторного масла при добавлении в него нанотрубок Tuball крайне низких концентраций. Обнаружены интенсивные электрогидродинамические течения, возникающие в однородном электрическом поле.

4) Экспериментально исследована деформация пузырьков воздуха и капель воды в трансформаторном масле под действием переменного напряжения. Экспериментально доказано, что степень деформации пропорциональна размеру пузырька, это указывает на постоянство значения коэффициента поверхностного натяжения σ .

5) Оптически зарегистрированы ЧР, развивающиеся в свободно плавающих пузырьках в трансформаторном масле под действием переменного напряжения. Выявлено несоответствие закону Пашена напряжения зажигания ЧР в пузырьке в условиях хорошей изолированности разрядной ячейки от естественных источников ионизирующих излучений. Получены экспериментальные результаты,

показывающие влияние интенсивности рентгеновского излучения на вероятность развития ЧР в пузырьке гелия.

б) Оптически зарегистрированы 3 механизма зарождения стримеров в трансформаторном масле при аномально низких напряженностях электрического поля.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Влияние запаздывания на напряжение возникновения частичных разрядов в изоляции трансформатора / Д. А. Воденников, С. М. Коробейников, А. Г. Овсянников, А. В. Ридель // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2020. – № 2 (59). – С. 108–111.

2. Состояние изоляционного масла при его охлаждении = Condition of insulating oil during cooling / М. Н. Лютикова, С. М. Коробейников, А. В. Ридель // *Энергетик*. - 2020. - № 10. - С. 16-20.

3. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и их влияния на пробивную прочность жидкого диэлектрика / М. Н. Лютикова, С. М. Коробейников, А. В. Ридель // *Промышленная энергетика = Promyshlennaya Energetika*. - 2020. - № 5. - С.18-24.

Научные публикации в журналах, индексируемых в WoS и Scopus:

4. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil / S. Korobeynikov, A. V. Ridel, A. Ovsyannikov [et al.] // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. - 2019. - Vol. 26, iss. 5. - P. 1605-1611.

5. Registration and Simulation of Partial Discharges in Free Bubbles at AC Voltage / S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. A. Medvedev, D. L. Karpov, A. G. Ovsyannikov, M. B. Meredova // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. - 2019. – Vol. 26. – № 4. – P. 1035–1042.

6. Study of partial discharges in liquids / S. Korobeynikov, A. Ovsyannikov, A. Ridel, D. Karpov, M. N. Lyutikova, Y. Kuznetsova, V. Yassinskiy // *Journal of Electrostatics*. - 2020. – Vol. 103. – Art. 103412.

7. Deformation of bubbles in transformer oil at the action of alternating electric field / S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. A. Medvedev // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. - 2019. - Vol. 75. - P. 105–109.

8. Intensification of electrohydrodynamic flows using carbon nano-tubes / S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. Karpov, Y. Prokopenko, A. L. Bychkov // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2020. - Vol. 1675: 5 All-Russian scientific conference thermophysics and physical hydrodynamics with the school for young scientists (ТФН-2020), Yalta, 13-20 Sept. 2020. - Art. 012103 (6 p.).

9. Study of partial discharges in bubbles and microsphere in transformer oil / S. M. Korobeynikov, A. G. Ovsyannikov, A. V. Ridel, D. I. Karpov // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2018. - Vol. 1128. - Art. 012118.

10. Dynamics of bubbles in electric field / S. M. Korobeynikov, A. G. Ovsyannikov, A. V. Ridel, D. A. Medvedev // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2017. - Vol. 899: 2 All-Russian scientific conference thermophysics and physical hydrodynamics with the school for young scientists, Crimea, Yalta, 2017. - Art. 082003 (5 p.).

11. Сравнение коэффициентов газообразования при частичных разрядах в системе «острие–плоскость» в рапсовом и трансформаторном маслах / С. М. Коробейников, А. В. Ридель // Прикладная физика = Applied Physics. - 2018. - № 6. - С. 25-28.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

12. № 2020613296 / Коробейников С. М, Лютикова М. Н, Ридель А. В // Программа для моделирования импульсной электрической прочности жидкостей, 24.03.20;

13. № 2019662588 / Вагин Д. В, Коробейников С. М, Ридель А. В, Соловейчик Ю. Г. // Программа для моделирования растворения пузырьков в жидкостях, 26.08.19.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 X 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 494. Подписано в печать 26.04.2021 г.