

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Ридель

Ридель  
Александр Викторович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

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

Новосибирск – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА	11
1.1 Частичные разряды	11
1.2 Влияние примесей на электрическую прочность трансформаторного масла	21
1.3 Поведение капель воды в масле	26
1.4 Газообразование и диффузия	34
Выводы по главе 1	42
ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ОСНОВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ГАЗОВ	43
2.1 Экспериментальная установка	45
2.2 Методика проведения исследования	47
2.3 Результаты	50
2.3.1 Рапсовое масло	50
2.3.2 Трансформаторное масло	51
2.3.3 Касторовое масло	51
2.3.4 Кремнийорганическая жидкость	52
2.3.5 Коэффициенты диффузии	52
2.4 Обсуждение результатов	53
2.4.1 Ошибка предыдущих исследователей	53
2.4.1.1 Плохая дегазация	54
2.4.1.2 Плохая продувка	54
2.4.2 Апробация метода	55
Выводы по главе 2	56

ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДАХ В СИСТЕМЕ «ОСТРИЕ–ПЛОСКОСТЬ» В РАПСОВОМ И ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛАХ	58
3.1 Высоковольтная комната	60
3.1.1 Экспериментальная установка	60
3.1.2 Экспериментальная ячейка по исследованию частичных разрядов в системе острие-плоскость	62
3.2 Методика проведения исследования	63
3.3 Результаты	64
3.4 Обсуждение результатов	66
Выводы по главе 3	69
ГЛАВА 4 ОПТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ГРАФЕНОВЫЕ НАНОТРУБКИ	70
4.1 Определение электрической прочности трансформаторного масла, содержащего графеновые нанотрубки	71
4.1.1 Материалы и методы	71
4.1.2 Подготовка исследуемой смеси	74
4.1.3 Проведение измерений без диспергирования пробы	75
4.1.4 Проведение измерений с диспергированием пробы	76
4.1.5 Обсуждение полученных результатов	78
4.2 Оптические исследования механизма пробоя трансформаторного масла, содержащего графеновые нанотрубки	79
4.2.1 Экспериментальная ячейка	80
4.2.2 Экспериментальные результаты, касающиеся механизма пробоя	81
4.2.3 Экспериментальные результаты, касающиеся течений	83
4.2.4 Обсуждение полученных результатов	86
Выводы по главе 4	87

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРНОГО ПОВЕДЕНИЯ	88
ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ И ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ В	
ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ	
5.1 Газовые пузырьки	88
5.1.1 Методика проведения экспериментов	88
5.1.2 Экспериментальные результаты	89
5.1.3 Обсуждение результатов	89
5.2 Водяные капли	92
5.2.1 Экспериментальные результаты	93
5.2.2 Обсуждение экспериментальных результатов	95
Выводы по главе 5	99
ГЛАВА 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ	100
РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКАХ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ	
МАСЛЕ	
6.1 Частичные разряды в свободно плавающих пузырьках	100
6.1.1 Методика проведения экспериментов	101
6.1.2 Определение необходимого напряжения для	101
возникновения частичных разрядов в пузырьке гелия	
6.1.3 Регистрация частичных разрядов в пузырьках гелия	103
6.1.4 Обсуждение полученных результатов	106
6.2 Исследование влияния дефицита иницирующих электронов на	109
напряжение возникновения частичных разрядов в свободно	
плавающих пузырьках гелия в трансформаторном масле	
Выводы по главе 6	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	136
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Неоспоримым фактом является то, что аварии на объектах энергетики влекут за собой серьезные экономические, социальные и экологические проблемы. В качестве примера рассмотрим аварию, произошедшую на подстанции «Чагино» магистральных электрических сетей ОАО «Мосэнерго». В результате каскадного развития цепочки аварий было обесточено 258 подстанций только в Москве и Московской области. В общей сложности, нанесенный экономический ущерб оценивался более чем в 1.8 миллиарда рублей (по состоянию на 2005 год). Первопричиной этому, как стало известно в результате проведенного расследования, стал выход из строя трансформатора тока 110 кВ. Срок эксплуатации высоковольтного маслонаполненного электрооборудования (ВМЭО) на подстанции на тот момент составлял более 45 лет, что превышает заложенные заводом производителем сроки более чем на 20 лет.

Сложившаяся ситуация, связанная с превышением нормативных сроков эксплуатации характерна не только для отдельных структур ПАО «Россети», но и для всей страны в целом. На рисунке В.1 представлена диаграмма распределения силовых трансформаторов 110 кВ по сроку эксплуатации. Информация взята с сайта «Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору» [1] по данным Сибирского управления Ростехнадзора.

В статистике [1] отражено только оборудование, которое по ряду причин находится на повышенном диагностическом контроле. При этом в эксплуатации в настоящее время находятся 84 единицы оборудования, со сроком эксплуатации более 25 лет, что превышает гарантийный срок наработки, заложенный заводом изготовителем. При усиленном контроле состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования диагностические мероприятия производятся не реже двух раз в год. Похожая ситуация наблюдается не только по Сибирскому округу, но и по стране в целом. График (Рисунок В.2), построенный на анализе

аварийности в электросетях и генерации 110 кВ и выше [2] показывает, что в настоящий момент этих мероприятий недостаточно.

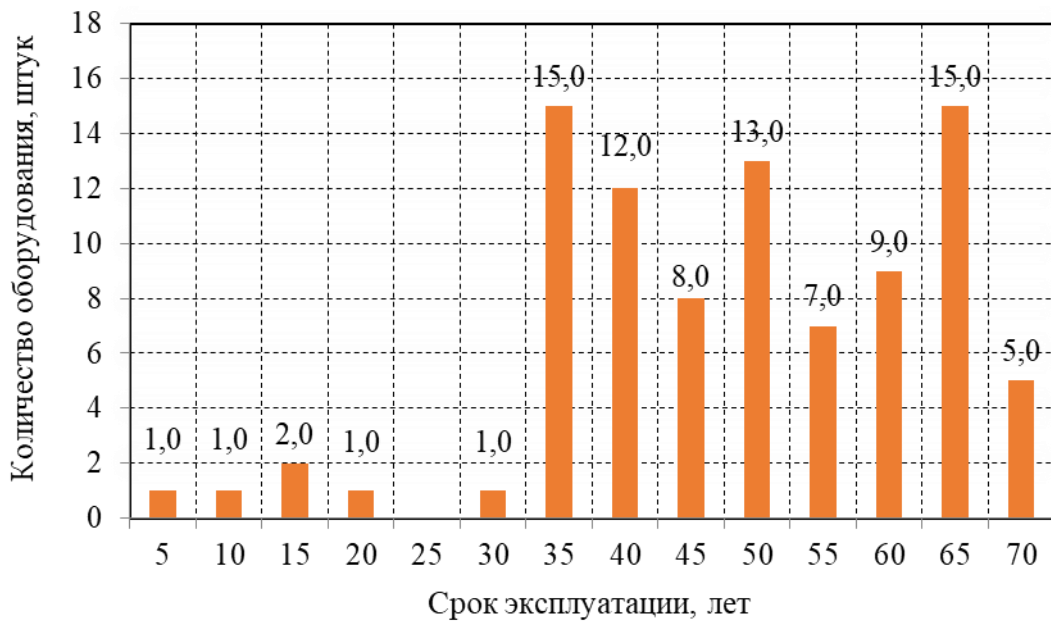


Рисунок В.1 - Диаграмма распределения аварийных силовых трансформаторов 110 кВ по сроку эксплуатации

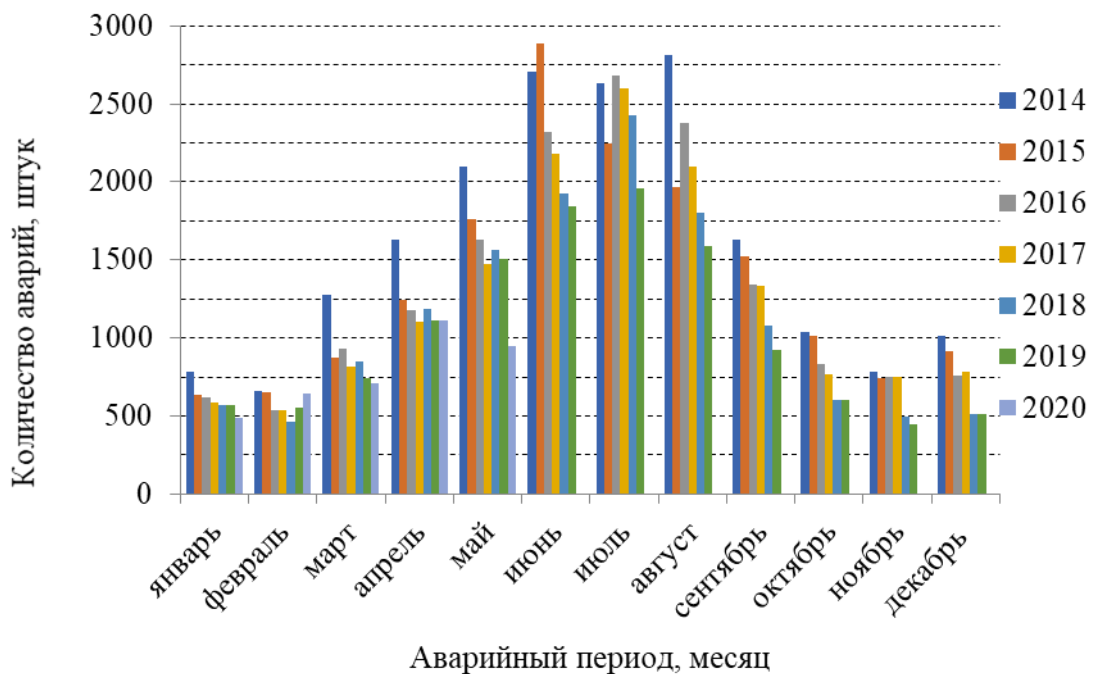


Рисунок В.2 - Аварийность в электросетях и генерации 110 кВ и выше

Помимо хорошо известных, связанных с высоковольтными перенапряжениями (грозовая деятельность), существуют менее изученные процессы, приводящие к электрическому пробоя изоляции. Эти процессы связаны с наличием дефектов в жидкой изоляции и их поведением под действием переменного электрического поля.

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. Таким образом, средняя продольная напряженность поля в момент пробоя составила 1,2 кВ/мм! Такую низкую прочность масла можно объяснить только наличием газовых включений в масле именно в том участке, в котором произошел пробой. Именно в этом месте, потому что пробы масла, взятые из бака трансформатора за три месяца до аварии, показали вполне удовлетворительные результаты физико-химического анализа.

Приведенное событие подтверждает актуальность и указывает на наличие проблемной ситуации. Поэтому актуальным в настоящее время является проведение исследований, направленных на экспериментальные исследования электрофизических процессов, происходящих в ВМЭО.

### **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 частичными разрядами (ЧР) в маслonaполненном 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) исследовано влияние концентрации нанотрубок на электрическую прочность трансформаторного масла;
- 4) изучено поведение газовых пузырьков и водяных капель под действием переменного напряжения;
- 5) исследовано инициирование ЧР в газовых пузырьках и выявлены факторы, влияющие на частоту их возникновения.

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 (акт внедрения результатов диссертационной работы представлены в Приложении «А»);
- 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:**

- в свободных газовых пузырьках закон Пашена не соблюдается из-за дефицита инициирующих электронов;
- 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;
- при напряженности электрического поля от 0 до 4 кВ/мм коэффициент поверхностного натяжения трансформаторного масла не изменяется;
- стример, развивающийся с кончика свободно плавающего пузырька, может приводить к пробоя масляного канала.

### **Апробация результатов 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 конференциях, в том числе таких, как:

- XI международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», Санкт-Петербург, 2015;
- международный научный форум молодых ученых «наука будущего – наука молодых», Севастополь, Республика Крым, 2015;
- III, IV и V всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 2018, 2019 и 2020;
- международный энергетический форум 47 CIGRE SESSION, Paris, France, 2018;
- конференция «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования», Пермь, 2020.

### **Структура и объем работы**

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

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

## 1.1 Частичные разряды

Частичный разряд - локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе [3]. Исследованиями, направленными на изучение свойств ЧР в трансформаторном масле, активно занимаются ученые со всего мира с начала 20 века [4-10]. Однако, несмотря на огромное количество публикаций и исследований, посвящённых данной тематике, интерес к проблеме не угас и в настоящее время. Связано это, в первую очередь с тем, что все отказы ВМЭО сопровождаются повышенной активностью ЧР в изоляции. Однако, как показывает практика, несмотря на большое количество исследований и большое количество различных современных способов диагностирования высоковольтного маслонаполненного электрооборудования – невозможно дать точную оценку состояния оборудования и определить срок его безотказной эксплуатации.

В настоящее время существует несколько методов диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования, основанных на изучении активности ЧР в бумажно-масляной изоляции [11]:

- электрический [3] в настоящее время является самым востребованным и точным. Его ключевые недостатки - необходимость прямого подключения к исследуемому оборудованию и отсутствие невозможность точного определения природы ЧР (острие, пора в твердой изоляции и т.д.). Среди преимуществ - возможность отстройки от наводимых помех, проведение анализа в штатном рабочем режиме (без подачи повышенного напряжения), полнота получаемых данных для всестороннего изучения явления ЧР и прогнозирования;

- ХАРГ [12] является наиболее молодым и перспективным. Его ключевой недостаток – возможное нарушение технологии отбора проб, что приводит к

большому разбросу результатов исследования. Среди преимуществ - комплексная оценка состояния оборудования по всем известным видам дефектов;

- акустический [13] основан на применении сверхчувствительных микрофонов, которые улавливают высокочастотные звуковые волны. Его ключевой недостаток – затруднена регистрация маломощных ЧР; отсутствует возможность качественного отделения ЧР от электромагнитных шумов. Среди преимуществ - возможность дистанционного исследования.

Однако, используя данные методики, зачастую невозможно выявить даже грубые дефекты в изоляции ВМЭО. Это можно проиллюстрировать следующим примером. Как известно, все трансформаторы после изготовления, либо после ремонта испытываются повышенным напряжением на наличие ЧР [14]. Однако в некоторых случаях дефекты не выявляются. Такой вывод можно сделать, основываясь на ранее приведенных данных (Рисунок В.1). Организация изготовитель обязуется гарантировать безаварийную работу оборудования в течение 25 лет (при соблюдении нормальных условий эксплуатации). Однако, в отчетах, приведенных госнадзором, можно найти аварийное оборудование, требующее срочной замены, со сроком эксплуатации от 1 года. Деградация твердой изоляции под действием ЧР в газовых включениях – процесс, растянутый по времени. И поэтому, не может служить причиной резкой деградации основной изоляции. То есть это оборудование содержало дефекты, которые не были выявлены на приемочных испытаниях повышенным напряжением [14].

Рассмотрим технологию проведения испытаний. На испытуемое оборудование подается испытательное напряжение, равное 1.1 от рабочего напряжения при продолжительности воздействия от одной до пяти минут. В процессе проведения испытаний регистрируются ЧР в оборудовании. Подъем напряжения выше рабочих значений производится с целью инициирования ЧР в газовых включениях твердой изоляции, а также выявления мест повышенной напряженности электрического поля.

Известно, что для развития ЧР необходимо соблюдение двух условий: наличие иницирующего электрона и величины напряжения при которой может развиваться

электронная лавина [15]. Традиционно считается, что инициирующий электрон возникает вследствие воздействия космического излучения [16]. Увеличение области напряжения увеличивает вероятность соблюдения всех необходимых условий при минимальных затратах на дополнительное оборудование. Однако этого бывает недостаточно. Таким образом, считается, что при испытаниях мы исключаем влияние запаздывания первого ЧР и регистрируем ЧР во всех возможных скрытых дефектах высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

В последнее время широкое распространение получили исследования, направленные на выявление факторов, влияющих на образование газовых пузырьков в трансформаторном масле [17-21]. Также большой интерес вызывают ЧР, развивающиеся в этих пузырьках и влияние этих пузырьков на электрическую прочность трансформаторного масла [26-30].

Рассмотрим несколько наиболее интересных статей по данной тематике. Одними из первых в своей работе [22] обозначили проблему газовых пузырьков в трансформаторном масле. Подчеркнем, что в своей работе они ссылаются на более раннее теоретическое исследование [23]. Экспериментальное исследование [22] заключалось в помещении пузырька воздуха диаметром 3-5 мм на плексигласовое стекло, которое покрывало высоковольтный электрод (Рисунок 1.1).

Регистрация электрических сигналов производилась при помощи осциллографа Tektronix 454. Изучив результаты работы можно отметить несколько ключевых моментов:

- ЧР в пузырьке возникали группами, при этом время задержки между группами ЧР и первой группой ЧР после подачи напряжения было сравнительно большое;
- после первого ЧР пузырек увеличивается в размере и может произойти второй ЧР, который может привести к пробую;
- все ЧР в пузырьке происходили вблизи максимума напряжения  $\pm 15\%$ .

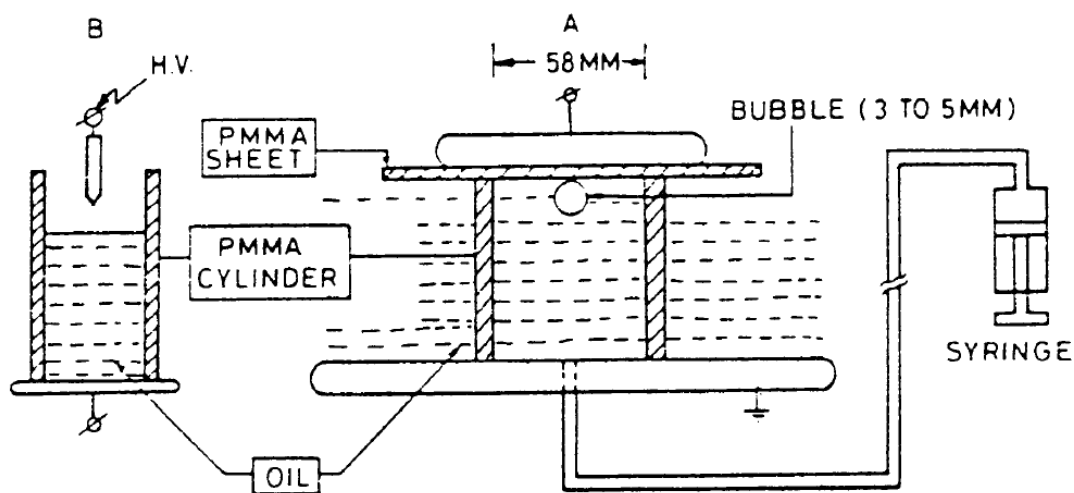


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки [22]

При этом к исследованию возникает очень много вопросов. Во-первых, необходимо указать на тот факт, что в статье отсутствуют данные, необходимые для полного понимания исследуемого процесса:

- значение напряжения;
- значение напряженности электрического поля или межэлектродного зазора;
- оптическая регистрация процесса.

Во-вторых, еще более сомнителен тот факт, что повторный ЧР развивается вблизи максимума напряжения, ведь после первого ЧР на стенках пузырька остаются заряды, которые, в свою очередь, и инициируют повторный ЧР. Эти заряды увеличивают напряженность электрического поля внутри пузырька. Поэтому пробой должен происходить при меньшем обратном напряжении. В-третьих, некоторые моменты в статье указывают на то, что пузырек не был одиночным. Одним из этих моментов является вывод о развитии ЧР группами в определенный период. Тогда возникает вопрос – на основании чего автор может утверждать о наличии повторных ЧР без оптической регистрации? Ведь за повторный ЧР можно принять ЧР в другом пузырьке, который развился на последующем полупериоде напряжения.

В России исследованием влияния пузырьков газа на электрическую прочность, при воздействии постоянным напряжением, занимались ученые из

Объединенного института высоких температур Российской академии наук, а именно Гаджиев, Тюфтяев, Саргсян, Акимов и Демиров [24]. В статье исследуется зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от концентрации пузырьков различных газов (воздуха, гексафторида серы, инертных газов). Для исследования пробоя пузырьков в трансформаторном масле была разработана экспериментальная установка (Рисунок 1.2), конструкция которой позволяет определить электрические, оптические и спектральные характеристики разряда.

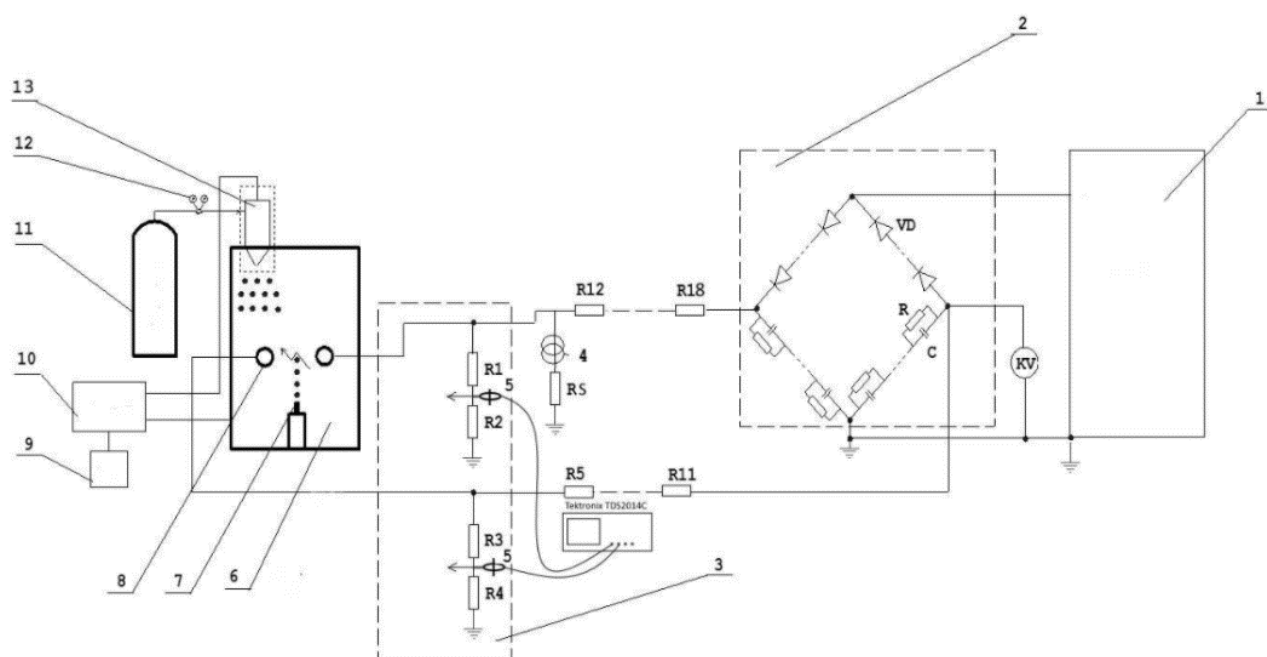


Рисунок 1.2 - Общая схема экспериментальной установки:

1-экспериментальная установка АИИ-70; 2-диодно-конденсаторный удвоитель напряжения, 3-высоковольтные делители; 4-щуп для измерения тока компании Tektronix TCR303 или TCR0030A; 5-высоковольтный пробник осциллографа Tektronix P6015A; 6-испытательная камера; 7-игла для того чтобы создать линию из отдельных пузырьков; 8-электроды; 9-центробежный насос преобразователь частоты; 10-центробежный насос; 11-газовый баллон; 12-газовый редуктор; 13-генератор микропузырьков среды; ограничительных резисторов [24]

Пробой среды осуществляется в цилиндрической камере из оргстекла с внутренним диаметром 200 мм и высотой 600 мм. На высоте 260 мм расположены

медные электроды сферической формы диаметром 36 мм, толщиной 13 мм и радиусом кривизны 25 мм, межэлектродное расстояние равно 8 мм. На уровне электрода имеется смотровое окно из кварцевого стекла. В работе напряжение плавно увеличивалось со скоростью 1-2 кВ/с по методике, описанной в [31]. Если говорить об исследовании характеристик ЧП в пузырьках (либо об исследовании влияния их на электрическую прочность), то используемый способ является неподходящим. На наш взгляд было бы более правильно увеличивать напряжение ступенчато с задержкой на продолжительные промежутки времени. Это связано с задержкой развития ЧР в свободно плавающих пузырьках [15]. Таким образом, полученные авторами [24] значения пробивного напряжения могут быть завышены из-за недостатка иницирующих электронов.

Также мы видим плавное снижение электрической прочности трансформаторного масла во всех случаях, кроме чистого масла и масла с воздушными пузырьками (Рисунок 1.3).

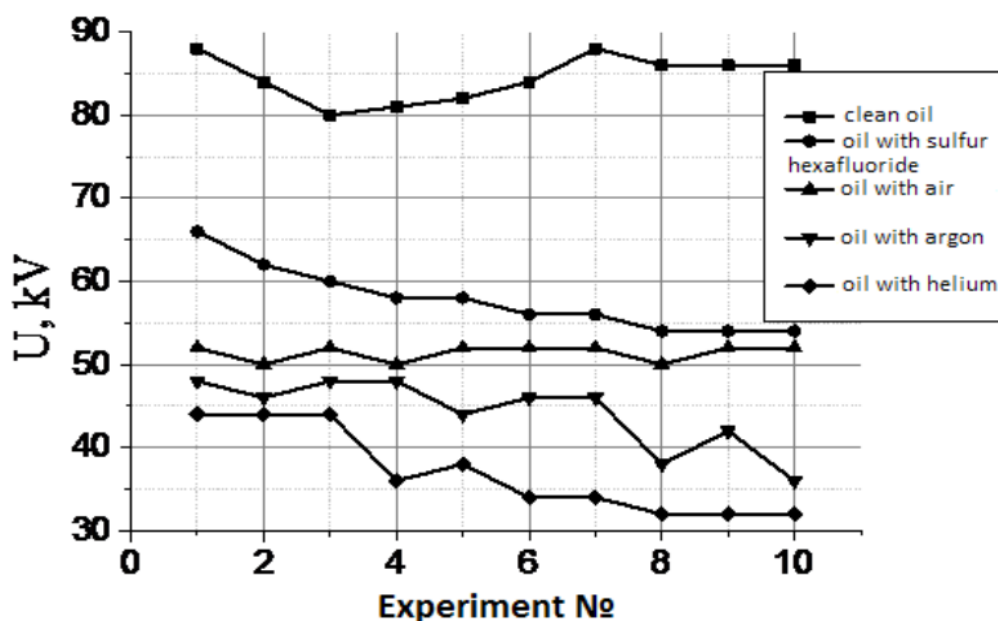


Рисунок 1.3 - Пробивное напряжение чистого трансформаторного масла и масла, аэрируемого одиночными газовыми пузырьками воздуха, аргона, гелия и гексафторида серы [24]



Это может быть связано с увеличением концентрации газов, растворенных в трансформаторном масле, так как масло не заменялось после каждой подачи порции газовых пузырьков. Которые, как будет показано в главе 4, могут довольно интенсивно растворяться в масле. На это также указывает то, что авторы статьи прямо говорят о том, что процедура дегазации не проводилась и трансформаторное масло в разрядной камере находилось в постоянном контакте с воздухом. Таким образом мы можем утверждать, что масло в момент проведения исследования было насыщено воздухом и именно поэтому результаты, полученные в случае использования чистого масла и масла с воздушными пузырьками наиболее корректные. Высокоскоростное видеоизображение разряда (Рисунок 1.4) иллюстрирует последствия ЧР в свободно плавающем пузырьке, а не собственно ЧР. Стоит указать на то, что по представленной картине (Рисунок 1.4) [24] мы не можем утверждать о том, что пузырек был одиночным. Это важно, потому что пробой мог произойти по цепочке пузырьков.

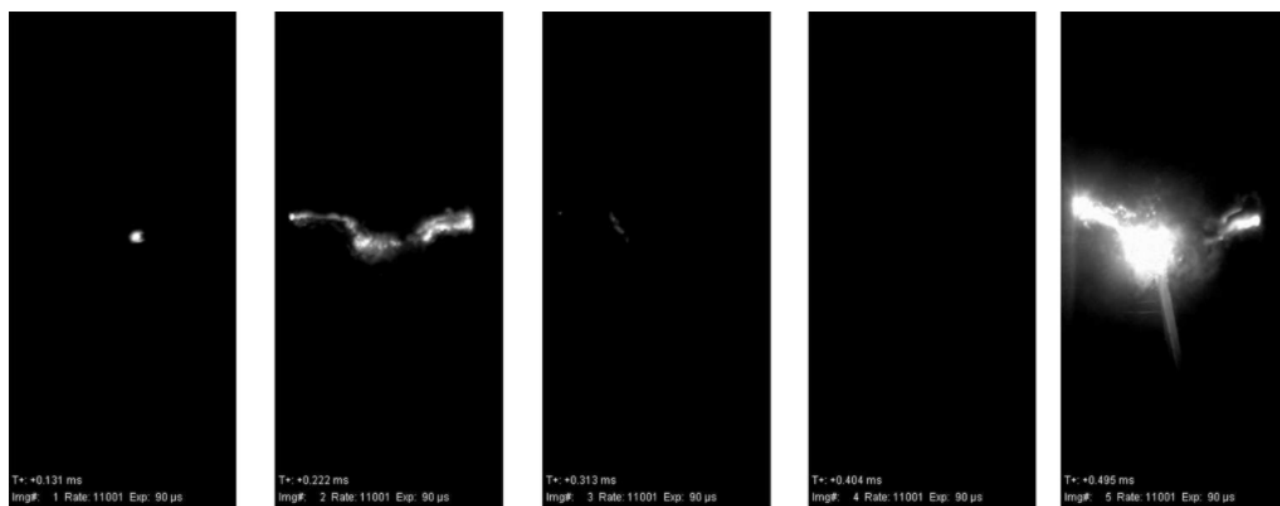


Рисунок 1.4 – Часть высокоскоростного видеоизображения процесса пробоя в трансформаторном масле с частотой кадров 11000 кадров/с и экспозицией 90 мкс [24]

Наиболее близким, по содержанию, является исследование роли пузырьков воздуха в пробое трансформаторного масла, находящегося в движении [25]. В данной работе построена система циркуляции жидкости (Рисунок 1.5), в которой,

в потоке трансформаторного масла, оптическим методом регистрируются поведение газовых пузырьков и разрядные процессы в них, которые, в свою очередь, приводят к пробоям масляного зазора.

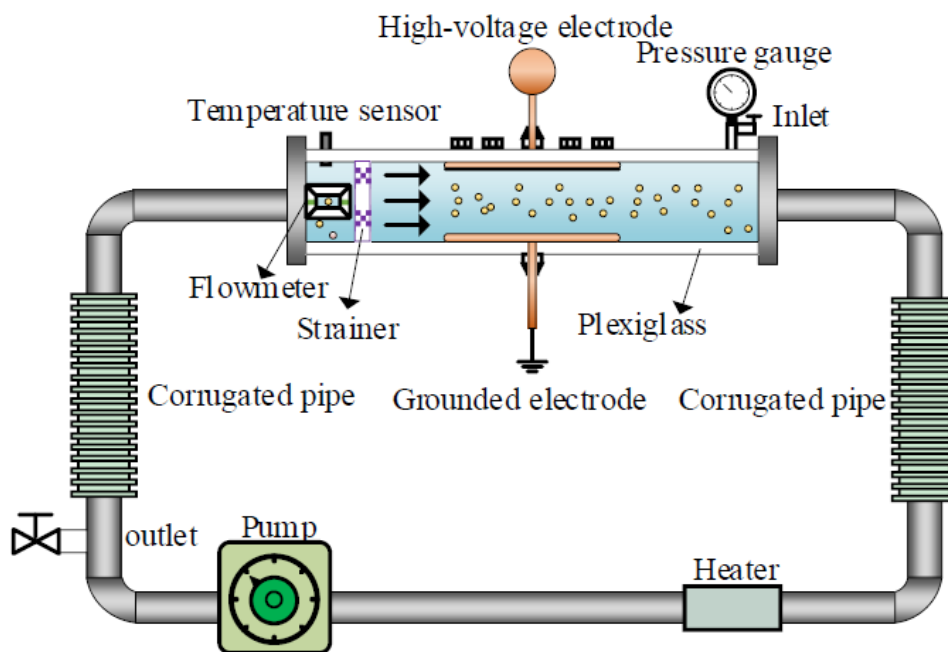


Рисунок 1.5 – Экспериментальная установка [25]

Основной масляный канал был расположен горизонтально и был выполнен оргстекла (Plexiglass). В основной масляный канал была помещена пара параллельных пластинчатых электродов (High-voltage and Grounded electrodes) диаметром 200 мм, с зазором 10 мм. Для контроля размеров пузырьков газа использовался фильтр (Strainer) с равномерным размером сетки 4 мм. Масло приводилось в движение насосом (Pump), а скорость измерялась ультразвуковым расходомером (Flowmeter). Температура масла регулировалась с помощью системы управления, включающей нагреватель и датчик температуры (Temperature sensor). Для наблюдения за поведением газовых пузырьков и инициированием пробоя использовалась камера Photron SA5 с максимальной частотой дискретизации 250000 кадров в секунду.

В исследовании отражены следующие результаты:

- показано типичное поведение пузырьков и соответствующий этому электрический сигнал при пробое масла в отрицательном и положительном полупериодах приложенного напряжения;
- зарегистрированы ЧР в пузырьках, которые предшествуют пробое трансформаторного масла;
- сделан вывод о том, что рост пузырьков непосредственно индуцирует пробой трансформаторного масла (Рисунок 1.6, а), без стадии инициирования стримера (при пробое масла в отрицательном полупериоде приложенного напряжения);
- сделан вывод о том, что при пробое масла в положительном полупериоде приложенного напряжения на кончике пузырька образовывались и постепенно становились длиннее выступы (Рисунок 1.6, б), которые приводили к пробое трансформаторного масла.

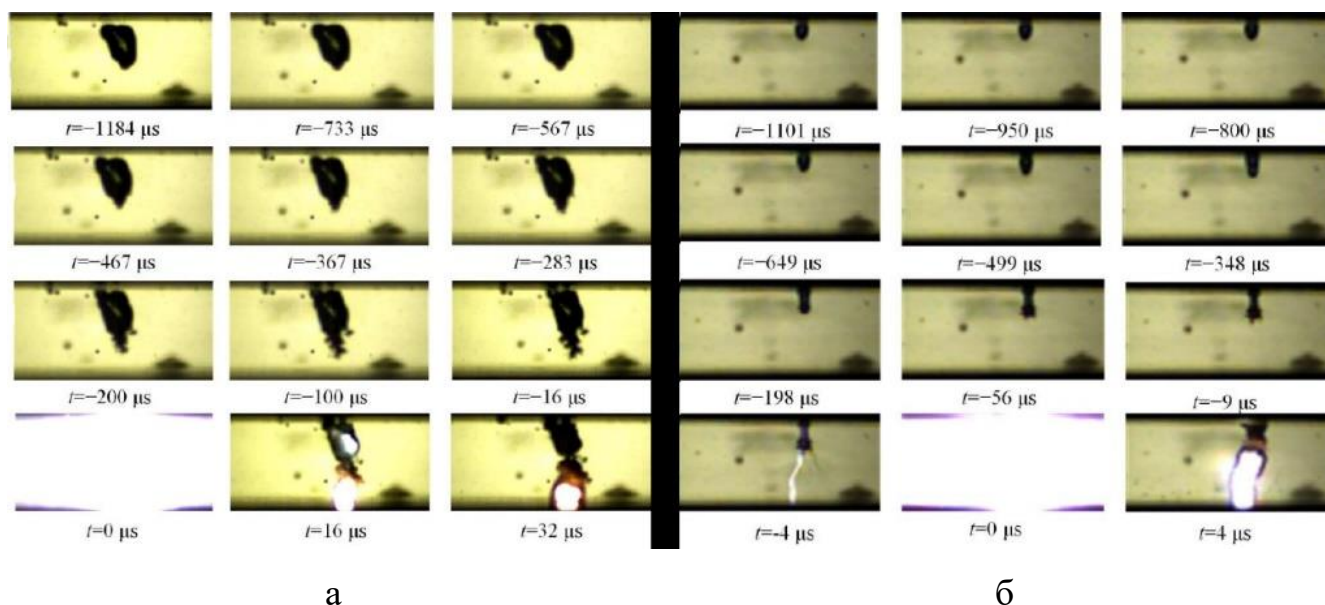


Рисунок 1.6 – Динамика пузырьков при пробое на отрицательном (а) и положительном (б) полупериодах. Камера была настроена на 60000 кадров в секунду [25]

Стоит отметить, что исследование проведено на высочайшем уровне, с использованием самого передового оборудования. И все поставленные задачи, касающиеся определения влияния пузырьков воздуха на электрическую прочность трансформаторного масла, были полностью решены. Однако, в части исследования процессов, происходящих внутри пузырька, существует несколько негативных факторов, которые связаны с конфигурацией экспериментальной установки и методикой проведения исследования:

- масло приводилось в движение при помощи насоса, в котором, при движении ротора, создаются области с пониженным давлением, в результате чего происходит разрушение пузырьков, результатом которого является насыщение масла воздухом (снижается электрическая прочность). В результате в объеме масла, а также на поверхности верхнего высоковольтного электрода могла образоваться взвесь из микропузырьков газа. Вблизи электрода возникает неподвижный слой масла, с находящимися в нем микропузырьками. Таким образом, мы не можем утверждать о том, что развитие ЧР началось именно в определенном пузырьке. Размер пузырьков, как видно из приведенных в работе [25] картинок, сильно различается и варьируется от 5 до 0,1 мм в диаметре (видимые);

- из приведенных авторами иллюстраций можно сделать вывод о том, что фактически все приведенные случаи пробоев трансформаторного масла происходили только тогда, когда пузырек соприкасался с высоковольтным электродом. В то же время в модели рассматриваются случаи одиночного пузырька.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в работе были зарегистрированы стримеры, которые развиваются с границ пузырьков при средней напряженности электрического поля  $E_{cp} \approx 4.2$  кВ/мм и приводят к пробоему масляного промежутка. Подчеркнем, что это значение напряженности намного меньше напряженности поля при которой развиваются стримеры в чистом масле. Рассмотрим этот момент более подробно. Обычно стримерный разряд развивается в виде медленного дозвукового кустообразного непрозрачного стримера либо нитевидного

сверхзвукового прозрачного стримера [32]. Условия развития стримеров и их виды могут изменяться под действием многих факторов, таких как форма волны приложенного напряжения, конфигурация электрода, характеристики жидкости [33, 34], добавки [35] и т. д. Подчеркнем, что экспериментальные результаты [36] показали, что напряженность поля при инициировании стримеров в системе с острым электродом (радиус кривизны острия  $r \approx 1$  мкм) обычно находятся в диапазоне 5-10 МВ/см. Стримеры, развивающиеся из пузырьков воздуха [25] возникают при напряженности поля в 100 раз меньше.

Поскольку в работе [25] развитие стримеров в трансформаторном масле наблюдалось только при нахождении пузырьков на электроде – исследование стримеров, развивающихся с границ свободно плавающих пузырьков требует дополнительного изучения.

## **1.2 Влияние примесей на электрическую прочность трансформаторного масла**

Минеральное масло - один из ключевых компонентов маслонеполненного высоковольтного электрооборудования. Оно служит в основном для двух целей: во-первых, как жидкая изоляция; во-вторых, в качестве охлаждающей жидкости для отвода тепла от обмоток. В последнее время большое количество исследований направлено на исследование влияния нанодобавок в трансформаторное масло, на его эксплуатационные характеристики [37-42]. Наножидкости - это дисперсия наноматериалов в жидкие образцы [43]. В статье [44] авторы обсуждают различные наножидкости, их свойства и характеристики, а также недостатки. В статье [45] подробно описаны 2 основных способа приготовления наночастиц. Первый заключается в одновременном создании и диспергировании наночастиц в жидкости [46]. При этом отсутствует необходимость сушки, хранения, транспортировки и диспергирования наночастиц, поэтому агломерация наночастиц сводится к минимуму, а стабильность жидкостей повышается [47]. Однако в полученной наножидкости присутствует агент-носитель, который требуется удалить. Процесс

приготовления наножидкостей таким способом дорогостоящий и не используется в промышленных масштабах. Кроме того, в одностадийном методе большинство синтезированных наножидкостей представляли собой наночастицы на основе металлов, таких как медь, серебро и вольфрам [45]. Второй метод – двухэтапный. Он включает в себя приготовление наночастиц в сухом виде с помощью химических или физических методов. Позже порошкообразные наночастицы диспергируются в основной жидкости с использованием ультразвукового диспергатора. Несмотря на то, что этот процесс более длительный, производство наножидкости более экономично, особенно в крупных масштабах. Наножидкости на основе  $Fe_3O_4$  и трансформаторного масла, полученные таким способом, привели к увеличению его электрической прочности [48]. В другом случае этот метод использовался для синтеза наножидкости на основе трансформаторного масла и наночастиц  $TiO_2$ . Наножидкость с концентрацией наночастиц 0,00625 % об. имела повышенную электрическую прочность, по сравнению с чистым трансформаторным маслом [49]. В работе [50] наножидкость на основе  $Al_2O_3$  и трансформаторного масла с содержанием наночастиц до 4 % об. также показала увеличение электрической прочности относительно чистого трансформаторного масла. В работе [51] синтезировали наножидкости на основе трансформаторного масла и графена, концентрация которого изменялась в пределах от 0,01 до 0,1 % об.

Все эти работы объединяет 1 проблема – нестабильность наножидкостей на основе трансформаторного масла. Стабильность - один из ключевых параметров, обеспечивающих функционирование наножидкости и более длительный жизненный цикл. Обеспечение длительного жизненного цикла наножидкости представляет собой проблему из-за агломерации наночастиц. Скопление наночастиц может быть связано с силами притяжения Ван-дер-Ваальса или электростатическими силами отталкивания. Этот эффект можно снизить, используя различные ПАВ. Так, в работе [52] поверхность наночастиц оксида алюминия была модифицирована путем обработки с использованием олеиновой кислоты и ксилола. Результаты показали, что обработанные наножидкости не проявляют осадения в течение месяца, что продемонстрировано на рисунке 1.7.

Однако из вида образца наножидкости (Рисунке 1.7, б) видно, что среда потемнела, что указывает на агломерацию наночастиц.

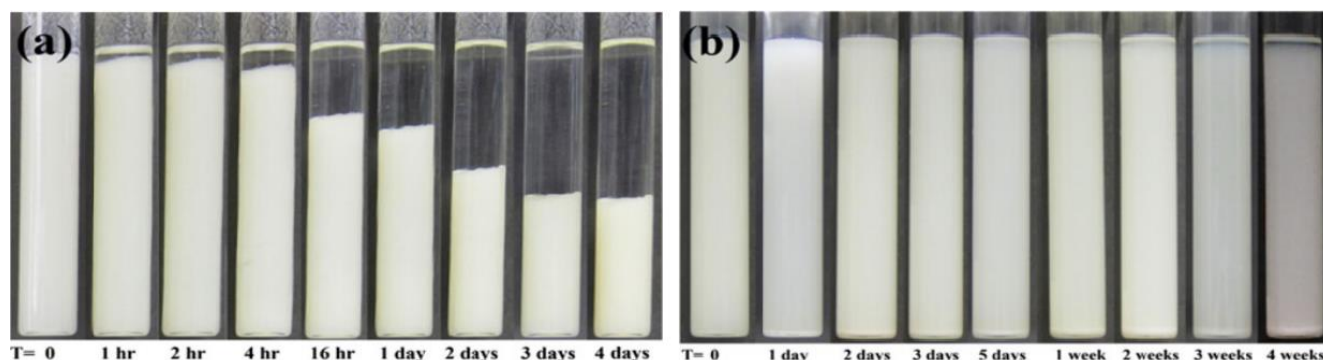


Рисунок 1.7 – Наглядная демонстрация агломерации и осаждения наночастиц а) без добавления ПАВ б) с добавлением ПАВ [52]

Исследования, связанные с изучением влияния углеродных нанотрубок в последнее время набирают все большую популярность [44, 42, 53]. Сами по себе углеродные нанотрубки являются привлекательным материалом для наножидкости из-за их уникальной структуры и замечательных механических, тепловых и электрических свойств [50, 54, 55]. Базовым элементом нанотрубок является углерод. В статье [53], исследуется наножидкость на основе минерального трансформаторного масла, смешанного с карбоновыми нанотрубками. В данной статье представлены результаты исследования электрической прочности трансформаторного масла с диспергированными в нем углеродными нанотрубками. Измерения электрической прочности проводились в соответствии со стандартами ИЕС 60156. Для исследования использовались наножидкости с различной концентрацией углеродных нанотрубок в них. Углеродные нанотрубки имели следующие характеристики, приведенные в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики углеродных нанотрубок

Параметр	Значение
Наружный диаметр	<8 нм
Внутренний диаметр	2-5 нм
Длина	10-30 мкм
Чистота	95%

Процесс обработки наножидкости ультразвуком был реализован следующим образом. Излучатель диаметром 12.7 мм ультразвукового дезинтегратора Sonicator Q700, номинальной мощностью 700 Вт и частотой до 20 кГц опускался в емкость с наножидкостью. Амплитуда ультразвукового преобразователя была установлена на 10%, а временной цикл диспергирования был установлен в режиме 5 секунд воздействия и 3 секунд перерыва. Длительность воздействия составляла 60 минут. После обработки ультразвуком, для снижения влажности полученной наножидкости, пробу сушили в духовке при температуре 85°C при давлении менее 5 мбар в течение 48 часов. Затем образец охлаждали до температуры окружающей среды. (27 ° C) в течение 24 часов в условиях вакуума. Испытания, направленные на определение электрической прочности наножидкости, проводились на «BAUR Automatic 50 Hz Electrical Breakdown Tester». В соответствии со стандартом IEC 60156, были выбраны сферические электроды с зазором 2,5 мм [56]. Всего было проведено 50 измерений для каждого образца. Полученные результаты сведены в Таблицу 1.2.

Остается неясным, обрабатывалось ли исходное масло также, как и масло с нанотрубками. Кроме того, неясно, как будет меняться электрическая прочность со временем, при седиментации и агломерации наночастиц.



Таблица 1.2 – Результаты исследования [56]

Образцы масла (концентрация углеродных нанотрубок), г/л	Среднее значение пробивного напряжения, кВ	Стандартное отклонение	Эффект, %
0	29,75	4,64	100
0,01	51,68	5,85	173,7
0,03	43,07	7,1	144,76
0,05	38,46	5,43	129,25
0,1	29,25	2,6	98,32
0,2	24,04	1,19	80,78

Подобные результаты, а именно увеличение электрической прочности трансформаторного масла, при добавлении в него наночастиц, описываются во многих работах. В выводах исследователи говорят о перспективе применения наножидкостей в высоковольтном оборудовании. Однако, ранее в этой же статье, авторы сами высказывают предположение о том, что снижение электрической прочности наножидкости при концентрации углеродных нанотрубок более 0,1 г/л может быть связано с наличием их агломераций. Связывают они это с недостаточным диспергированием проб. Можно предположить, что при увеличении концентрации углеродных нанотрубок уменьшается время, за которое они образуют агломераты, снижающие электрическую прочность наножидкости. Было бы интересно увидеть результаты измерений непосредственно после диспергирования, а также по прошествии нескольких дней или недель.

Таким образом, инициирование разряда в масле, содержащем как пузырьки, так и наночастицы не изучалось. Более того, исследования были направлены на увеличение электрической прочности за счет наночастиц. Поведение наножидкости на основе трансформаторного масла с нанотрубками Oscial под действием электрического поля также не изучалось.

### 1.3 Поведение капель воды в масле

Вода в трансформаторе преимущественно растворена в бумажной изоляции из-за высокой растворимости. В работе [65] представлен обзор классических кривых равновесия воды в масле, а также предоставлена полезная информация о взаимосвязях между ними и их достоверности. Присутствие влаги в трансформаторе ухудшает электрические и механические свойства его изоляции. Как правило, срок службы изоляции уменьшается вдвое на каждое удвоение концентрации влаги [66], а скорость термического износа бумаги пропорциональна содержанию воды [67]. Также электрические разряды могут возникать в области повышенной напряженности электрического поля из-за увеличения влажности, которая вызывает локальное уменьшение электрической прочности изоляции. При этом также наблюдается более высокая интенсивность ЧР [68]. Также при десорбции воды из целлюлозы увеличивается локальная концентрация газов в масле [69], что может стать причиной образования пузырей. О том, что вода является основным "врагом" электрической изоляции было сказано ещё в классических работах 30-х годов [57]. В частности, при добавлении воды от 0.001 % и до 0.1 % электрическая прочность падает примерно в 2-3 раза. Считается, что это связано с образованием эмульсии воды в масле [57]. Кроме того, общепринятое объяснение нетривиальной температурной зависимости электрической прочности от температуры, выражающееся в наличии максимума электрической прочности при температуре 50-70 °С заключается в росте растворения эмульгированной воды с ростом температуры. Сегодня известно, что в окисленных маслах молекулы воды связываются с полярными примесными соединениями в масле, тем самым образуя связанную форму воды. О влиянии связанной воды на снижение электрической прочности масла в данных экспериментах ничего не было сказано. Тогда считалось, что существует три формы воды в масле. В настоящее время известно о существовании химически связанной воды, физически связанной формы воды, растворенной, эмульгированной и слоевой.

В современное понимание проблем воды в трансформаторном масле внесли вклад много исследователей [58-61]. По жидкой электрической изоляции, её поведению, свойствам, влиянию примесей и т.п. проводится несколько конференций: по диэлектрическим жидкостям ICDL, по электрогидродинамике и электрофизике жидкостей: ISEHD, СПФЭГД (Санкт Петербург), по высоковольтной технике и приложениям ISH, ISHVE. Вопросами зажигания электрического пробоя занимались Lewis, Sharbaugh, M. Zahn, A. Куперштох, A. Denat и др. Наиболее продвинутая группа работает во Франции, в Гренобле. Ранее это была Лаборатория Диэлектрических Материалов, организованная выдающимся ученым N Felici, потом возглавляемая его учениками R. Tobazeon, J.P. Gosse, A. Denat, P. Atten, O. Lesaint [62-64]. Ими были предложены и обоснованы механизмы электропроводности жидкостей, способы повышения электрической прочности, в частности удалением ионогенных примесей, включая воду. Также их заслугой являются предложенные механизмы зажигания разряда и его распространения в виде стримеров различного типа.

По нашему мнению, с точки зрения эксплуатации ВМЭО, наиболее интересны процессы образования [70-75] и поведения [77-83] капель воды в трансформаторном масле. Рассмотрим 2 наиболее значимые экспериментальные работы. В первой [73] авторы экспериментально исследуют процесс образования пузырьков пара и капель в рапсовом и трансформаторном маслах путем выхода влаги из изоляционной бумаги, с разной концентрацией влаги в ней. Исследование проводилось на экспериментальной установке (Рисунок 1.8), которая состояла из прозрачной герметичной ячейки для визуального наблюдения за пузырьками.

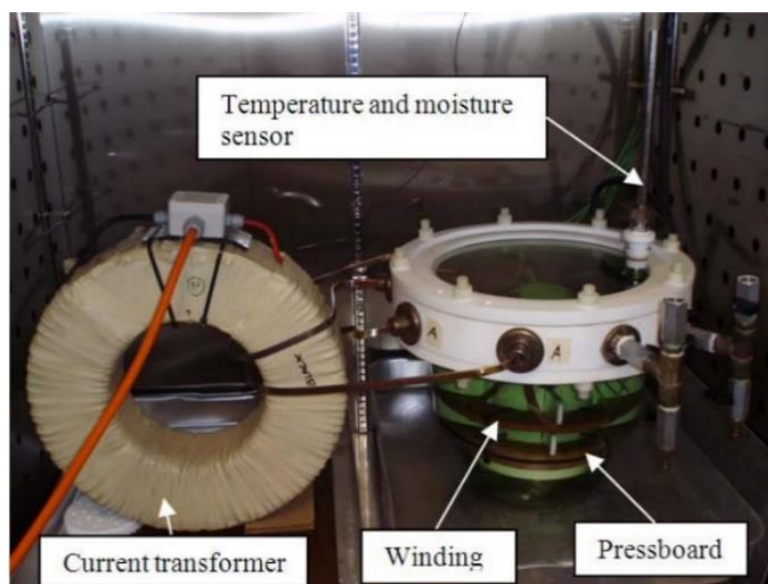


Рисунок 1.8 – Установка, используемая для исследования образования пузырьков пара и капель воды [73]

Она была заполнена маслом, в котором располагались обмотки из 2 медных проводников, каждый из которых был обернут 4 слоями изоляционной бумаги. Эти проводники плотно наматывались на тефлоновую основу, образуя диск с 16 витками (Рисунок 1.9). Концы обмоток соединялись при помощи латунных стержней с трансформатором тока, для подачи тока на обмотки. Для измерения температуры в катушки между витками 7-8, 8-9, 9-10 и 10-11 были встроены термопары (Рисунок 1.9). Нумерация ведется от центра катушки.

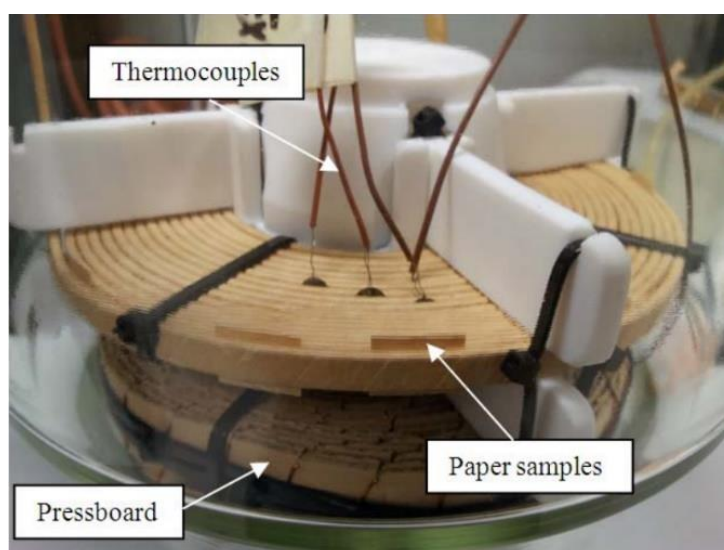


Рисунок 1.9 – Крупный план обмоток, обернутых изоляционной бумагой [73]

Перед проведением исследований масло подвергалось сушке и дегазации вакуумированием в течение 72 часов при температуре 60 °С. Бумага и картон предварительно не сушились. Экспериментальная установка (Рисунок 1.8) нагревалась в большой печи до температуры 55 °С для уравнивания концентрации воды в масле и изоляционной бумаге.

Подача напряжения на экспериментальную установку производилась в 3 этапа, которые заключались в десятиминутном воздействии током частичной нагрузки, затем в десятиминутном воздействии током номинальной нагрузки и в десятиминутном воздействии током перегрузки (Рисунок 1.10). Номинальная нагрузка была рассчитана, опираясь на данные с термопар. Ток, при котором температура в самой горячей точке достигала ~ 98 °С считался номинальным.

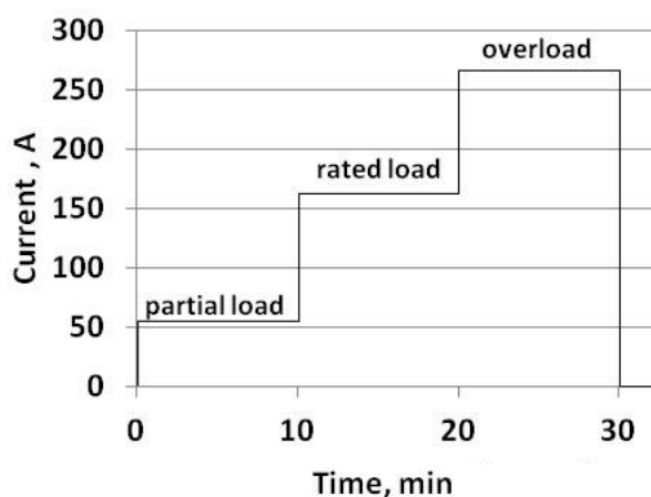


Рисунок 1.10 – Значение тока и продолжительность воздействия, характерные для всех экспериментов. Воздействие током перегрузки увеличивалось на 10 минут, если капли воды не образовывались в стандартном режиме испытаний [73]

В ходе исследований авторы зарегистрировали образование пузырьков газа и капель воды в масле после непродолжительного воздействия напряжением. При этом механизм выхода влаги из бумаги в масло здесь – температурный. Так, при воздействии током перегрузки температура обмоток в некоторых случаях достигала 170 °С. На рисунке 1.11 представлены диаграммы, показывающие

зависимость между концентрацией влаги в бумажной изоляции и температурой обмоток, при которой происходит выход воды в масло.

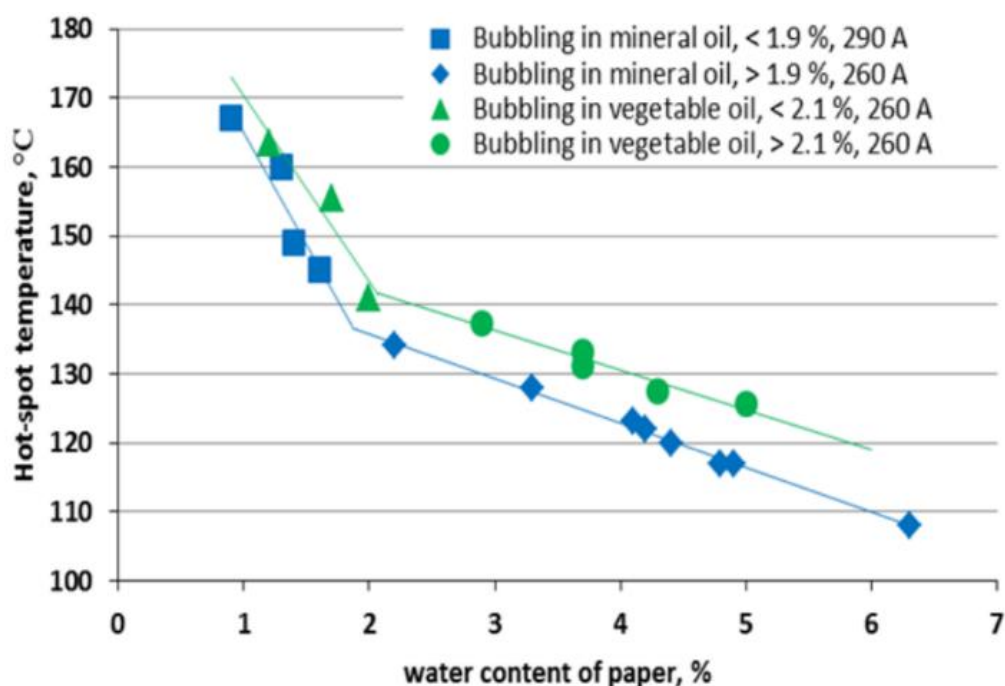


Рисунок 1.11 - Сравнение температур образования пузырьков в минеральном (синяя кривая) и растительном (зеленая кривая) маслах [73]

Стоит отметить, что в соответствии с [76] допускается увлажнение изоляции обмотки до 2% для вновь вводимых и выходящих из капитального ремонта трансформаторов и до 4% - для находящихся в эксплуатации. Непосредственно увлажнение определяется по влагосодержанию заложенных в бак образцов твердой изоляции при вводе в эксплуатацию и при капитальных ремонтах трансформаторов 110 кВ и выше мощностью 60 МВА и более. При этом содержание влаги определяется титрацией по методу Карла Фишера. Таким образом ученые [73] доказали, что при локальном увеличении температуры обмоток до  $\approx 120$  °C, в самом запущенном случае, будет наблюдаться интенсивное образование капель воды в трансформаторном масле. Отметим, что температуры в горячих точках трансформатора, при наличии прочих неисправностей, могут достигать значений выше 220 °C, так как выход этилена в результате разложения масла начинается с этой точки (Рисунок 1.12).

Полученные в работе [73] данные показывают необходимость и актуальность исследования поведения капель воды в трансформаторном масле под действием переменного электрического поля.

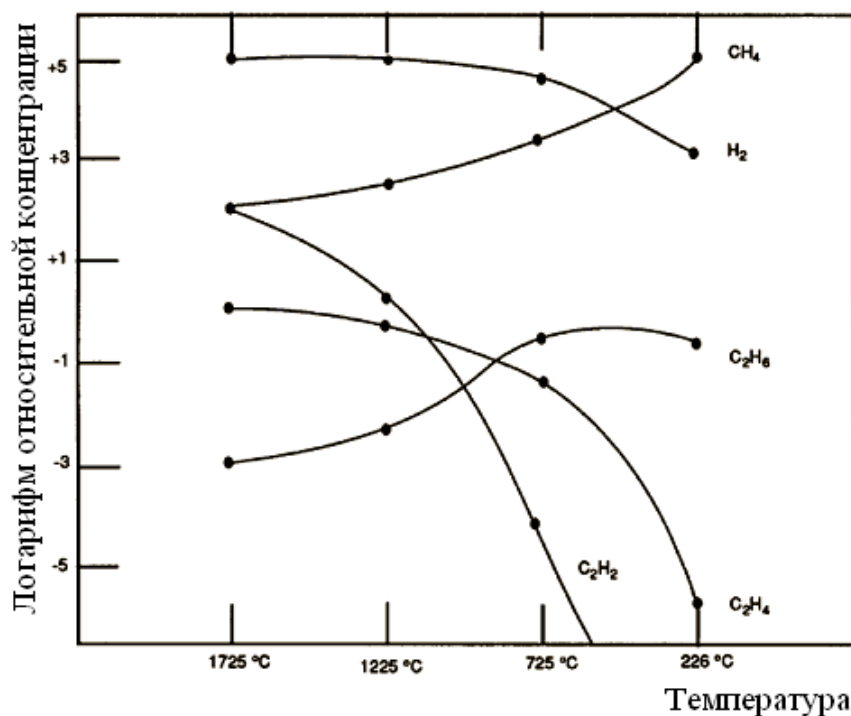


Рисунок 1.12 - Парциальные давления газов (по Галстеду) в зависимости от температуры [110]

В настоящее время известна только 1 работа, посвященная экспериментальному исследованию поведения капель воды в масле под действием электрического поля [77]. В ней автор исследует поведение капель воды в трансформаторном масле под действием однородного постоянного электрического поля.

Экспериментальная установка состоит из источника высокого напряжения постоянного тока (100 кВ), экспериментальной ячейки, в которой установлены плоскопараллельные электроды, и высокоскоростной камеры (300 кадров/с). Ось, на которой расположены электроды – горизонтальная. Межэлектродный зазор составляет 10 мм. Вода для экспериментов бралась из системы водоснабжения. Капли вводились в масло с помощью шприца, а напряжение подавалось, когда

капли достигали оси электродов. Всего в результате серии экспериментов автором было зарегистрировано 3 различных типа поведения капли при разных условиях.

В первом случае капля воды помещалась в непосредственной близости от одного из электродов (в представленном на рисунке 1.13 случае - катода). Капля асимметрично удлинялась в направлении электрического поля (Рисунок 1.13). Автор отмечает, что удлинение капли воды примерно в два раза больше первоначального диаметра уже через 0,1 сек. Удлиненная капелька имеет форму груши. Наблюдается формирование и отделение части капли (смесь воды и водяного пара). В момент, когда капля касается второго электрода, по ней начинает течь ток. В этом случае деформация капли несимметрична.

Во втором случае, когда капля помещается по центру между двумя электродами, деформация симметрична (Рисунок 1.14). Капля воды удлиняется до состояния неустойчивости. В этом случае силы на ее полюсах настолько важны, что приводят к ее разрыву на три части. Все три капли продолжали удлиняться и за счет усиления электрического поля на их полюсах происходил перегрев воды, в результате чего образовывалась смесь воды, масла и пара. В дальнейшем это приводило к перекрытию межэлектродного зазора.

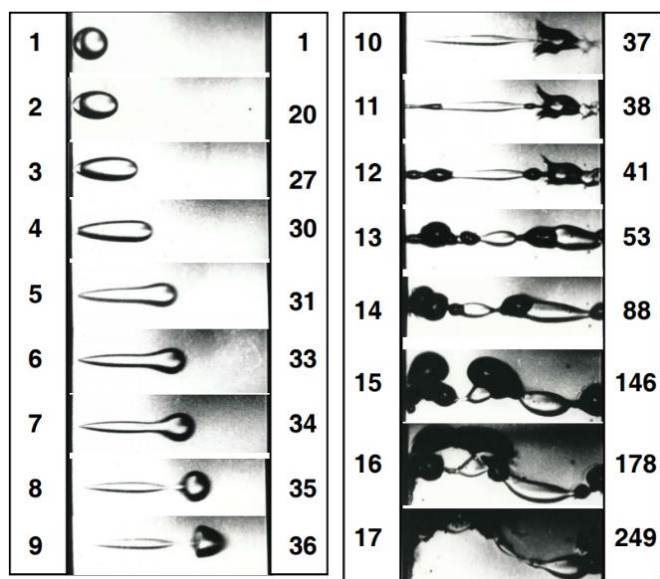


Рисунок 1.13 – Поведение капли воды, помещенной вблизи электрода в трансформаторном масле. Напряжение постоянного тока увеличилось с 0 до 10 кВ в течение 1,5 с. Катод находится слева на фотографиях [77]



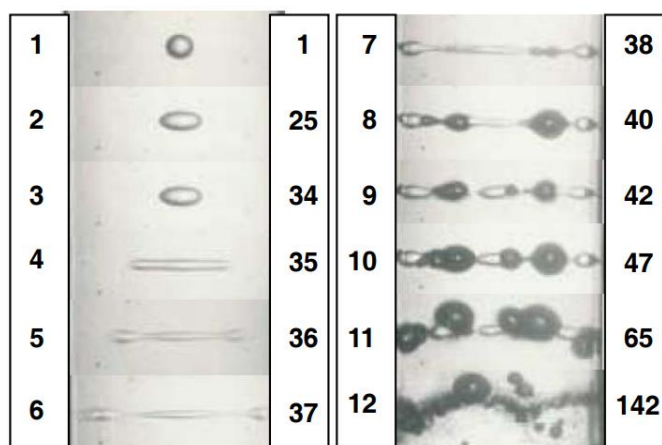


Рисунок 1.14 - Деформация капли воды, помещенной в центре электродов [77]

В третьем случае четыре капли воды одинакового размера были размещены примерно на одной оси электродов. На рисунке 1.15 показано, что капли удлиняются таким же образом, как описывалось ранее. В момент отсутствия напряжения они имеют сферическую форму. Затем, по мере увеличения напряжения капли удлиняются и объединяются в сплошной водяной мостик, по которому начинает течь ток. При этом вода сильно нагревается и начинается процесс парообразования.

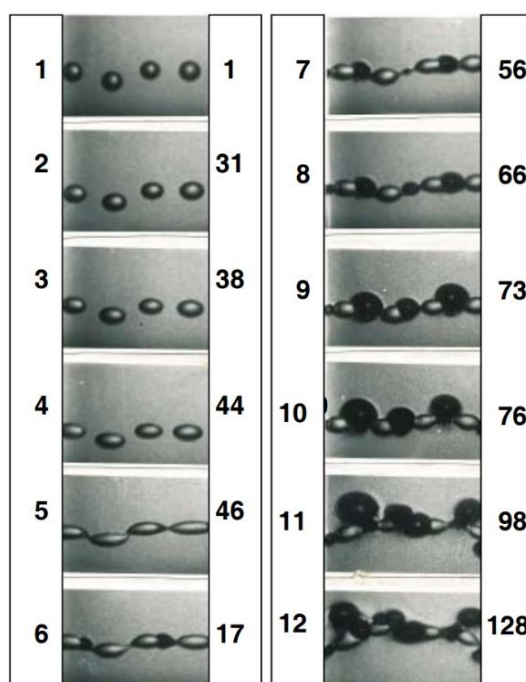


Рисунок 1.15 – Поведение нескольких капель воды, располагающихся на одной оси, под действием постоянного электрического поля [77]

В качестве основного вывода по этой части работы можно утверждать, что поведение капель при переменном напряжении малоизучено и исследования, направленные на изучение этих процессов актуальны, и имеют большую практическую ценность.

#### 1.4 Газообразование и диффузия

**Газообразование** играет важную роль, как в функционировании электрических высоковольтных устройств, так и в диагностике возникающих дефектов. Как уже упоминалось выше, газы в масле могут образоваться за счет различных причин. Далее эти газы могут выделиться в форме пузырьков, пузырьки могут быть занесены потоками жидкости в области сильного поля, а также могут растворяться при изменении условий. Из способов газообразования наиболее очевидным является образование за счет разрядов.

В настоящее время существуют две группы методов, направленных на определение газостойкости изоляционных жидкостей. Основное отличие в методах этих групп заключается в условиях, при которых создаются электрические разряды, приводящие к разрушению испытуемых жидкостей. Испытания проводятся в так называемых реакторах с ионизированным газовым промежутком [84-86] (Рисунок 1.16). К таким методам относится, например, модифицированный Пирелли, принятый в качестве стандарта МЭК для кабельных масел [87].

Реактор представляет собой стеклянную колбу (1), в которую наливается испытуемая жидкость (2) так, что в колбе остается свободное пространство, заполняемое водородом, азотом или воздухом. Электродная система выполнена в виде коаксиальных цилиндров. Высоковольтный электрод (3) расположен так, что часть его находится над уровнем жидкости в газовом пространстве. Роль низковольтного электрода выполняет часть внешней цилиндрической поверхности корпуса (4), на которую нанесено проводящее покрытие.

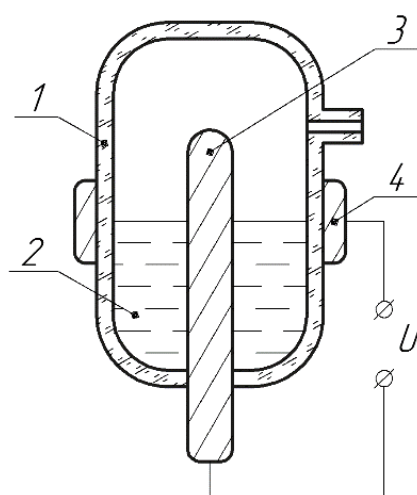


Рисунок 1.16 - Реактор с "ионизированным газовым промежутком":

1 – стеклянная колба; 2 – изоляционная жидкость; 3 – высоковольтный электрод;  
4 – низковольтный электрод

Электрические разряды создаются в газовом пространстве ячейки, над поверхностью жидкости, и разрушение жидкости происходит в результате бомбардировки ее поверхности частицами, образующимися при разряде. Как известно, ЧР в газах при переменном напряжении отличаются стабильностью характеристик, как по фазам возникновения, так и по амплитуде и частоте следования отдельных ЧР энергия, уходящая на разрушение жидкости в единицу времени приблизительно одинакова. Это обстоятельство позволяет для количественной оценки стойкости изоляционных жидкостей к газообразованию использовать среднюю скорость газовыделения (газопоглощения) [84], либо количество газа, выделившегося или поглощенного за определенное время испытаний. Так, например, в соответствии с рекомендациями МЭК оценку изоляционных жидкостей производят двумя методами. Первый метод состоит в измерении скорости выделения или поглощения газов в течение 2-х часов в атмосфере водорода при температуре 80 °С и напряжении 10 кВ. Этот метод рекомендуется применять для изоляционных жидкостей, используемых в замкнутых системах, таких как кабели и конденсаторы. Второй метод испытаний на газостойкость, рекомендующийся для жидкостей, применяемых в негерметичном оборудовании, состоит в измерении объема газа, выделившегося

(поглощенного) в атмосфере азота при 80 °С и напряжении 12 кВ. В работе [88] показано, что, несмотря на методические различия, оба метода позволяют примерно одинаково классифицировать испытуемые жидкости. Кроме реактора с ионизированным газовым промежутком, многие исследователи применяют другие типы испытательных ячеек, принципиально отличающиеся тем, что в них электрические разряды создаются непосредственно в жидкости. Исследования проводятся либо с использованием конденсаторных секций [89, 90], либо в моделях, имитирующих дефекты, имеющие место в реальных конденсаторах [91, 92] (Рисунок 1.17)

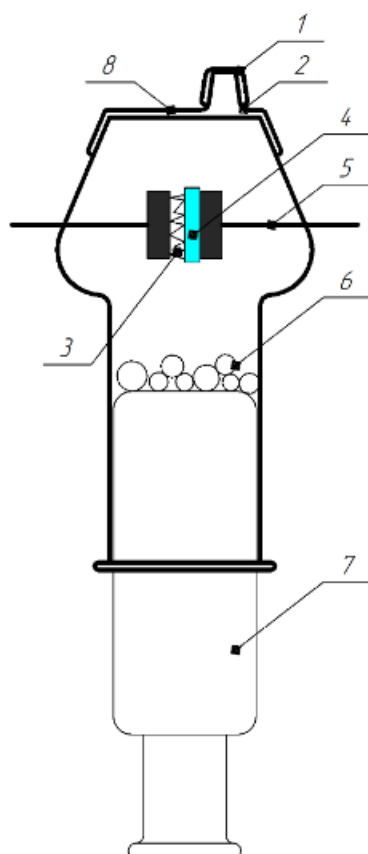


Рисунок 1.17 – Ячейка для исследования разрядов в жидкости

1- колпачок; 2- проботборный штуцер; 3- фольга; 4- стеклянный экран; 5- электроды; 6- стеклянные шарики; 7- поршень; 8- крышка на шлиф-поверхности

В этом случае критерием оценки стойкости жидкости к газообразованию является, с одной стороны, одна из характеристик ЧР напряжение зажигания ЧР

[90, 93], средний ток ЧР [94], мощность ЧР [95], а с другой стороны - либо количество выделившегося газа, либо появление первого газового пузырька начало видимого газообразования [91, 96] Следует отметить, что большинство исследователей [89, 97, 98, 99] в качестве критерия стойкости изоляционных жидкостей их разложении под действием ЧР использует величину, равную количеству газообразных продуктов разложения, выделяющихся в объеме изоляционной жидкости при рассеивании в ней энергии ЧР 1 Дж, Эта величина получила название коэффициента газообразования.

В работах [100] доказано, что величиной, определяющей связь между интенсивностью ЧР и вызываемыми ими разрушениями масло - пропитанной изоляции является энергия ЧР. Измерение энергии ЧР является одним из наиболее ответственных и сложных этапов при исследовании газообразования в изоляционных жидкостях. ЧР в масле имеют нестабильный характер по фазе, времени возникновения и амплитуде. Для таких случаев авторы работы [100] при определении энергии, рассеиваемой в масле, пользовались следующей расчетной формулой:

$$W_{ч.р.і} = \sum_I^{N_{ч.р.}} U_{ч.р.і} q_{ч.р.і}$$

где  $U_{ч.р.і}$  – мгновенное значение напряжения в момент возникновения  $i$  – го ЧР;

$q_{ч.р.і}$  – кажущийся заряд  $i$  -го ЧР;

$N_{ч.р.}$  – количество ЧР за время  $t$ .

Для измерения энергии  $W_{ч.р.і}$  – используют различные измерительные устройства. В одних случаях применяются аналоговые умножители [101, 102], подсчитывающие произведение  $U_i \times q_i$  и далее суммирующие с помощью интегратора эти значения для выбранного интервала времени  $t$ . В других случаях [103] входные сигналы, пропорциональные  $U_i$  и  $q_i$  преобразуются в сигналы, пропорциональные мощности ЧР.

Необходимо отметить, что, как следует из приведенного обзора, в настоящее время отсутствует стандартизованная методика оценки стойкости трансформаторных масел к газообразованию. Поэтому многие лаборатории

разрабатывают свои собственные методики. Однако, к сожалению, в этом случае результаты исследований, полученные в различных лабораториях, могут расходиться, что не позволяет получить однозначные выводы по тем или иным типам изоляционных жидкостей. К тому же, очевидно, значение коэффициентов газообразования для одной и той же жидкости, при разных методах воздействия на масло будут отличаться друг от друга. Несмотря на то, что коэффициенты газообразования относят именно к типу изоляционной жидкости, механизм протекания ЧР в объеме жидкости до сих пор остается под вопросом, а коэффициенты газообразования получают при: разряде в парогазовой среде (Рисунок 1.15); либо в объеме жидкости при скользящем разряде (Рисунок 1.16). Подчеркнем, что при скользящем разряде вдоль поверхности раздела жидкого и твердого диэлектриков на поверхности диэлектрика остается т.н. осевший заряд [104]. Влияние осевшего заряда трудно учесть, т.к. на внешнюю напряженность поля накладывается поле от неизвестного заряда. Это делает определение энергии неоднозначным.

Как отмечалось выше, образовавшиеся газовые пузырьки могут также и исчезнуть путем растворения газов в жидкости. Этот процесс определяется двумя параметрами: растворимостью газов и **диффузией** молекул.

Под термином диффузии подразумеваются явления проникновения одного рода материи в другую или через другую за счёт движения молекул. Если два разных газа, имеющие совершенно одинаковые давления, приведены в соприкосновение, то молекулы одного газа начнут проникать в другой газ. Две жидкости или два твёрдых тела точно так же будут диффундировать друг в друга. Вследствие этого движения молекул газы будут диффундировать в жидкости и в твёрдом теле.

Причиной диффузии является наличие градиента концентрации  $C$  по направлению  $h$  т.е.  $\frac{dC}{dh}$ . Если по данному направлению концентрация одного вещества в другом одинакова, то никакого изменения в соотношении концентраций происходить не будет, хотя движение молекул и, так сказать, взаимное

перемешивание будет иметь место, но, поскольку молекулы одного и того же вещества идентичны, то никакой разницы в соотношении концентраций мы не обнаружим. Если же концентрация одного вещества в другом по какому-либо направлению не одинакова, то взаимное движение молекул будет стремиться выровнять эту концентрацию, а, следовательно, из мест с более высокой концентрацией в места с более низкой концентрацией будет двигаться большее количество молекул, чем в обратном направлении.

Количественная теория диффузии была разработана А. Фиком в 1855 году. Он показал, что кинетика диффузии аналогична кинетики теплопроводности, развитой Фурье. Согласно первому закону Фика [114]:

$$dQ = -DS \frac{dC}{dh} dt,$$

где  $dQ$  - количество вещества, диффундирующее за время  $dt$ ,  $S$ - площадь поверхности, через которую происходит диффузия,  $D$ - коэффициент диффузии, измеряемый количеством вещества, диффундирующим в единицу времени через единицу поверхности при градиенте  $\frac{dC}{dh} = 1$ . В абсолютной системе единиц коэффициент диффузии  $D$  измеряется в  $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ .

Наиболее широко и полно диффузию начали применять при поиске нефти и газа. Главным и наиболее распространённым геохимическим методом поиска в начале 20 века была газовая съёмка. Газовая съёмка как метод поиска нефти и газа была предложена В.А. Соколовым в 1929 г. Он теоретически обосновал возможность диффузии газа по всей площади над нефтяным месторождением и в 1930 г. доказал опытным путём, что над месторождениями в подпочвенном воздухе содержится повышенное количество углеводородных газов по сравнению с площадью, расположенной в удалении от залежи. Для этой цели В. А. Соколов сконструировал специальный ртутный прибор, позволяющий определять микроконцентрации углеводородов (до 10-5 %) [115].

Применение первого закона Фика и коэффициентов диффузии газов в различных средах позволяло оценивать количество газа, диффундирующего через

почву и выявлять аномалии, предсказывая находения на этих местах залежей нефти и газа.

Исследований по определению коэффициентов диффузии газов в маслах не много. Одним из таких является работа по исследованию коэффициентов и свойств диффузии растворённого газа в масле камелии [116]. В данной работе применён метод молекулярно-динамического моделирования, основанный на полимерном согласовании силовых полей, который позволяет изучить диффузионные характеристики и механизм диффузии исследуемых газов в масле камелии.

По мере развития теории компьютерного моделирования и современных компьютерных технологий, технология компьютерного моделирования добилась большого прогресса. Молекулярное моделирование также называют «компьютерным экспериментом» или «компьютерным моделированием». С параметризацией силового поля - эта технология становится более значимой. Молекулярное моделирование - это моделирование физических или химических процессов для объяснения экспериментальных явлений и проверки их экспериментальной осуществимости. Силовое поле является основой молекулярно-динамического моделирования. Выбор силового поля определяет, насколько точным будет результат моделирования.

Расчёт коэффициентов диффузии газов в масле камелии базируется на методе Эйнштейна. Он основан на параметре среднего квадрата смещения и уравнения Эйнштейна [117].

Линейная зависимость между MSD и временем  $t$  позволяет использовать графические методы для определения коэффициента диффузии  $D$ . Это применимо для грубых расчетов коэффициента диффузии в системах окружающей среды.

При моделировании были применены алгоритмы для учёта физических параметров системы. Алгоритм Андерсена осуществляет контроль температуры. Алгоритм Берендсена применён для управления давлением в симуляции, которое было принято равным 0,1 МПа. Однако данный алгоритм не генерирует корректный канонический ансамбль, особенно для небольших систем, его



применение допустимо для больших систем порядка сотен тысяч атомов, молекул, лишь в таком случае алгоритм даёт допустимые результаты [118].

Коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле определялся только в одной работе [105]. Данное исследование основывается на применении метода лазерной спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света с бигармонической лазерной накачкой на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Это позволяет изучить процесс выделения водорода из диэлектрической жидкости под действием фокусированного ультразвука. Концентрация водорода определялась оптическим способом. Газ извлекали из цилиндрического сосуда, частично заполненного маслом. Цилиндр предварительно вакуумировали, либо заполняли воздухом, потом газ переходил из нижней части сосуда, заполненной маслом в верхнюю, вакуумную, либо газовую фазу. В первом случае происходило почти полное выделение газа из масла примерно за 0,5 час. Во втором случае концентрация водорода в газовой фазе за полчаса не достигала и пяти процентов. Обработку данных проводили, считая процесс диффузии квазистационарным, то есть поток газа из масла определяли через коэффициент диффузии, умноженный на концентрацию растворенного газа и деленный на толщину слоя масла.

Полученный коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле равнялся  $1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. В анализируемой работе предполагается, что водород распространяется в трансформаторном масле квазистационарно (когда поток определяется делением концентрации на размер области). Однако, на самом деле там должен происходить глубоко нестационарный процесс. Так же, с точки зрения процесса диффузии потоки диффундирующего вещества в предварительно откачанный объем и в объем с газом должны быть одинаковыми. В данной работе они отличаются почти на два порядка (без использования ультразвука). Вследствие чего можно предположить, что результат, полученный в данной работе, имеет погрешность. Использование данного коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле в исследованиях приведёт к наличию ошибки в результатах.

## Выводы по главе 1

На основании проведенного обзора источников можно сформулировать следующие задачи:

- создание высоковольтной экспериментальной установки по исследованию различных электрофизических процессов, происходящих в трансформаторном масле **под действием переменного напряжения;**

- исследование факторов, влияющих на растворение пузырьков газа в трансформаторном масле;

- определение коэффициентов газообразования в трансформаторном и рапсовом маслах при возникновении ЧР;

- исследование влияния концентрации нанотрубок на электрическую прочность трансформаторного масла;

- изучение поведения газовых пузырьков и водяных капель под действием переменного напряжения;

- исследование инициирования ЧР в газовых пузырьках и выявлены факторы, влияющие на частоту их возникновения.

## ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ОСНОВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле определялся только ранее в 2 работах [105, 106]. Первое исследование основывалось на применении метода лазерной спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) с бигармонической лазерной накачкой (БЛН) на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Это позволило авторам изучить процесс выделения водорода из диэлектрической жидкости под действием фокусированного ультразвука. Концентрация водорода определялась оптическим способом. Газ извлекали из цилиндрического сосуда, частично заполненного маслом. Цилиндр предварительно вакуумировали, либо заполняли инертным газом, потом газ переходил из нижней части сосуда, заполненной маслом в верхнюю, откачанную, либо газовую фазу. В первом случае происходило почти полное выделение газа из масла примерно за 0,5 часа. Во втором случае концентрация водорода в газовой фазе за полчаса не достигала и пяти процентов. Обработку данных проводили, считая процесс диффузии квазистационарным, то есть поток газа из масла определяли через коэффициент диффузии, умноженный на концентрацию растворенного газа и деленный на толщину слоя масла. Полученный коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле равнялся  $1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Однако, на самом деле там должен был происходить глубоко нестационарный процесс. Так же, с точки зрения процесса диффузии, потоки диффундирующего вещества в предварительно откачанный объем и в объем с газом должны были быть одинаковыми. А в данной работе [105] они отличаются почти на два порядка (без использования ультразвука). Вследствие чего можно мы предполагаем, что результат ошибочен.

Методика определения коэффициентов диффузии, основанная на растворении пузырьков в различных жидкостях, была впервые описана в [106]. Авторами были определены коэффициенты диффузии водорода, метана, этана и этилена в трансформаторном масле. Затем мною [107], в рамках написания

бакалаврской работы, были определены коэффициенты диффузии для тех же газов в менее распространенной электроизоляционной жидкости – рапсовом масле. Однако, при сопоставлении результатов, полученных в работе [106] с коэффициентами диффузии основных диагностических газов в рапсовом масле [107], выявилось противоречие. Полученные значения коэффициентов диффузии газов в рапсовом масле оказались много выше аналогичных коэффициентов для трансформаторного масла (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Коэффициенты диффузии в рапсовом и трансформаторном маслах

Газ	Рапсовое масло (результаты данного исследования)		Трансформаторное масло* (результаты предшествующих исследований)	
	Коэффициенты диффузии, м <sup>2</sup> /с	Коэффициенты растворимости	Коэффициенты диффузии, м <sup>2</sup> /с	Коэффициенты растворимости
Водород	10 <sup>-8</sup>	0.04	3,3*10 <sup>-9</sup>	0.05
Метан	3,3*10 <sup>-9</sup>	0.34	10 <sup>-9</sup>	0.4
Этан	1,3*10 <sup>-9</sup>	1.85	0,4*10 <sup>-9</sup>	2.78
Этилен	1,2*10 <sup>-9</sup>	1.58	-	1.75

Ожидалось, что большие значения вязкости рапсового масла должны привести к меньшим значениям коэффициентов диффузии. Подробный анализ и сопоставление условий проведения экспериментов выявил, на наш взгляд, одно существенное отличие. Дело в том, что дегазация масла в работе [106] производилась при помощи мембранного насоса, создающего разрежение, а не вакуум, что могло послужить причиной недостаточной дегазации. Так же открытая конструкция экспериментальной ячейки могла стать причиной загрязнения дегазированного масла воздухом, в момент заливки. Наличие остаточного воздуха могло привести к обратной его диффузии из масла в пузырек, замедляя, тем самым,

скорость его растворения. Поскольку коэффициент диффузии диагностического газа определялся по динамике растворения пузырька, уменьшение скорости растворения приводило к неправильному его определению, а именно, к получению заниженных значений, особенно для малорастворимых газов, например, водорода. В нашей работе [108] использовался форвакуумный насос и принципиально новая конструкция экспериментальной ячейки.

## 2.1 Экспериментальная установка

Для измерений была разработана экспериментальная ячейка (Рисунок № 2.1, 2.2, 2.3.3) в виде вертикального цилиндра (Рисунок 2.2, 1), с вмонтированной в стенку иглой (Рисунок 2.2, 4), для подвода испытуемого газа. Дно (Рисунок 2.2, 6) и крышка (Рисунок 2.2, 2) ячейки выполнены из оргстекла, что позволяло проводить оптическую регистрацию, исключая насыщение масла воздухом. В верхней части ячейки установлена сетка (Рисунок 2.2, 5), которая позволяла удерживать газовый пузырек в объеме жидкости, избегая упругой деформации у крышки. Через кран (Рисунок 2.2, 7) производилась подача масла в объем ячейки за счет разряжения, создаваемого вакуумным насосом, соединенным с краном (Рисунок 2.2, 3). Подготовленная ячейка помещалась под микроскоп, на окуляр которого устанавливалась видеокамера (Рисунок 2.2, 9). Подсветка (Рисунок 2.2, 8) осуществлялась снизу ячейки.



Рисунок 2.1 – Фотография экспериментальной ячейки

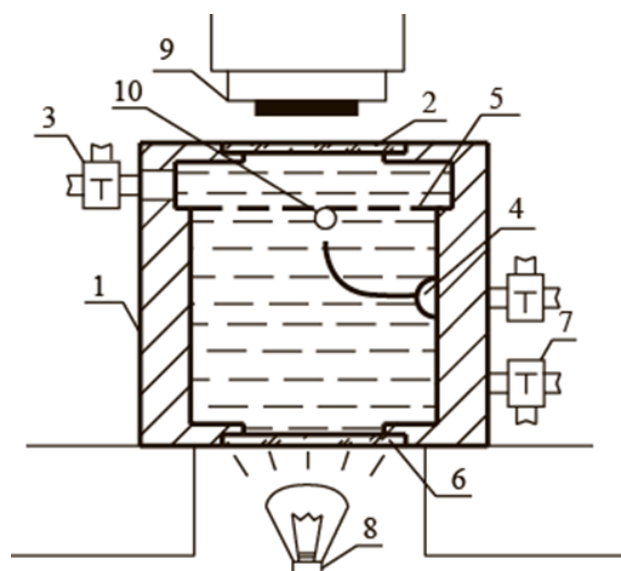


Рисунок 2.2 - Эскиз экспериментальной ячейки

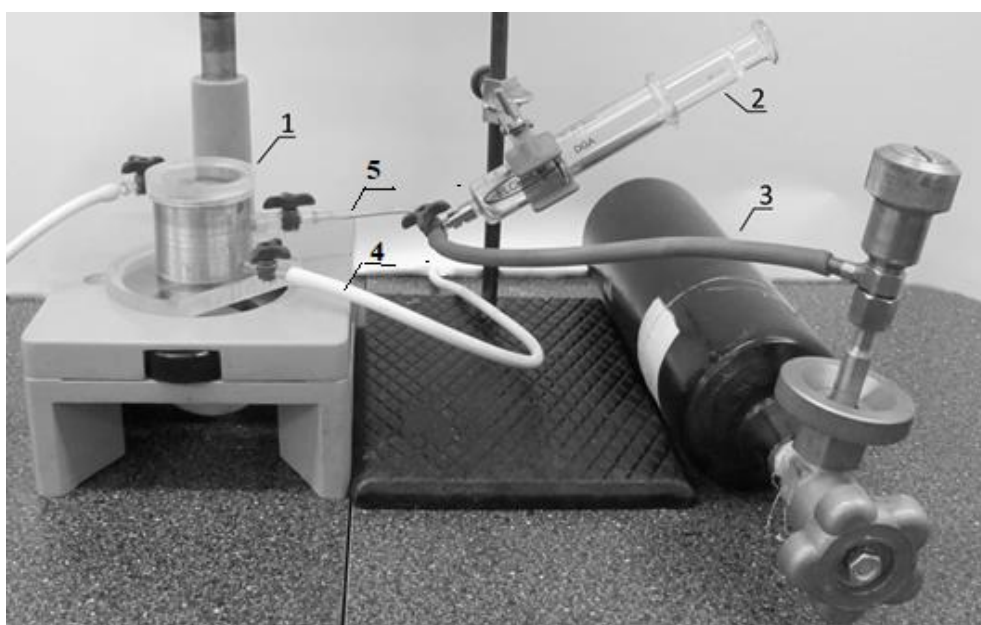


Рисунок 2.3 – Фотография экспериментальной установки:

1- экспериментальная ячейка, заполненная дегазированной электроизоляционной жидкостью, 2- пробоотборное устройство Elchrom, выступающее в роли шприца-дозатора, 3- баллон с диагностическим газом

Забор и нагнетание газа производились пробоотборником Elchrom (Рисунок 2.4), который представляет собой комбинацию специального цельностеклянного шприца с поршнем индивидуальной притирки и вакуумного трехходового крана

(Рисунок 2.4, 2). Выход (Рисунок 2.4, 1) через переходную муфту подключен к игле ячейки, а второй к баллону с диагностируемым газом. Во избежание резких скачков давления в системе был использован вентиль тонкой регулировки Н-12.

Поршень шприца (Рисунок 2.4, 4) смазывался вакуумной смазкой, чтобы устранить утечку газа и попадания воздуха в систему. Непосредственно перед проведением эксперимента вся система продувалась исследуемым газом. Для удобства пробоотборник устанавливался на штатив.

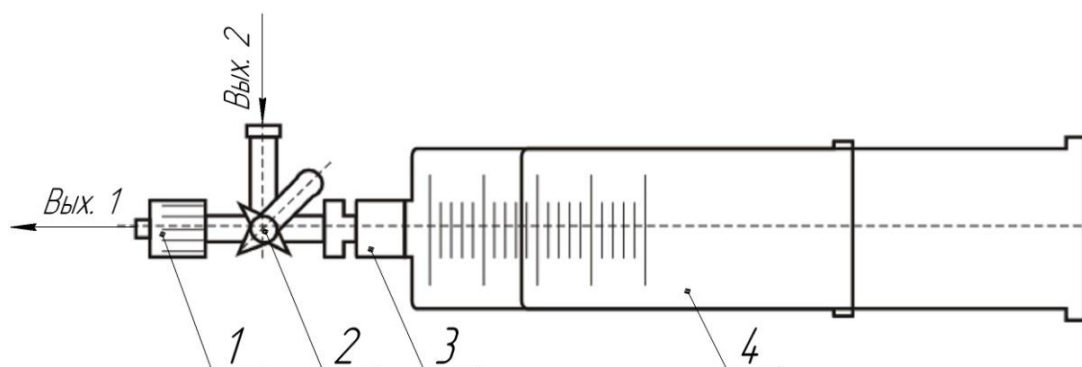


Рисунок 2.4 - Пробоотборник «Elchrom»:

1- соединительная муфта; 2- вакуумный кран; 3- узел крепления крана к пробоотборнику; 4- корпус пробоотборника с поршнем индивидуальной притирки

## 2.2 Методика проведения исследования

Ход работы по определению коэффициентов диффузии состоял из пяти основных этапов:

- подготовка исследуемой жидкости (сушка, фильтрация и дегазация);
- проведение исследования (введение пузырька в экспериментальную ячейку и видеорегистрация);
- измерение размеров пузырька в процессе его растворения;
- построение кривых растворения, по полученным значениям;
- расчет коэффициентов диффузии.

Сначала масло несколько раз прогонялось через вакуумную фильтровальную воронку, наполненную силикагелем. Затем в воронку

устанавливалась фильтровальная бумага и масло пропускалось через нее при разряжении, создаваемом форвакуумным насосом. Далее производилась дегазация масла (Рисунок 2.5): круглодонная колба (Рисунок 2.5, 9) наполнялась на  $1/3$  своего объема заранее обезвоженной электроизоляционной жидкостью, в которую погружался магнитный элемент мешалки (Рисунок 2.5, 10), далее колба закрывалась трёхходовым краном с аллонжем (Рисунок 2.5, 7), один выход которого соединялся с трубкой, погруженной в масло (Рисунок 2.5, 6). Затем колба устанавливалась на штатив (Рисунок 2.5, 5), над магнитной мешалкой (Рисунок 2.5, 2) с регуляторами оборотов (Рисунок 2.5, 3) и температурой подогрева (Рисунок 2.5, 4), а к отводу подключался вакуумный шланг (Рисунок 2.5, 8), идущий к форвакуумному насосу (Рисунок 2.5, 1).

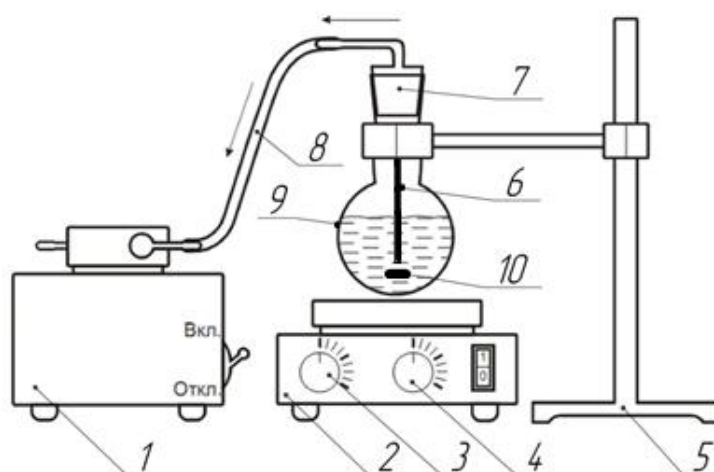
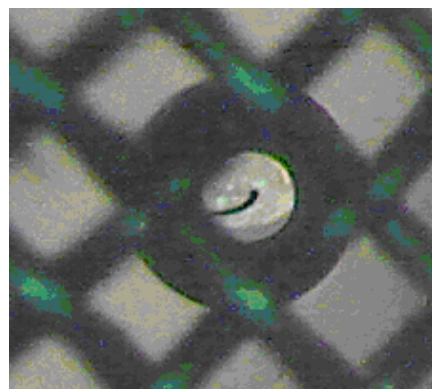
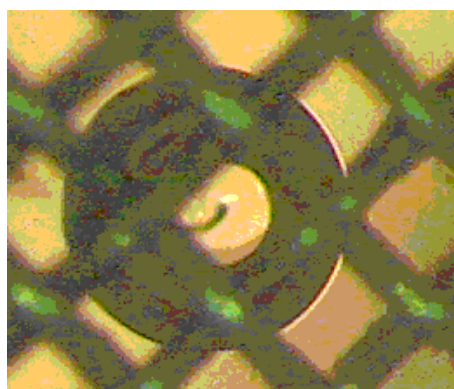


Рисунок 2.5 - Упрощенный вид вакуумной установки

После 24 часов дегазации трехходовой кран с аллонжем (Рисунок 2.5, 7) перекрывался и форвакуумный насос подключался к кранику (Рисунок 2.1, 3) на экспериментальной ячейке. Второй краник экспериментальной ячейки (Рисунок 2.1, 7) соединялся с трубкой (Рисунок 2.5, 6) через тот же самый трехходовой кран (Рисунок 2.5, 7). В момент дегазации экспериментальной ячейки (Рисунок 2.1) и соединительного тракта (Рисунок 2.3, 4) продувался газоподводящий тракт и иголка (Рисунок 2.1, 4). После этого подача газа из иголки прекращалась, и ячейка заполнялась дегазированным маслом из колбы через краник (Рисунок 2.1, 7). После



заполнения ячейки все краны перекрывались. При помощи шприца дозатора, в роли которого выступало пробоотборное устройство Elchrom, через газоподводящий тракт (Рисунок 2.3, 5) производилась инъекция пузырька испытуемого газа в объем дегазированного трансформаторного масла и запускалась оптическая регистрация. Всплывая, пузырек фиксировался на металлической сетке и растворялся, постепенно уменьшаясь в размерах. Запись процесса растворения подвергалась разбиению на кадры (Рисунок 2.6) с заданным интервалом времени.



а – в начальный момент регистрации

б – в конечный момент регистрации

Рисунок 2.6 – Начальный и конечный кадры записи растворения пузырька исследуемого газа

С полученных кадров в графическом редакторе снимались размеры газовых пузырьков, используя метод построения окружности по трем точкам. Определение масштаба проводилось путем сопоставления размеров реперного образца (толщины проволоки металлической сетки), с экспериментально полученными размерами пузырька. Затем строились кривые растворения газовых пузырьков, под которые подбирались параметры расчета математической модели. Искомым значением коэффициента диффузии являлся тот, при котором совпадали расчетная и экспериментальная кривые растворения газов.

## 2.3 Результаты

Типичный пример сравнения экспериментальных данных с математической моделью представлен на рисунке 2.7.

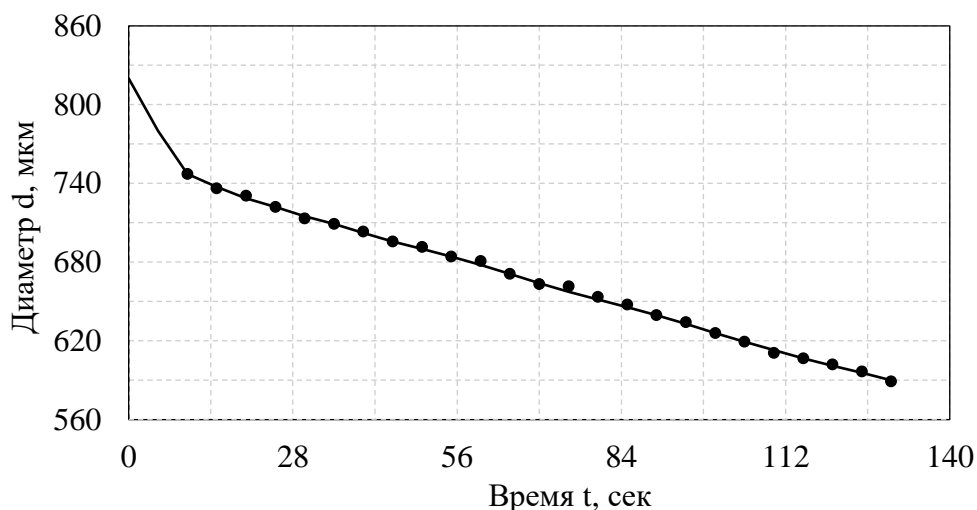


Рисунок 2.7 – Кривые растворения пузырьков водорода в рапсовом масле при 30°C: линия - результат моделирования; точки – результат эксперимента

### 2.3.1. Рапсовое масло

Экспериментальные данные для пузырьков различных газов, растворяющихся в рапсовом масле, представлены на рисунке 2.8.

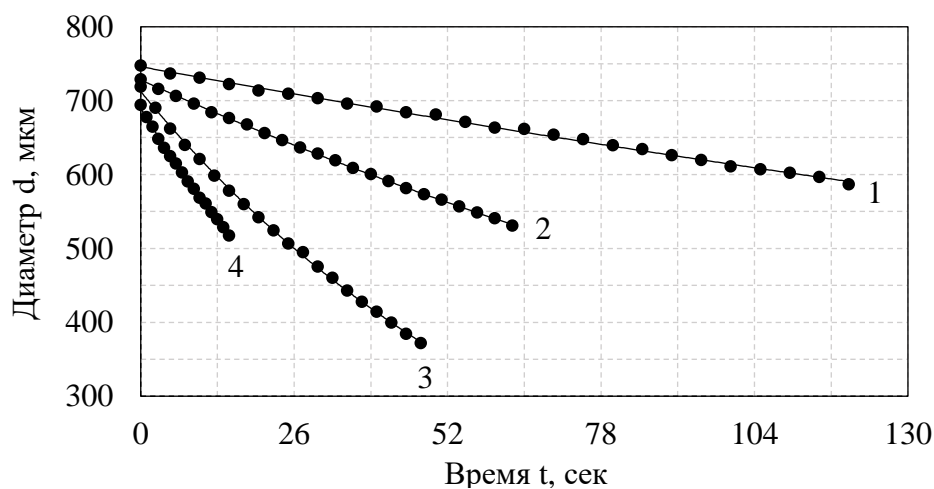


Рисунок 2.8 – Экспериментальные кривые растворения газа в рапсовом масле:  
1 - водород; 2 - метан; 3 - этан; 4 – этилен

### 2.3.2. Трансформаторное масло

Экспериментальные данные для пузырьков различных газов, растворяющихся в трансформаторном масле, представлены на рисунке 2.9.

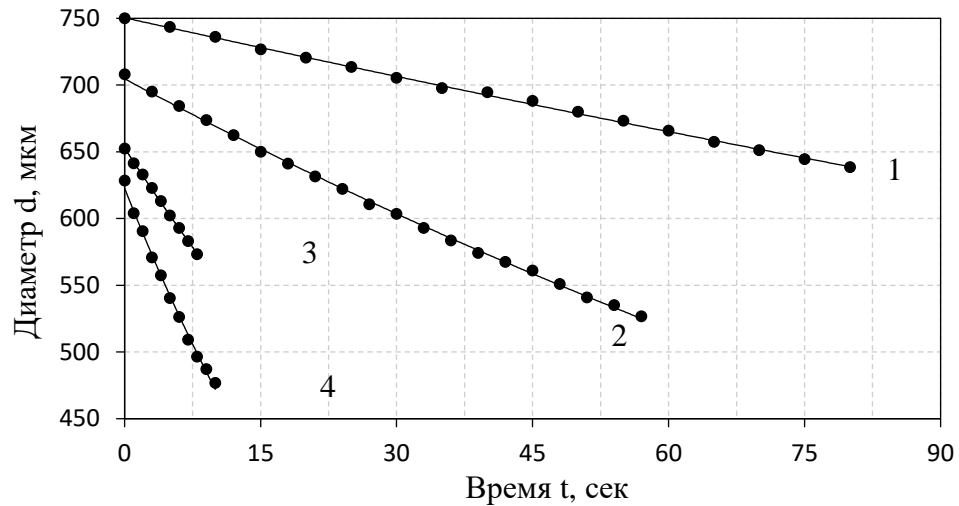


Рисунок 2.9 – Экспериментальные кривые растворения газа в трансформаторном масле: 1 - водород; 2 - метан; 3 - этан; 4 – этилен

### 2.3.3. Касторовое масло

Экспериментальные данные для пузырьков различных газов, растворяющихся в касторовом масле, представлены на рисунке 2.10.

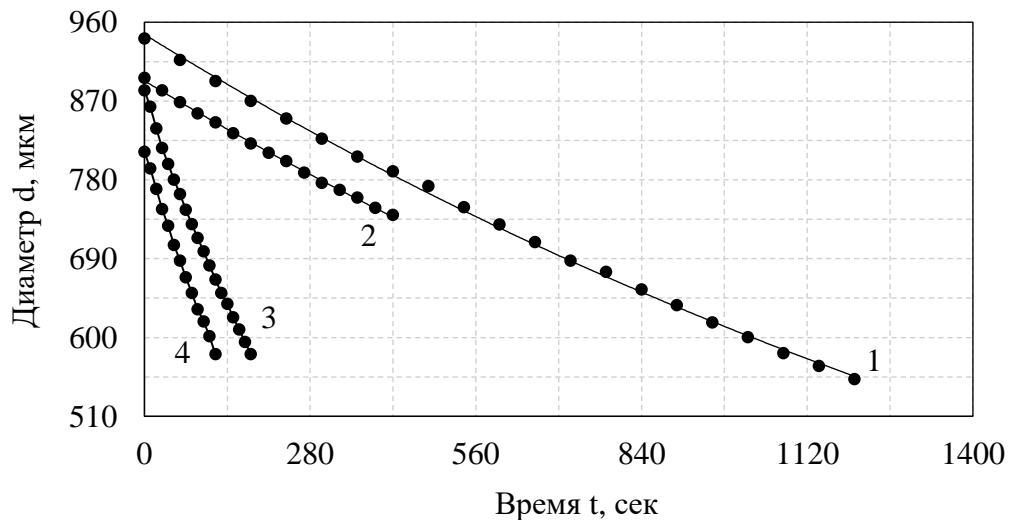


Рисунок 2.10 – Экспериментальные кривые растворения газа в касторовом масле: 1 - водород; 2 - метан; 3 - этан; 4 – этилен

### 2.3.4. Кремнийорганическая жидкость

Экспериментальные данные для пузырьков различных газов, растворяющихся в кремнийорганической жидкости, представлены на рисунке 2.11.

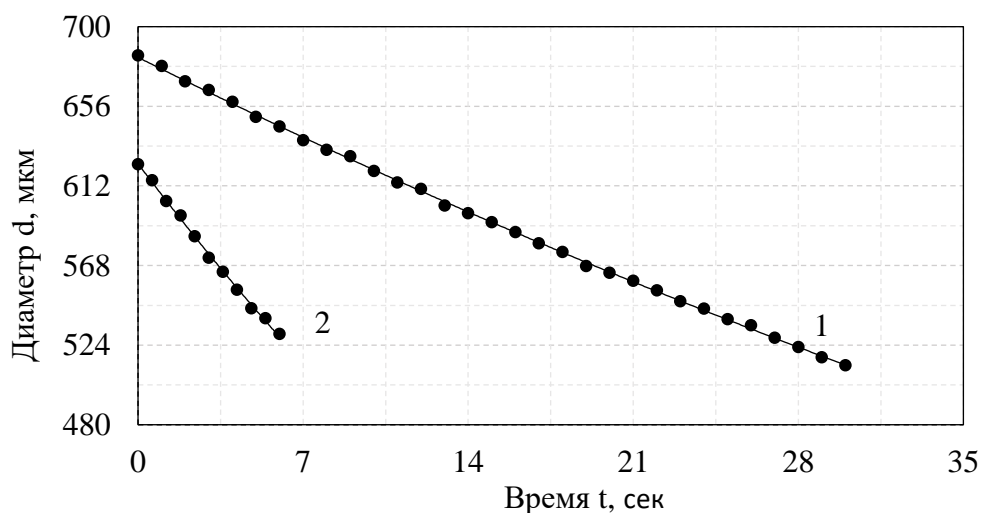


Рисунок 2.11 – Экспериментальные кривые растворения газа в кремнийорганической жидкости: 1 - водород; 2 – метан

### 2.3.5. Коэффициенты диффузии

Видно, что во всех жидкостях этилен - наиболее быстро растворяющийся газ; следующий по скорости - этан, затем метан и водород. Всего, для каждого газа было математически обработано более 20 экспериментальных кривых. Рассчитанные коэффициенты диффузии приведены в Таблице 2.2. Для расчета коэффициентов диффузии использовались коэффициенты растворимости данных газов, взятые из источников: трансформаторное масло [106]; рапсовое масло [109]; касторовое масло [110] и кремнийорганическая жидкость [111].

Таблица 2.2 - Коэффициенты диффузии

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

## 2.4 Обсуждение результатов

Данные, представленные на рисунках 2.8 – 2.11 показывают, что водород - самый медленно растворяющийся газ во всех жидкостях. В чем причина такого поведения? Молекула водорода имеет самый маленький размер по сравнению с другими молекулами. Поэтому кажется, что молекулы водорода должны двигаться легче и, соответственно, скорость растворения должна быть максимальной. Однако в этом случае важную роль играет другое характерное свойство, а именно низкая растворимость водорода. Данные [109] показывают, что водород имеет растворимость на два порядка меньше, чем растворимость других диагностических газов. Следовательно, именно поэтому значение диффузии водорода ниже значений других газов. Можем сделать вывод о том, что растворимость больше влияет на скорость растворения пузырьков, чем размер молекулы.

### 2.4.1 Ошибка предыдущих исследователей

Как говорилось в начале этой главы, существует разница между коэффициентами диффузии газов, полученными в данном исследовании и теми, которые были определены ранее [106] (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 - Сравнение коэффициентов диффузии газов в трансформаторном масле

	Значение коэффициентов диффузии, м <sup>2</sup> /с			
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Трансформаторное масло [106]	3.3 x 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-9</sup>	0,4 x 10 <sup>-9</sup>	-
Трансформаторное масло	1.4 x 10 <sup>-8</sup>	2.3 x 10 <sup>-9</sup>	1.1.x 10 <sup>-9</sup>	1.2 x 10 <sup>-9</sup>

Для подтверждения выдвинутых нами ранее гипотез был проведен ряд дополнительных экспериментов, а также доработана математическая модель.

#### 2.4.1.1 Плохая дегазация

Первая вероятная причина несоответствия - небольшое количество растворенного воздуха в масле из-за недостаточной его дегазации во время предыдущего эксперимента [106]. Основанием для этого предположения является то, что в настоящих экспериментах использовались более эффективная вакуумная система для дегазации, а также полностью закрытая ячейка, конструкция которой позволяла заполнение дегазированной жидкостью под разрежением. Для проверки этой гипотезы было проведено повторное экспериментальное измерение динамики растворения пузырьков водорода, с заведомо плохо дегазированной жидкостью. Однако результаты измерений не совпадали с результатами, полученными ранее [106]. Действительно, скорость растворения пузырька снизилась, однако добиться результатов предыдущих исследователей так и не удалось.

#### 2.4.1.2. Плохая продувка

Вторая гипотеза состояла в том, что «паразитный» воздух находится не в жидкости, а в пузырьке. Ясно, что его растворение должно происходить медленнее, так как в масло поступает не чистый газ, а смесь. Для проверки данной гипотезы время и интенсивность продувки газоподводящего тракта с иглой (Рисунок 2.1, 4)

было искусственно уменьшено. Нам удалось получить абсолютно идентичные кривые растворения водорода (Рисунок 2.12) по сравнению с кривыми, приведенными ранее [106].

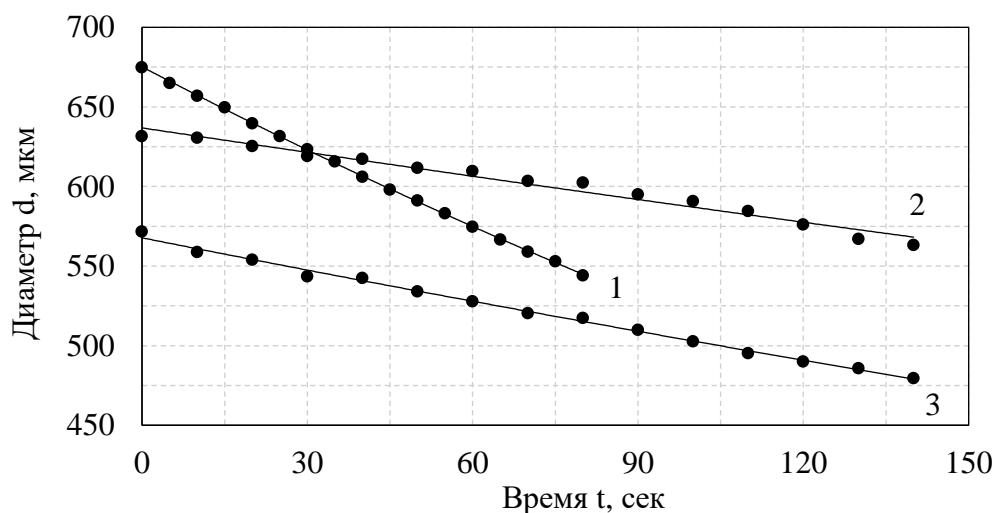


Рисунок 2.12 - Кривые растворения водорода в трансформаторном масле:

1-хорошая продувка; 2 – плохая продувка; 3 - результат [106]

Происходит это потому, что водород при продувке тракта быстро диффундирует в воздухе и перемешивается с ним. Кроме того, возможна абсорбция молекул воздуха на ватном фильтре внутри шприца, с постепенной десорбцией в исследуемый газ, что также приводит к добавлению «паразитного» воздуха в исследуемый газ при низких скоростях потока газа. Таким образом, пузырек в дегазированном масле был заполнен не чистым водородом, а смесью газа и воздуха. Коэффициенты диффузии азота и кислорода ниже, чем коэффициент диффузии водорода. Следовательно, пузырек растворялся медленнее, что приводило к заниженным оценкам коэффициента диффузии.

#### 2.4.2. Апробация метода

Этот метод был апробирован на системе «пузырек метана в воде». Вода была выбрана потому, что это единственная жидкость, для которой известны

коэффициенты диффузии и растворимости метана [112]. Комнатная температура составляла 20°C, и все используемые в расчетах коэффициенты были выбраны для данной температуры жидкости.

Для определения коэффициентов диффузии метана в воде была проведена серия экспериментов по методике, описанной ранее в разделе 2.2. Результаты измерения и расчета представлены на рисунке 2.13.

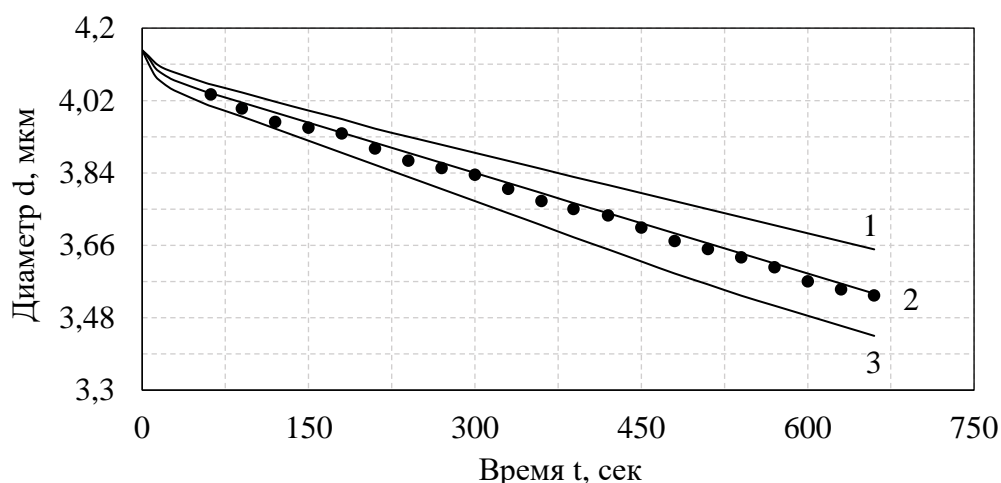


Рисунок 2.13 - Кривые растворения пузырьков метана в воде: точки – экспериментальные данные; 2 - расчетная кривая, 1, 3 - кривая, полученная с коэффициентами ниже 20% и выше 20% относительно выбранного коэффициента.

График убедительно показывает чувствительность метода моделирования к подгонке 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 [113].

## Выводы по главе 2

- Разработан новый метод определения коэффициентов диффузии, основанный на сопоставлении экспериментальных кривых и рассчитанных с подобранным коэффициентом диффузии;



- получены кривые растворения основных диагностических газов в рапсовом масле, трансформаторном масле, силиконовом масле и касторовом масле;
- для каждой жидкости определены коэффициенты диффузии водорода;
- было доказано влияние остаточного воздуха в масле на определение коэффициентов диффузии;
- предлагаемая процедура измерения и моделирования проверена и подтверждена путем определения коэффициента диффузии метана в воде.

### **Глава 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДАХ В СИСТЕМЕ «ОСТРИЕ–ПЛОСКОСТЬ» В РАПСОВОМ И ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛАХ**

Газообразование в жидкой электрической изоляции играет важную роль в функционировании ВМЭО. Механизмом образования газов в трансформаторном масле является его разложение под действием повышенной температуры, дуговых процессов и ЧР [119]. В результате образуется растворенный газ, а при превышении интенсивности газообразования над скоростью его растворения могут образоваться пузырьки газа, разряды в которых приводят к пробое промежутка и выходу из строя оборудования.

Определением коэффициентов газообразования в трансформаторном масле занимались ранее [120]. В связи с высоким интересом к применению растительных масел в качестве электроизоляционных жидкостей в высоковольтном оборудовании было принято решение о проведении дополнительных исследований в этом направлении. Рапсовое масло является сравнительно новым диэлектриком, обладающим рядом преимуществ по сравнению с традиционным трансформаторным (минеральным) маслом [109, 121], и поэтому его исследование является достаточно актуальным. Сравнительные измерения растворимости газов в рапсовом и трансформаторном маслах проведены ранее [109]. Стоит отметить также, что изучение ЧР в подобных системах проводились уже в ряде работ [123-125, 147]. Однако по-прежнему остаются нерешенными некоторые вопросы по функциональным характеристикам этих масляных диэлектриков.

В частности, в процессе проведения исследований на ячейке, разработанной автором [120], в соответствии с описанной им методикой, мною был выявлен ряд грубых ошибок.

Первая ошибка – выбор материалов для изготовления ячейки. Корпус ячейки был выполнен из фторопласта (Рисунок 3.1, 1), который имеет крайне низкую адгезию с различными клеевыми составами. Автор работы клеивал прозрачные

окна из органического стекла в корпус с помощью герметика. Электроды (Рисунок 3.1, 5) также были установлены с использованием герметика.

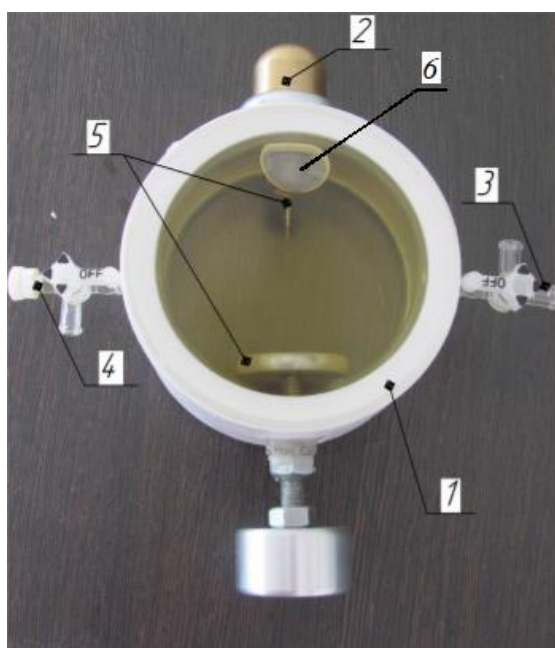


Рисунок 3.1 - Экспериментальная ячейка [120]

1 – корпус ячейки; 2 – высоковольтный электрод; 3, 4 – трехходовые краники;  
5 – острый и плоский электроды; 6 – пузырь газа

Нужно не забывать, что цель исследования заключается в определении концентрации газов, образовавшихся в объеме масла в процессе его разложения под влиянием ЧР. Для этого сначала отбирались 2 пробы «чистого» масла до эксперимента, потом 2 пробы после. Проведение эксперимента требовало значительного времени, т.к. для достоверности и достижения регистрируемой концентрации приходилось проводить более 1000 испытаний. За это время, под действием колебаний температуры в комнате в течении дня объем масла мог увеличиваться и уменьшаться увеличился. При повышении температуры неизбежно происходило выдавливание масла из ячейки, а при последующем охлаждении (обычно к вечеру), в объеме ячейки возникало разрежение, что приводило к засасыванию пузырька воздуха в ячейку (Рисунок 3.1, 6). Естественно,

газ из масла диффундировал в этот пузырь. В результате, при проведении ХАРГ были получены ложные значения концентраций этих газов.

Вторая ошибка – ручная регистрация импульсов. Автор регистрировал импульсы ЧР путем ручного обновления осциллографа Rigol. За 1 секунду проходит 50 периодов напряжения. Примерно такое количество времени необходимо оператору для ручного обновления осциллографа. Существовала большая вероятность пропуска импульсов ЧР. Таким образом при зарегистрированном значении в 1000 импульсов, автор [120] мог пропустить и 500 и 5000. Сколько импульсов было пропущено на самом деле – оценить невозможно.

### **3.1 Высоковольтная комната**

Высоковольтная установка была размещена в подвальном помещении ниже уровня земли (1 метр). В помещении была оборудована комната с металлическими стенками толщиной 2 мм и габаритными размерами 4600/2100/1700 (Д/Ш/В). Внутри располагалось все высоковольтное оборудование, а также экспериментальная ячейка с измерительными цепями. Осциллограф устанавливался снаружи комнаты. Для исключения влияния помех с контура общего заземления университета в лаборатории был смонтирован собственный контур, состоящий из 5 труб диаметром 40 мм, которые были забиты на глубину около 7 метров. Заземление стенок металлической комнаты и экспериментальной установки производилось на собственный контур.

#### **3.1.1 Экспериментальная установка**

Экспериментальная установка (Рисунок 3.2) состояла из высоковольтного трансформатора ТВО 190 В-140 кВ (Рисунок 3.2, 1), соединенного через резистор, сопротивлением 47 кОм, (Рисунок 3.2, 2) с конденсатором связи СМАИВ-110/ $\sqrt{3}$ -7,33 (Рисунок 3.2, 3) алюминиевой спиралью (Рисунок 3.2, 4) общим диаметром 55 мм (диаметр проволоки 3 мм). Спиральная намотка была использована с целью

снижения напряженности электрического поля и, как следствие, исключения коронных разрядов. Этой же спиралью (Рисунок 3.2, 4) конденсатор связи (Рисунок 3.2, 3) соединялся с алюминиевым электродом экспериментальной ячейки (Рисунок 3.2, 5). Второй электрод которой (Рисунок 3.2, 5) соединялся медной шиной (рисунок 3.2, 6) (шириной 20 мм и толщиной 2 мм) с корпусом схемы регистрации электрических сигналов (Рисунок 3.2, 7). Корпус, также был выполнен из меди толщиной 2 мм и шириной 20 мм. Вся конструкция была заземлена на собственный контур заземления лаборатории.

Измерительная схема (Рисунок 3.2, 7) состояла из полностью экранированного фильтра верхних частот 3 порядка [126] с частотой среза 150 Гц и конденсатора (Рисунок 3.2, 8), являющегося нижним плечом емкостного делителя напряжения (коэффициент деления 1365). Измерительная коробка соединялась с экспериментальной ячейкой (Рисунок 3.2, 5) и конденсатором связи (Рисунок 3.2, 3), как показано на рисунке 3.2. Связь с четырехканальным осциллографом Rigol MSO 5104 (Рисунок 3.2, 10) осуществлялась коаксиальными кабелями (Рисунок 3.2, 9).

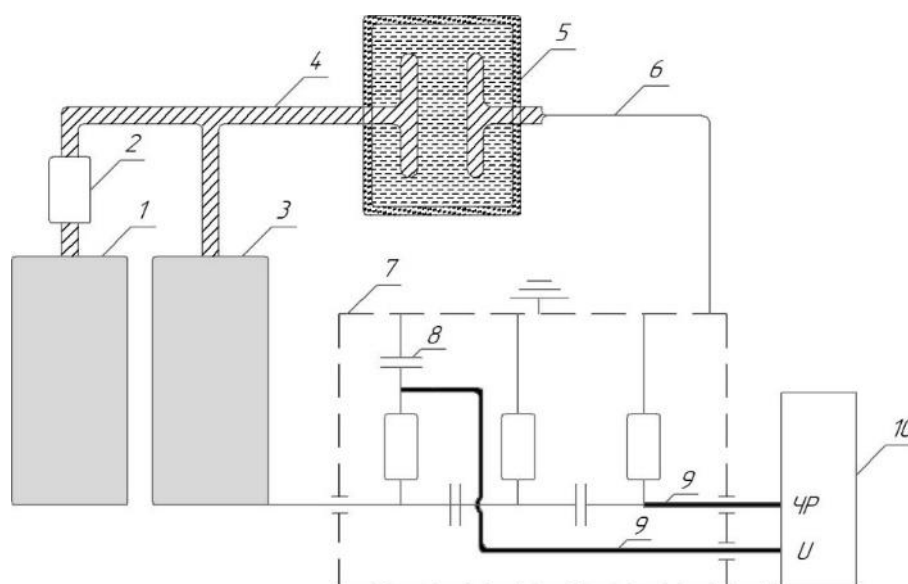


Рисунок 3.2 – Схематичное изображение высоковольтной установки

- 1 – высоковольтный трансформатор; 2 – резистор; 3 – емкость связи; 4 – алюминиевая спираль; 5- экспериментальная ячейка; 6 – медная шина; 7 – схема регистрации; 8 – конденсатор (нижнее плечо делителя); 9 – коаксиальные кабеля; 10 – цифровой осциллограф

### 3.1.2 Экспериментальная ячейка по исследованию частичных разрядов в системе острие-плоскость

На рисунке 3.3. представлена фотография экспериментальной ячейки с плоским заземленным (Рисунок 3.3, 4) и острым высоковольтным электродами (Рисунок 3.3, 3). Корпус (Рисунок 3.3, 1) экспериментальной ячейки, изготовленный из оргстекла, соединялся фторопластовыми болтами (Рисунок 3.3, 2), для предотвращения возникновения ЧР на резьбе. В торец острейного электрода (Рисунок 3.3, 3) впаивалась медно-платиновая иголка (Рисунок 3.3, 6) (показана пунктиром) с диаметром медной и платиновой частей 100 и 10 мкм соответственно. Для получения необходимого диаметра скругления проволоки (несколько мкм) она подвергалась поэтапному химическому травлению. Сначала кончик проволоки длиной 2 мм опускался в раствор азотной кислоты на 30 минут для растворения медной оболочки. Затем он же погружался в раствор царской водки на 10 минут для травления платиновой части. Как показали измерения на электронном микроскопе полученный радиус скругления острия платиновой проволоочки составил менее 2 мкм. Расстояние между плоским электродом и кончиком иголки устанавливалось равным 18 мм.

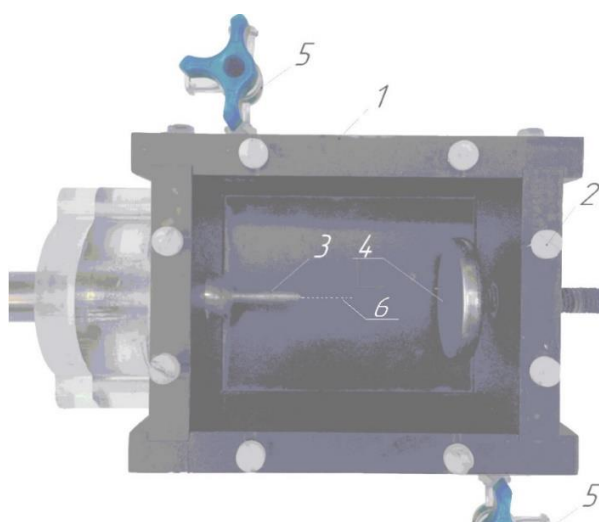


Рисунок 3.3. – Фотография экспериментальной ячейки

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

Отбор проб масла до и после эксперимента производился в пробоотборные устройства «Elchrom», конструкция которых подробно описана в Главе 2.

Для автоматического подсчета количества ЧР был собран счетчик импульсов на базе калькулятора. Принцип работы заключался в том, что каждый сигнал ЧР с ФЭУ-97 замыкал клавишу = на калькуляторе. Таким образом при установлении режима 1 + 1, при каждом срабатывании клавиши = общее число, отображаемое на экране, увеличивалось на 1. Уровень срабатывания устанавливался подбором номинала входного резистора.

Для компенсации температурного расширения использовали гибкую мембрану, установленную на трехходовом кране.

### **3.2 Методика проведения исследования**

Ход работы по определению коэффициентов газообразования состоит из семи основных этапов:

- подготовка исследуемой жидкости (сушка, фильтрация и дегазация масла);
- подготовка и заливка ячейки дегазированным маслом;
- отбор 2 проб масла до проведения исследования;
- проведение исследования (установление напряжения, при котором начнут развиваться ЧР);
- измерение суммарного количества импульсов с одновременным выборочным измерением кажущихся зарядов ЧР;
- отбор 2 проб масла после окончания эксперимента;
- проведение ХАРГ.

Процесс подготовки масла и заливки его в экспериментальную ячейку подробно описан в Главе 2.

Методика проведения исследования была основана на регистрации количества ЧР с использованием счетчика (сигнал с ФЭУ-97), с одновременной регистрацией их характеристик при помощи осциллографа.

В процессе заливки масла в ячейку отбиралось 2 пробы, затем подготовленная, заполненная маслом ячейка устанавливалась в экспериментальную установку, описанную ранее. Далее на установку подавалось напряжение. Оно постепенно повышалось до того момента, пока счетчик не начинал отсчет импульсов (осциллограф при этом тоже регистрировал сигналы ЧР), а затем увеличивалось еще на 1 кВ. При установленном напряжении, на протяжении более 15 часов вручную, с помощью осциллографа, регистрировались характеристики ЧР. Затем напряжение с установки снималось. Через 2 дня после окончания исследования из ячейки отбиралось 2 пробы масла. 2 дня необходимы для того, чтобы газ равномерно распределился по объёму масла в ячейке. Затем пробы отвозились в лабораторию для проведения ХАРГ и определения объема образованных газов. Коэффициенты газообразования рассчитывались исходя из объема выделившихся в масло газов и суммарного значения кажущегося заряда ЧР.

### 3.3 Результаты

ЧР в трансформаторном и рапсовом маслах возникали при амплитуде напряжения, превышающей 16 кВ, причем они появлялись вблизи максимума напряжения. Поэтому при расчете вложенной энергии пробивное напряжение принималось равным амплитудному. Эксперименты проводились при амплитуде напряжения, превышающей напряжение возникновения ЧР на 1 кВ. Оценка напряженности, при которой возникал ЧР (напряжение 17 кВ, расстояние между электродами 18 мм, радиус скругления электрода 2 мкм) дает значение, превышающее 15 МВ/см. На рисунке 3.4 представлены типичные осциллограммы импульсов напряжения ЧР в трансформаторном масле и сигнала с ФЭУ. Сравнительные характеристики [127] импульсов ЧР в обоих маслах приведены в Таблице 3.1.



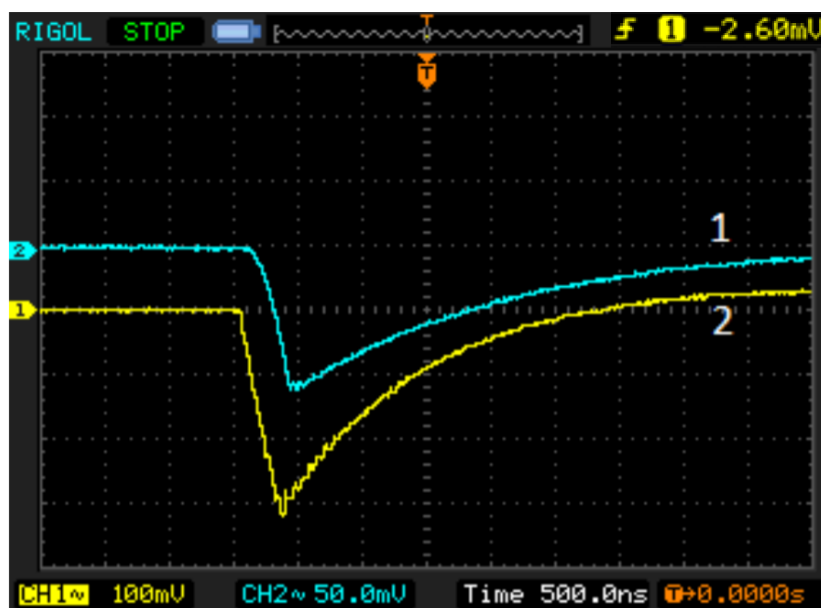


Рисунок 3.4 – Сигналы ЧР: синий (1) – ФЭУ; желтый (2) – электрический сигналы

Таблица 3.1 - Характеристики импульсов ЧР [127]

	Трансформаторное масло	Рапсовое масло
Длительность импульса, нс	500	500
Длительность переднего фронта, нс	200-400	200-500
Максимальный ток ЧР, мкА	39-69	27-57
Кажущийся заряд, пКл	36-62	19-53

В Таблице 3.2 приведены результаты ХАРГ отобранных проб обоих масел до и после эксперимента в пересчете на объем ячейки для двух диагностических газов, а именно, водорода и метана, которые, являются основными при возникновении ЧР.

Таблица 3.2 - Результаты анализа

Газы	Трансформаторное масло		Рапсовое масло	
	$V_{Г}$ до, мкл	$V_{Г}$ после, мкл	$V_{Г}$ до, мкл	$V_{Г}$ после, мкл
Метан	0,3706	0,4796	0,1308	0,5014
Водород	1,5478	3,4662	0,5232	3,488

Интегрированием 30 типовых импульсов ЧР, для каждого из масел был определен средний кажущийся заряд, который использовался для определения суммарной энергии ЧР. Усредненное значение кажущегося заряда для трансформаторного масла - 46,9 пКл, для рапсового – 36,7 пКл. Также в процессе эксперимента каждый час регистрировались амплитудные напряжения 30 ЧР. Расхождения кажущихся зарядов в трансформаторном масле, определенные разными методами, было незначительно. В таблице 3.3 приведены коэффициенты газообразования для основных диагностических газов [127]. Из Таблицы 3.3 видно, что действительно основным диагностическим газом для обоих масел является водород.

Таблица 3.3 - Коэффициенты газообразования [127]

	Трансформаторное масло		Рапсовое масло	
	V <sub>Г</sub> , мкл	К, мкл/Дж	V <sub>Г</sub> , мкл	К, мкл/Дж
Количество импульсов	17459		37897	
Суммарная энергия, Дж	0,0139		0,023611	
Газы	V <sub>Г</sub> , мкл	К, мкл/Дж	V <sub>Г</sub> , мкл	К, 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	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-6}$

### 3.4 Обсуждение результатов

Из представленных в Таблице 3.3 данных следует, что интенсивность газообразования, т. е. количество газа, образованного за одинаковый период времени, была примерно одинаковой для обоих видов масел. Кажущийся заряд единичного ЧР в трансформаторном масле, в среднем больше, чем в рапсовом, однако частота возникновения ЧР в рапсовом масле выше, чем в трансформаторном масле  $\approx$  в 2 раза.

Для наглядности, результаты предыдущих исследований [120] и настоящей работы [127] сведены в одну Таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Сравнение коэффициентов газообразования

	Трансформаторное масло [127]	Трансформаторное масло [120]
Количество импульсов	17459	1000
Суммарная энергия, Дж	0,0139	0,000163
Суммарный объем, мкл	2	1,2
Суммарный коэффициент газообразования, мкл/Дж	145	7360
Коэффициент газообразования на один импульс ЧР, мкл/Дж	0,0083	7,36

Анализируя таблицу, может возникнуть вопрос - с чем же связано столь сильное расхождение результатов при одинаковой постановке эксперимента? Во-первых, как предполагалось ранее в этом разделе, большое влияние оказало то, что автор пропустил большую часть ЧР. Это подтверждается картиной фазового распределения ЧР. В некоторые моменты ЧР развивались на каждом втором полупериоде (Рисунок 3.5).

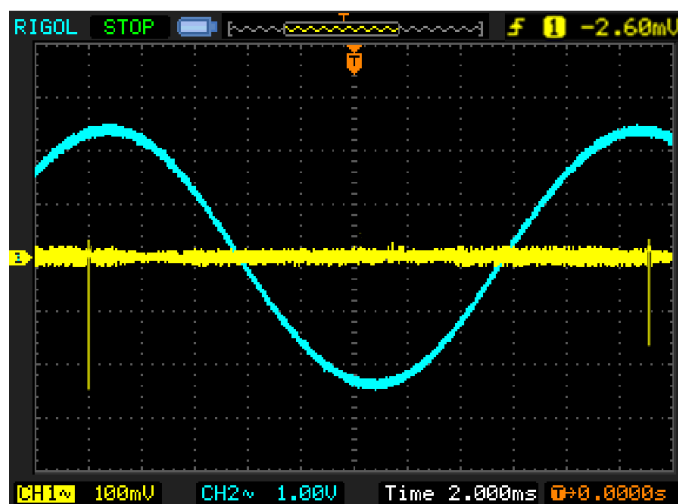


Рисунок 3.5 – Сигналы: синий – напряжение; желтый – сигнал ЧР

При этом автор сам привел картину фазового распределения ЧР, на которой видно, что ЧР происходили на каждом полупериоде 4 раза подряд (Рисунок 3.6). Однако стоит отметить, что такая картина не характерна для данной системы. ЧР не развиваются с такой частотой постоянно. В некоторые промежутки ЧР не развивались на протяжении нескольких минут. Поэтому определить среднее количество ЧР по одной или нескольким картинкам, представленным в данной работе – невозможно. В нашей же работе счетчик импульсов проверялся с помощью регистрации ЧР в воздушной полости с твердой оболочкой. В ней ЧР зажигаются стабильно на каждом полупериоде, при достижении необходимого напряжения. Таким образом, зная время приложения напряжения мы оценили количество ЧР, развившихся в этой полости и сравнили со значением, полученным на счетчике. Цифры совпали.

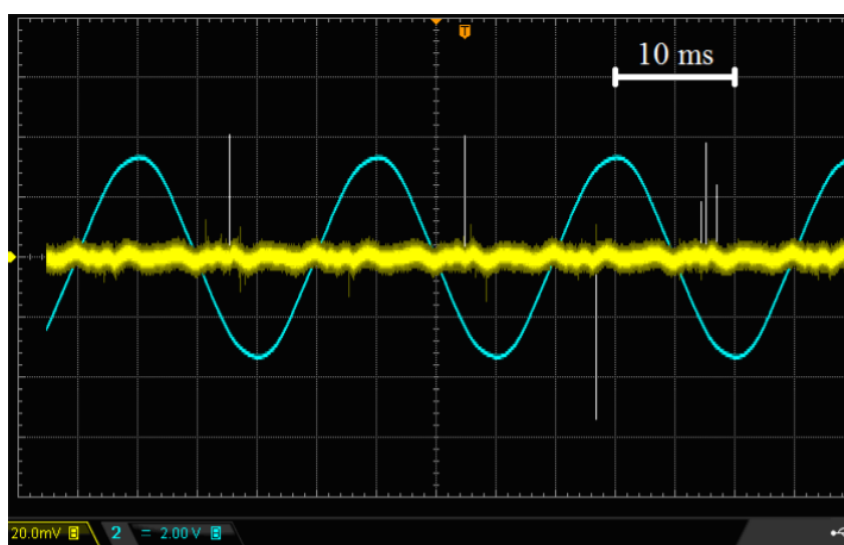


Рисунок 3.6 – Осциллограмма, представленная в диссертации [120]

Во-вторых, если посчитать энергию, которая выделяется при одном ЧР, то получится в нашем случае  $8 \cdot 10^{-7}$  Дж у [120] получается  $1,6 \cdot 10^{-7}$  Дж. Энергия имеет прямую зависимость от кажущегося заряда ЧР. При этом кажущийся заряд в [120] 1.5-25 пКл, в то время как в нашем исследовании 36-62 пКл. Единственной причиной может быть неправильное измерение тока ЧР. При сравнении показаний, регистрируемых осциллографами, было выявлено, что осциллограф, который

использовал в своей работе [120] показывал напряжение, в 2.5 меньшее, чем генерировалось на источнике импульсов. Второй, поверенный осциллограф, который использовался в данной работе, показывал точные значения. Именно по этой причине значения кажущихся зарядов ЧР ниже, чем в нашем исследовании.

Ну и третий, последний фактор, который не требует подробного рассмотрения – наличие воздуха в объеме трансформаторного масла. Этот фактор тоже повлиял на конечный результат. Мы видим, что при схожих условиях, включая напряженность электрического поля в ячейке и время проведения эксперимента, различаются суммарные объемы образовавшихся в результате разложения газов практически в 2 раза. Можно косвенно судить о том, что часть газов из масла диффундировала в пузырек воздуха. И результаты ХАРГ некорректны.

### **Выводы по главе 3**

- Выявлены ошибки в ранее разработанной методике по определению коэффициентов газообразования в трансформаторном масле;
- выявлены газы, характеризующие наличие разрядных процессов в рапсовом масле;
- получены коэффициенты газообразования в системе острие-плоскость для рапсового масла;
- уточнены коэффициенты газообразования в системе острие-плоскость для трансформаторного масла.

#### **Глава 4 ОПТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ГРАФЕНОВЫЕ НАНОТРУБКИ**

В последние годы наблюдается рост интереса к изучению влияния наноконпонентов на свойства различных материалов [53, 44, 42, 43]. Исследования ведутся так же и в направлении улучшения диэлектрических и теплофизических свойств электроизоляционных жидкостей. Связано это с тем, что путем добавления небольшого количества (в % отношении к массе основного материала) наноматериалов можно добиться изменения электропроводности, теплопроводности и электрической прочности жидкостей, например трансформаторного масла. Ранее уже определялись напряжение пробоя, скорость распространения стримера, устойчивость к окислению, диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление и коэффициент рассеяния в смесях основной жидкости, с добавленными наночастицами. Результаты таких исследований показывают, что диэлектрические свойства модифицированной жидкости сильно зависят от типа добавляемых наночастиц. При добавлении наночастиц одного типа напряжение пробоя жидкости значительно увеличивается, а скорость распространения стримера уменьшается. При добавлении наночастиц другого типа разброс данных о пробое уменьшается [128]. В этом и ряде других исследований [129, 130] обозначены проблемы (в частности седиментация), а также выявлена тенденция использования масел, содержащих наночастицы в качестве изоляционной жидкости трансформатора.

Несмотря на наличие огромного количества работ по исследованию наножидкостей, наноматериал ТУБАЛЛ не использовался в высоковольтных исследованиях. Наличие производства нанотрубок в Новосибирске, выявленные перспективы применения в разных областях, вызвали интерес к исследованию электрической прочности наножидкости на основе трансформаторного масла и нанотрубок Тубалл, а также поведения наночастиц в масле при воздействии сильных электрических полей.

## 4.1 Определение электрической прочности трансформаторного масла, содержащего графеновые нанотрубки

### 4.1.1 Материалы и методы

Для проведения исследований, направленных на изучения влияния графеновых нанотрубок на диэлектрические свойства трансформаторного масла марки ВГ использовалась готовая смесь фирмы “OSCIAL”, содержащая 0,2 % углеродных нанотрубок в смеси 0,4% поливинилбутираля в изопропиловом спирте. Одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT) TUBALL, можно также называть графеновыми нанотрубками. Диаметр нанотрубки  $\approx 1.6 \pm 0.4$  нм, длина  $\approx 5$  мкм. На рисунке 4.1, взятом с сайта фирмы производителя OSCIAL [131], представлен общий вид наноматериала.

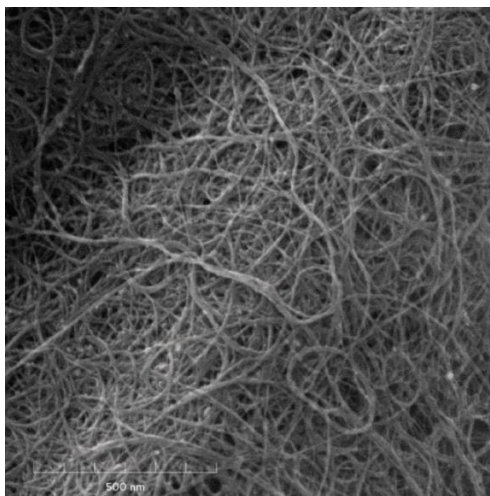


Рисунок 4.1 – Наноматериал TUBALL [131]

Выбор использования готовой смеси, а не сухих нанотрубок был обусловлен следующими обстоятельствами. Конечно, использование сухих нанотрубок увеличило бы точность измерений, однако существовал ряд проблем, связанных с их использованием. Во-первых, они обладали очень малой массой и легко попадали в конвекционные потоки окружающего воздуха. А попадая в дыхательные пути вместе с вдыхаемым воздухом, они могут вызывать сильное раздражение

дыхательных путей. Во-вторых, основная масса углеродных нанотрубок имела достаточно прочные связи между отдельными трубками, для разрыва которых была необходима ультразвуковая установка мощностью от 1.5 кВт и выше. Использование же спиртового раствора, обработанного ультразвуком, позволило избежать факторов, описанных выше, однако и тут имелись свои проблемы. Во-первых, в растворе присутствовали ПАВ и изопропиловый спирт, которые сами могли являться причиной изменения электрофизических свойств трансформаторного масла. Во-вторых, концентрации нанотрубок в спиртовом растворе со временем изменялась, так как спирт частично испарялся (масса углеродных трубок в объеме жидкости увеличивалась). С другой стороны, происходило налипание их на стенках сосудов, в которых этот раствор хранился (масса в объеме жидкости уменьшалась) (Рисунок 4.2). В связи с этим концентрация углеродных нанотрубок в исследуемых растворах была определена приблизительно, без учета данных факторов, основываясь на цифрах, предоставленных заводом изготовителем. В 1 капле спиртового раствора нанотрубок, массой 17,4 мг (измерение производилось на специализированных лабораторных весах) содержалось 34,8 мкг углеродных нанотрубок. В дальнейшем, концентрация нанотрубок определялась, в основном, по количеству капель, добавляемых в чистое масло.

Перед добавлением углеродных нанотрубок масло сушилось с использованием силикагеля и фильтровалось. Вакуумирования масла не производилось, так как происходила частичная дегазация в процессе диспергирования на ультразвуковой установке.



Рисунок 4.2 – Углеродные нанотрубки, осевшие на стенках сосудов



Для исследования влияния концентрации углеродных нанотрубок на электрическую прочность трансформаторного масла была проведена серия экспериментов на установке АИМ-90 [132], с измерительной ячейкой объемом 300 мл и полусферическим электродами радиусом 25.4 мм.

Измерительная ячейка (Рисунок 4.3) после каждой серии измерений промывалась техническим изопропиловым спиртом, с целью удаления углеродных нанотрубок. Далее производилось просушивание, с использованием высокотемпературного фена. После того, как в измерительную ячейку заливалось заранее подготовленное трансформаторное масло, с заданной концентрацией углеродных нанотрубок, на нее подавалось переменное напряжение частотой 50 Гц. Скорость нарастания напряжения приблизительно составляла 1 кВ/сек. После пробоя изоляционного промежутка снимались показания с киловольтметра.



Рисунок 4.3 – Измерительная ячейка

Ход работы по определению влияния графеновых нанотрубок на электрическую прочность трансформаторного масла состоял из четырех основных этапов:

- подготовка трансформаторного масла (сушка, фильтрация и дегазация);
- подготовка смеси графеновых нанотрубок с трансформаторным маслом;
- проведение измерений на установке АИМ-90;
- анализ полученных результатов.

#### 4.1.2 Подготовка исследуемой смеси

Для подготовки проб использовалось масло в объеме 400 мл, в который добавлялся спиртовой раствор, содержащий нанотрубки. При этом было применено 2 подхода к подготовке исследуемых наножидкостей:

- в трансформаторное масло добавлялось определенное количество спиртового раствора углеродных нанотрубок фирмы “OCSIAL”. После этого готовая смесь перемешивалась на магнитной мешалке;
- после добавления в трансформаторное масло спиртового раствора углеродных нанотрубок фирмы “OCSIAL” производилось ультразвуковое воздействие на полученную смесь.

В первом случае после добавления спиртового раствора в трансформаторное масло, наблюдалось быстрое распределение спирта по его объему. Углеродные нанотрубки коагулировались и образовывали черную пленку на его поверхности. При взбалтывании получившегося раствора графеновые нанотрубки принимали нитевидные формы (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Графеновые нанотрубки, добавленные в трансформаторное масло без дополнительной ультразвуковой обработки

Во втором случае при диспергировании смеси трансформаторного масла с графеновыми нанотрубками на ультразвуковом генераторе И10 [133], мощность которого составляла 1 кВт при диаметре излучателя 33 мм, уже на первых секундах

наблюдалось «растворение» их в объеме электроизоляционной жидкости. Общая длительность воздействия составляла 2 минуты. Однако, даже после диспергирования углеродные нанотрубки коагулировали и выпадали в осадок в течении суток (Рисунок 4.5, а). Стоит отметить, что плотного осадка не образовывалось. Так, при слабом перемешивании жидкости, связи в этих агломерациях разрывались и происходило однородное распределение нанотрубок по объему трансформаторного масла (Рисунок 4.5, б). Без диспергирования ультразвуком в изоляционной жидкости добиться похожего эффекта было невозможно (Рисунок 4.4). Значения электрической прочности трансформаторного масла после перемешивания коррелировали со значениями, полученными сразу после диспергирования.



Рисунок 4.5 – Выпадение в осадок диспергированных графеновых нанотрубок

#### 4.1.3 Проведение измерений без диспергирования пробы

Ниже представлены результаты определения электрической прочности трансформаторного масла, с добавленными в него углеродными нанотрубками концентрацией 400 мкг/л. После заполнения измерительной ячейки производилась ее установка в испытательный стенд АИМ – 90. При поднятии напряжения уже при средних напряженностях поля  $E_{cp} \approx 1$  кВ/мм начинали развиваться разрядные процессы. В связи с этим было принято решение о проведении дополнительных измерений электрической прочности на ячейке, с увеличенным до 7,5 мм межэлектродным зазором. В Таблице 4.1 приведены значения электрической

прочности нанотрансформаторного масла. Средняя электрическая прочность определялась путем деления напряжения, на котором произошел пробой на значение межэлектродного промежутка.

Таблица 4.1 - Электрическая прочность (кВ/мм) трансформаторного масла с добавлением графеновых нанотрубок (без диспергирования). Серия измерений.

Зазор, мм	Электрическая прочность E, кВ/мм															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2,5	0,8	1,0	1,2	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	1,0	1,1	0,9	0,9	1,0	0,9	1,2	0,9
7,5	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,3	0,9	2,0	1,3	1,5	1,3	1,3

Продолжение таблицы 4.1

Зазор, мм	Электрическая прочность E, кВ/мм															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
2,5	1,2	1,0	1,1	1,2	0,6	0,9	1,0	1,0	1,2	1,5	1,4	0,9	1,0	1,2	1,4	1,2
7,5	1,1	1,2	1,0	0,9	1,1	1,1	1,6	2,1	1,3	1,3	3,7	3,1	3,6	2,3	1,3	4,4

Продолжение таблицы 4.1

Зазор, мм	Электрическая прочность E, кВ/мм															
	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
2,5	1,1	0,6	0,8	1,2	0,7	1,0	1,0	1,0	0,8	1,4	1,0	0,9	0,8	1,2	1,0	1,0
7,5	4,0	6,1	7,3	7,7	8,4	8,1	8,4	8,5	8,5	8,5	8,7	8,5	8,0	8,7	8,5	8,5

#### 4.1.4 Проведение измерений с диспергированием пробы

В Таблице 4.2 приведены результаты измерений электрической прочности изоляционной жидкости, с диспергированными в нем наноуглеродными трубками, при стандартном межэлектродном зазоре в 2.5 мм. При увеличении зазора до 7,5 мм изменений значений электрической прочности выявлено не было.

Таблица 4.2 - Электрическая прочность трансформаторного масла с добавлением графеновых нанотрубок (раствор диспергирован)

C, мкг/л	Электрическая прочность E, кВ/мм, при различной концентрации углеродных нанотрубок C												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	56	57	58	58	58	55	57	56	55	55	52	57	55
87	13,2	14	13,2	13,2	13,2	13,6	13,2	14	12,4	12,4	14	12,8	13,2
174	11,2	10,8	11,6	12	12,4	12,8	12	12,4	12,8	12,8	12,4	12,4	12,8
26,1	12	10,8	12,4	10,8	12	11,6	10,8	10,8	10,8	12	12,4	12	11,2
348	8,8	10,4	10,8	11,2	11,2	11,2	10,8	10	10,8	11,2	10	11,2	10,4
435	9,2	9,2	9,6	10	10,8	9,2	10,8	9,6	10,4	9,6	10	11,2	10,2

Продолжение таблицы 4.2

C, мкг/л	Электрическая прочность E, кВ/мм, при различной концентрации углеродных нанотрубок C													
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
0	59	56	56	55	54	56	57	56	54	54	56	59	55	
87	12,8	13,2	13,2	13,6	13,2	14	14	13,2	13,6	12,8	12,8	12,8	12,8	
174	12,8	13,6	11,2	10,8	11,6	12,4	11,6	12,8	12	12,4	13,2	12	12	
26,1	11,6	9,6	12	8,8	10,8	10,4	12	11,6	11,6	11,2	10,8	10	10	
348	8,8	11,6	10,8	11,2	10,8	12	10,4	10,4	9,6	10,4	10,8	9,2	10,4	
435	9,6	9,6	10	10,8	10,8	10,4	9,6	9,6	10	10,4	8,8	9,6	9,6	

Продолжение таблицы 4.2

С, мкг/л	Электрическая прочность E, кВ/мм, при различной концентрации углеродных нанотрубок С												
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
0	55	54	47	58	55	55	55	60	57	55	56	51	55
87	14	12,4	12,4	12,8	13,6	12,4	13,6	12,8	12,8	12,8	13,2	13	12,5
174	12,4	12	12,8	12,4	13,2	12	12,8	12	11,6	12,4	10,8	11,2	13
26,1	10,8	10,4	11,2	12	11,6	10,8	10,8	10,4	10,8	11,2	10	12	10,6
348	10,4	10,8	10	9,6	10,8	10,4	10,8	10	10,8	10,4	10,8	9,7	10
435	9,6	9,2	9,2	10	10,8	9,6	9,2	8,8	9,6	10	10	9,2	9,6

Продолжение таблицы 4.2

С, мкг/л	Среднее значение E <sub>ср</sub> , кВ/мм	Дисперсия	Среднеквадратичное отклонение
0	22.4	0.44	0.66
87	13.2	0.25	0.5
174	12.2	0.45	0.67
261	11.1	0.65	0.8
348	10.5	0.47	0.69
435	9.8	0.36	0.6

#### 4.1.5 Обсуждение полученных результатов

Как видно из Таблицы 4.1, при увеличении межэлектродного зазора до 7.5 мм, в начальный момент электрическая прочность недиспергированного наномасла совпадала с результатами измерений при зазоре в 2.5 мм. Однако, после нескольких пробоев измерительной ячейки электрическая прочность трансформаторного масла в ячейке с большим зазором постепенно начинала увеличиваться. В

результате она выровнялась, и остановилась на значении  $E_{cp} \approx 9$  кВ/мм. На наш взгляд, это могло быть связано с 2 процессами:

- диспергирование агломераций графеновых нанотрубок ударной волной от пробоя;
- разрыв связей между наноуглеродными трубками, при прохождении через них электрического тока.

Стоит так же отметить, что при проведении повторных измерений на той же пробе трансформаторного масла в измерительной ячейке с зазором 2,5 мм значения не изменялись, электрическая прочность оставалась равной ранее измеренной при том же зазоре  $E_{cp} \approx 1$  кВ/мм. При диспергировании углеродных нанотрубок наблюдалось более стабильное поведение электроизоляционной жидкости. По мере увеличения концентрации снижалась электрическая прочность, данная зависимость носила практически линейный характер. При этом в рамках одной серии измерений электрическая прочность не изменялась по мере роста числа пробоев, как это было в случае с добавлением углеродных нанотрубок без диспергирования.

Низкое значение электрической прочности при недостаточной ультразвуковой обработке может, на наш взгляд, найти применение в электрогидравлических установках. Дело в том, что в этих установках заряженный конденсатор разряжают на промежуток в жидкости. При этом формируется волна давления, которую используют в технологических целях [134, 135]. Если электрическая прочность невелика, то и потери энергии на нагрев будут меньше, а преобразование электрической энергии в механическую энергию будет больше.

#### **4.2 Оптические исследования механизма пробоя трансформаторного масла, содержащего графеновые нанотрубки**

В разделе 4.1 был обнаружен интересный факт. Одна и та же электроизоляционная жидкость, с добавленными в нее графеновыми нанотрубками, вела себя по-разному в зависимости от способа обработки

полученной смеси. Для детального изучения механизма пробоя электроизоляционной жидкости была дополнительно проведена серия исследований, с использованием экспериментальной ячейки с однородным электрическим полем (Рисунок 4.6) [122].

#### 4.2.1 Экспериментальная ячейка

На рисунке 4.6 представлена фотография экспериментальной ячейки с плоскопараллельными электродами (2). Корпус которой (1) выполнен из оргстекла и соединен фторопластовыми болтами (2), для предотвращения возникновения ЧР на остриях резьбы. Для оптической регистрации процессов, происходящих в ячейке, при помощи скоростной видеокамеры, в корпус вклеено два оптических стекла (4). При необходимости, в нижнюю часть ячейки монтировалась игла, через которую в объем масла мог подаваться газ из баллона под давлением. В масле с кончика иглы выходили пузырьки, которые всплывали вертикально вверх.

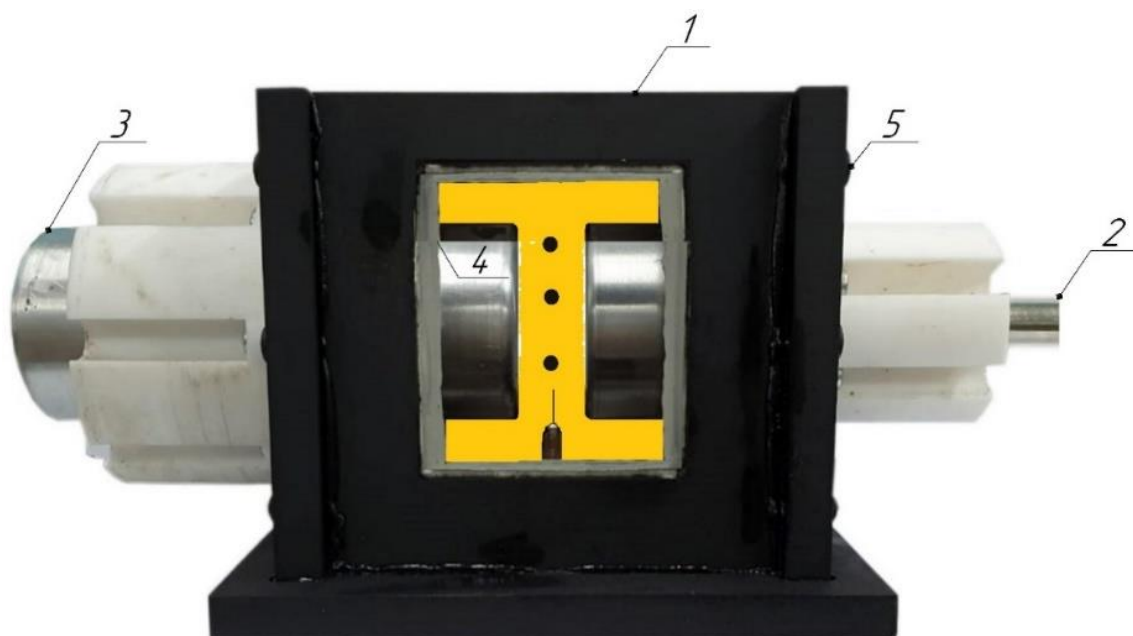


Рисунок 4.6 – Фотография экспериментальной ячейки с плоскопараллельными электродами:

1 – корпус ячейки; 2, 3 – высоковольтные электроды; 4 – окно для обеспечения оптической регистрации; 5 – фторопластовые болты



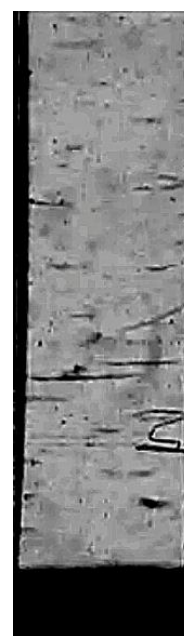
Подготовка исследуемой смеси трансформаторного масла, а также характеристика графеновых нанотрубок описаны в разделах 4.1.1 и 4.1.2. Экспериментальная ячейка, заполненная исследуемой жидкостью, помещалась в экспериментальную установку, описанную в разделе 3.1. Затем плавно увеличивалось напряжение до тех пор, пока в ячейке не происходил пробой.

#### 4.2.2 Экспериментальные результаты, касающиеся механизма пробоя

В свободном состоянии агломерации углеродные нанотрубки распределены по трансформаторному маслу хаотично (Рисунок 4.7, а). После подачи переменного напряжения частотой 50 Гц на экспериментальную ячейку с недиспергированным наномаслом было зарегистрировано выстраивание агломераций графеновых нанотрубок вдоль электрического поля (Рисунок 4.7, б). Плоскопараллельные высоковольтные электроды располагались слева и справа от представленного изоляционного промежутка.



а



б

Рисунок 4.7 – Выравнивание вдоль электрического поля. Здесь темные полосы – это агломераты нанотрубок

При повышении напряжения некоторые из агломераций графеновых нанотрубок начинали соединяться в направлении электрического поля и образовывать «углеродный мостик», замыкающий межэлектродный промежуток. При этом, данный процесс наблюдался при увеличении зазора вплоть до 20 мм (ограничен конструкцией ячейки). Было замечено, что с увеличением промежутка увеличивалось и время, необходимое для того, чтобы отдельные агломерации углеродных нанотрубок выстроились в ряд.

На кадрах, полученных с видеозаписи процессов, происходящих в межэлектродном пространстве экспериментальной ячейки, при повышенных напряженностях электрического поля  $E_{cp} \approx 1,2$  кВ/мм, представлен пробой трансформаторного масла, с добавленными в него графеновыми нанотрубками (Рисунок 4.8). При детальном рассмотрении рисунка 4.8 можно увидеть, что агломерации углеродных нанотрубок образовали мостик (Рисунок 4.8, 1 кадр), по которому протекал ток. Здесь видны светлые пятна, показывающие светящиеся локальные микроразряды между участками мостика.



Рисунок 4.8 – Пробой углеродного мостика из агломератов наночастиц

В результате протекания тока образовались маленькие газовые пузырьки (Рисунок 4.8, 2 кадр). Затем мы зарегистрировали повторный разряд точно в этой же области (Рисунок 4.8, 9 кадр), сопровождавшийся уже более интенсивным газообразованием (Рисунок 4.8, 9-12 кадры). Здесь пузырьки имеют больший размер и ровную поверхность, это видно из кадров, где в центре каждого пузырька наблюдается светлое пятно. В результате прохождения электрического тока, под

действием температуры или микроразрядов, связи между агломерациями графеновых нанотрубок разрушились и разрядные процессы завершились. Обнаруженное явление объясняет тот факт, что с ростом количества разрядов увеличивается электрическая прочность недиспергированного трансформаторного масла (Таблица 4.1).

В случае же с диспергированными графеновыми нанотрубками, даже при высокой концентрации наночастиц  $C \approx 1$  мг/л в трансформаторном масле, при проведении исследований по методике, описанной выше, не было зарегистрировано «углеродных мостиков». Более того, отдельных углеродных нанотрубок на записи видно не было.

#### 4.2.3 Экспериментальные результаты, касающиеся течений

Также, при подробном анализе видеозаписей экспериментов, проведенных в разделе 4.2.2 с недиспергированной смесью трансформаторного наномасла, было выявлено нехарактерное однонаправленное движение многих агломераций углеродных нанотрубок под действием однородного электрического поля частотой 50 Гц. Как видно из рисунка 4.9, в определенный момент агломерация начинала движение в сторону противоположного электрода, вдоль направления электрического поля. В представленном случае частица продолжала движение на протяжении  $t \approx 25$  мсек. За это время знак напряжения менялся как минимум 2 раза. Однако агломерация направления своего движения не меняла. Средняя напряженность электрического поля при этом составляла  $E_{cp} \approx 1,2$  кВ/мм.

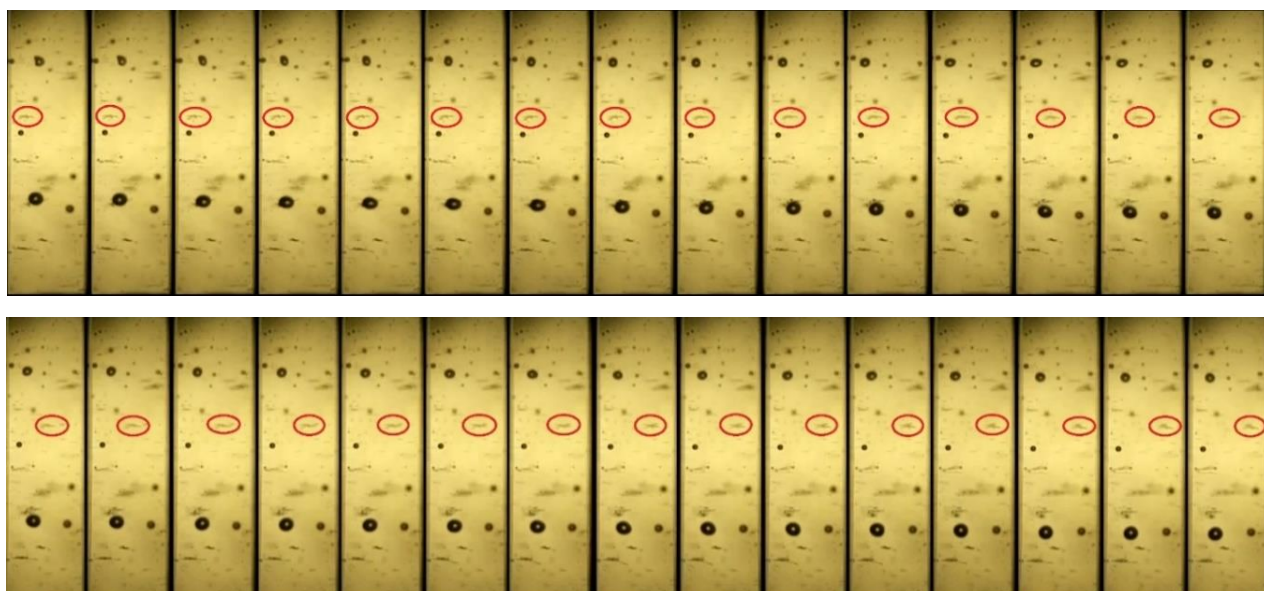


Рисунок 4.9 – Движение графеновых агломераций. Красным кружком выделен отслеживаемый агломерат

На рисунке 4.10 приведены результаты измерения динамики самого продолжительного ( $\approx 6.5$  периодов напряжения) движения подобного скопления графеновых нанотрубок. Для наглядности все диаграммы (Рисунок 4.10) дополнены схематическим изображением синусоиды частотой 50 Гц:

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 пройденного графеновой агломерацией расстояния, от предшествующего места измерения, за  $t \approx 0,83$  мсек;

в) средняя скорость – определялась делением обще пройденного агломерацией расстояния, на все время ее движения.

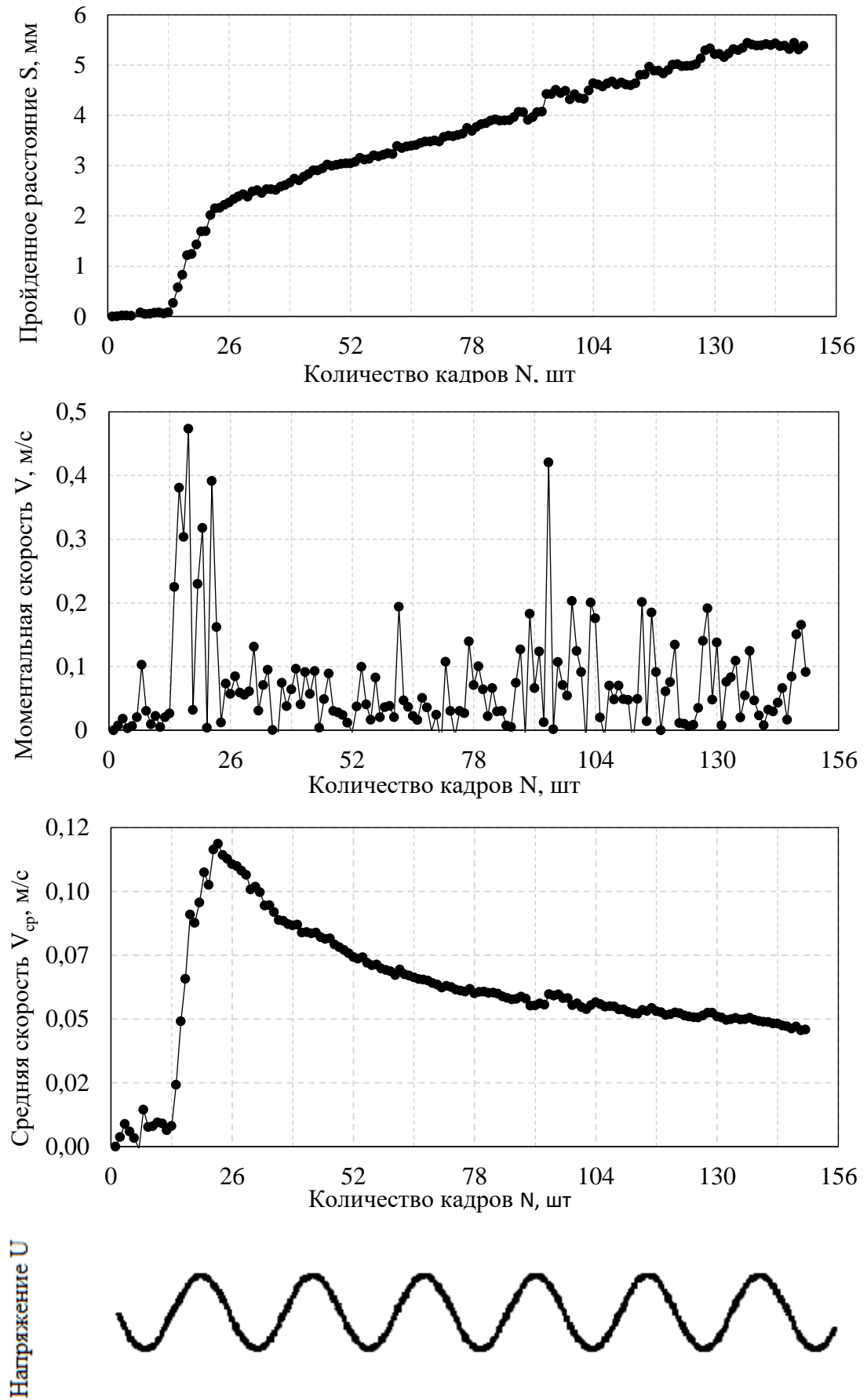


Рисунок 4.10 – Значение параметров агломераций углеродных нанотрубок

Так же было замечено, что при пропускании пузырьков через объем масла ячейки, находящейся под напряжением, некоторые из них сносились в сторону, то есть в среде возникали мощные течения электрогидродинамического характера. На серии кадров рисунка 4.11 видно, как всплывающий вертикально вверх пузырек начинает отклоняться в горизонтальном направлении, к правому электроду. При этом слева очень хорошо виден протяженный объект, очевидно состоящий из нанотрубок, который и выступает генератором течения.

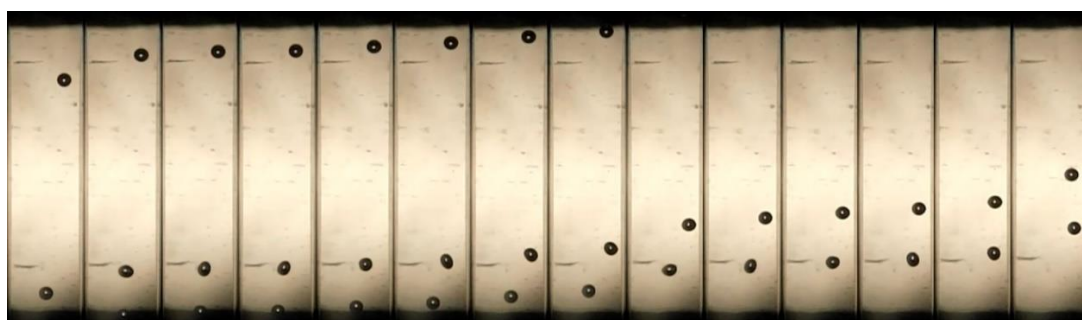


Рисунок 4.11 – Течение, вызванное агломерацией углеродных нанотрубок

Пузырьки (вверху и два внизу) огибают агломераты нанотрубок по сложным траекториям. Это указывает на наличие течений. Траектории пузырьков повторяют друг друга. После того, как пузырек уходит из области течения, он продолжает двигаться строго вертикально. Средняя скорость течения (оценка по сносу пузырьков вбок)  $V_{cp} \approx 6$  см/с.

#### 4.2.4 Обсуждение полученных результатов

Наиболее очевидное предположение о причинах течений и цепь событий - локальное усиление поля на кончике агломерации графеновых нанотрубок, возникновение инжекции зарядов в сильном поле из кончика нанотрубок, воздействие сильного электрического поля на возникший объемный заряд, передача импульса жидкости, возникновение течения. Однако сразу возникает вопрос. Ровно через половину периода на объемный заряд начнет действовать сила в прямо противоположном направлении. Почему течение не идет в обратную

сторону? На наш взгляд, здесь нужно учесть инерцию жидкости. Во время действия противоположной силы поток может начать тормозиться, но на следующем полупериоде он снова ускоряется, так что в среднем движение происходит в одну сторону. Скорость движения частиц не противоречит ЭГД модели. Однако пока внятной модели, объясняющей постоянство скорости частиц не предложено.

#### **Выводы по главе 4**

- Нанотрубки Tuball не увеличивают электрическую прочность трансформаторного масла. Агломерированное наномасло имеет электрическую прочность примерно в 20 раз меньше электрической прочности чистого масла. Диспергированное наномасло имеет электрическую прочность примерно в три раза меньше прочности чистого масла;

- в наномасле возникают интенсивные электрогидродинамические течения в однородном электрическом поле. Течение не меняет направления при смене полярности напряжения, т.е. фаза напряжения не оказывает влияния на скорость этих нанообразований;

- механизм низкой электрической прочности связан с образованием мостиков между электродами и с усилением напряженности поля у протяженных наноагломератов;

- низкая электрическая прочность наножидкостей, на наш взгляд, может найти применение в разработке электрогидравлических установок, а также различных электрогидродинамических устройств для охлаждения.

## **Глава 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ И ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ**

### **5.1 Газовые пузырьки**

Пузырьки в высоковольтном оборудовании с жидкой электроизоляцией обычно считаются одним из наиболее частых источников возникновения электрического пробоя [136-139]. Кроме того, пузыри под действием электрического поля играют важную роль в различных технических процессах: стерилизация пищевых продуктов при приготовлении (технология нетеплового консервирования) [140], фазовые переходы [141], теплообменники [142], реакторы барботажных колонн [143] и т. д. Поверхностное натяжение играет важную роль при деформации пузырьков. Предполагается, что под действием электрического поля коэффициент поверхностного натяжения может уменьшаться [144, 145] и даже принимать разные значения в зависимости от ориентации электрического поля относительно границы раздела [146]. Различное поведение поверхностного натяжения должно приводить к различным деформациям пузырьков [149].

#### **5.1.1 Методика проведения экспериментов**

Ход работы по исследованию характерного поведения газовых пузырьков и водяных капель в трансформаторном масле состоял из пяти основных этапов:

- подготовка исследуемой жидкости (сушка, фильтрация и дегазация);
- установка экспериментальной ячейки (Раздел 4.2.1, Рисунок 4.6) в экспериментальную установку (Раздел 3.1.1, Рисунок 3.2);
- проведение исследования (введение пузырька или капли в экспериментальную ячейку и видео регистрация);
- измерение размеров пузырька или капли в процессе деформации;
- расчет деформаций по полученным экспериментальным данным.



### 5.1.2 Экспериментальные результаты

Покадровый анализ видеозаписи выявил частоту деформации, которая была равна 100 Гц — это удвоенная частота действующего напряжения. На рисунке 5.1 показано изображение плавающих пузырьков разного диаметра, помещенный в центр экспериментальной ячейки: (А) в момент времени, когда напряжение проходит через ноль, (В) в момент значения амплитуды напряжения. Электроды располагаются вертикально слева и справа от плавающих пузырей. Стрелка показывает направление всплывания.

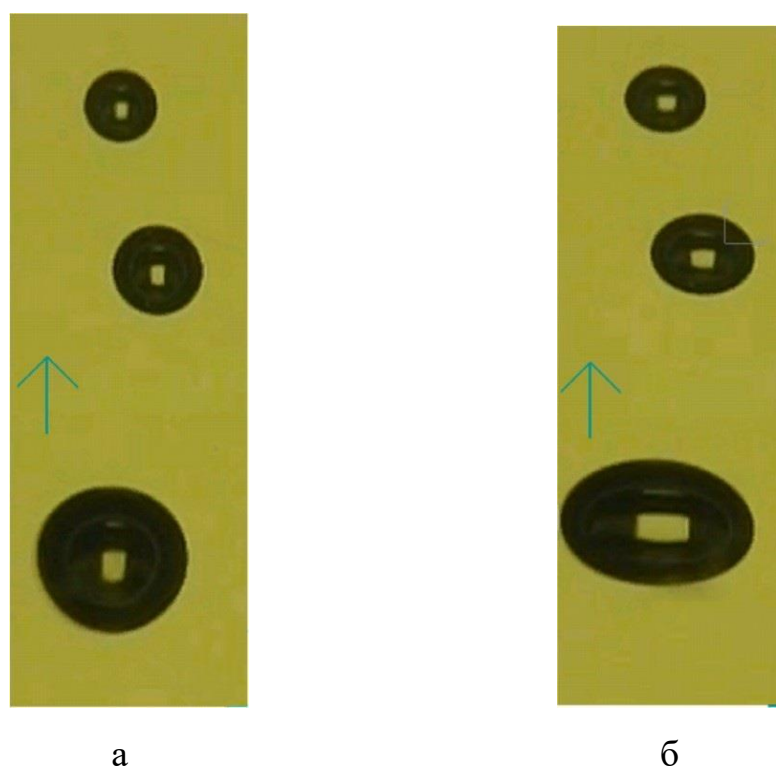


Рисунок 5.1 – (а) Пузырьки разного диаметра в момент, когда величина электрического поля равна нулю. (б) Те же пузыри в момент значения амплитуды напряжения

### 5.1.3 Обсуждение результатов

Из рисунка 5.1 видно, что более крупные пузырьки деформируются сильнее. Деформация пузырька характеризуется выражением:

$$\Delta = \frac{a - b}{2R_0}$$

где,  $a$  - удлинение пузырька вдоль направления электрического поля,  $b$  - удлинение пузырька, перпендикулярного этому направлению, а  $R_0$  – размер пузырька в момент отсутствия напряжения. В электрическом поле есть хорошо известное выражение для определения  $\Delta$  в линейном приближении:

$$\Delta = \frac{(\varepsilon_l - \varepsilon_g)^2 \varepsilon_0 R_0 E_1^2}{8\sigma \varepsilon_l}$$

Здесь,

$\varepsilon_l = 2.3$  - диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла;

$\varepsilon_g = 1$  - диэлектрическая проницаемость газового включения;

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  - электростатическая постоянная;

$E_1 = \frac{3\varepsilon_l E_0}{2\varepsilon_l + \varepsilon_g}$  - электрическое поле внутри сферического пузыря;

$E_0 = 3.3$  кВ/мм - среднее значение электрического поля внутри ячейки;

$\sigma = 0,0464$  Н/м - поверхностное натяжение чистого трансформаторного масла.

Расчетные  $\Delta_p$  и экспериментальные  $\Delta_s$ , результаты представлены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 Теоретические и экспериментальные измерения деформации пузырей.

	Начальный радиус, мм		
	0.5	0.6	1
$\Delta_p$	0.136	0.168	0.279
$\Delta_s$	0.2	0.25	0.46

Они также изображены в виде графиков на рисунке 5.2.

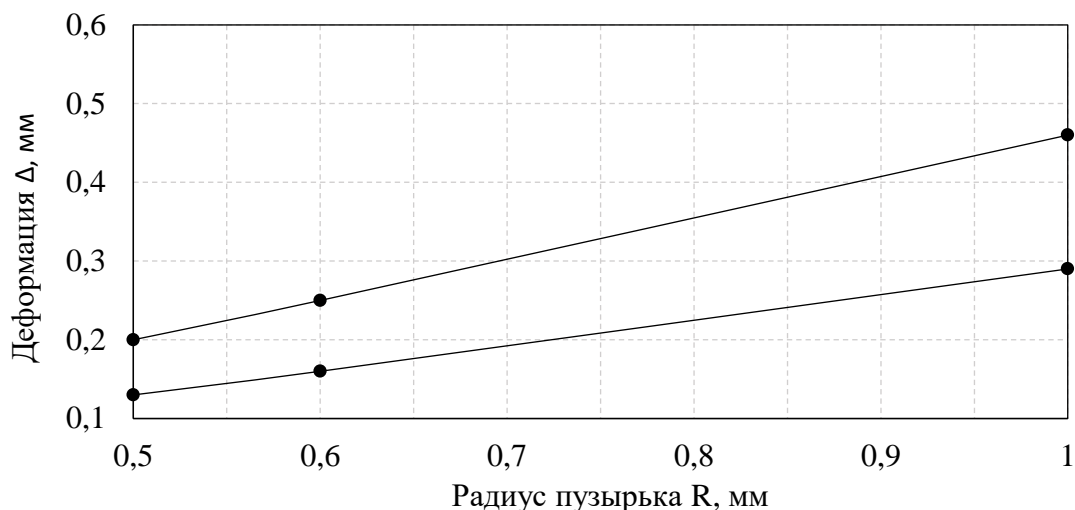


Рисунок 5.2 – Кривые деформации пузырька, полученные:  
1-расчетным; 2- экспериментальным методом

Кривые на рисунке 5.2 сильно различаются. Мы думаем, что это связано с неопределенностью в значении  $\sigma$ . Известно, что поверхностное натяжение трансформаторного масла изменяется в процессе эксплуатации. Использованное масло может иметь значение  $\sigma$  почти вдвое ниже, чем у свежего масла. В частности, поверхностное натяжение свежего масла должно быть не ниже 0,04 Н/м в то время, как наименьшее допустимое значение  $\sigma$  использованного масла не должно быть ниже, чем 0,022 Н/м. В наших экспериментах использовали масло, бывшее в эксплуатации. Следовательно, его значение должно быть ниже табличного, и можно подобрать значение  $\sigma$ , которое лучше всего согласуется с экспериментальными данными. На рисунке 5.3 значения деформации показаны с использованием подобранного коэффициента  $\sigma = 0,031$  Н/м.

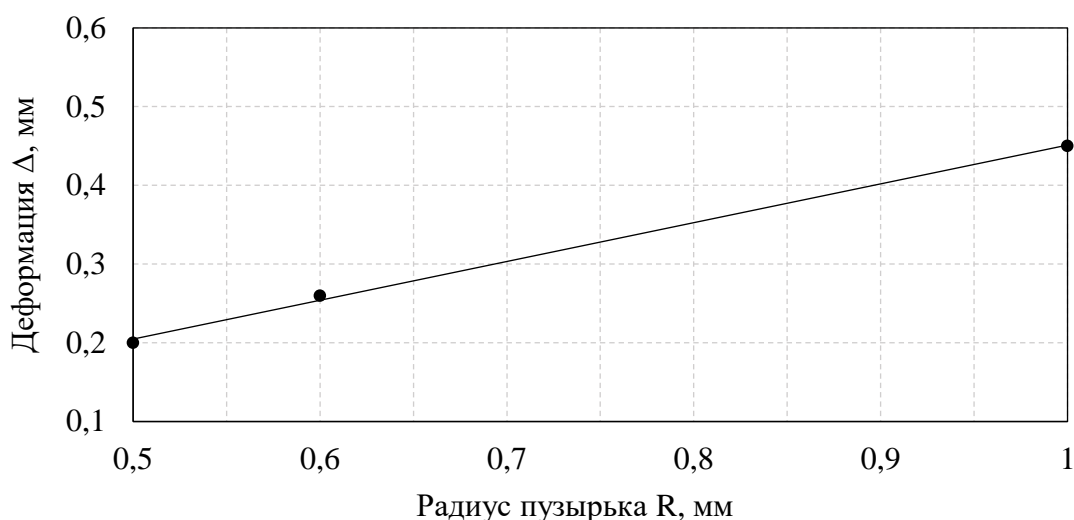


Рисунок 5.3 – Экспериментальные (кривая) и теоретические (точки) значения деформации пузырька при  $\sigma = 0,031$  Н/м

В таком случае, экспериментальные и расчетные точки практически совпадают. По нашему мнению, снижение на 30% значения  $\sigma$  может быть вызвано старением масла. В целом, экспериментальные и расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что значение  $\sigma$  не изменяется в электрическом поле с напряженностью до 4 кВ/мм. Этот вывод важен, поскольку в некоторых моделях предполагается, что значение  $\sigma$  зависит от направления электрического поля. Такое поведение должно привести к независимой от размера пузырька деформации. В экспериментах степень деформации пропорциональна размеру пузырька, это указывает на постоянное значение  $\sigma$ .

## 5.2 Водяные капли

Исследование поведения капель воды в электрическом поле актуально для ряда отраслей: нефтепереработка, химия, гидродинамика, физика двухфазных сред, электрические технологии [147-152]. Имеются работы по поведению капель в однородном поле постоянного тока [149], периодически изменяющемся поле [148], переменном однородном и неоднородном поле [147, 150], изучаются условия разрушения и слияния капель [151, 152]. Влияние водяных капель и газовых

пузырьков на электрическую прочность диэлектрических жидкостей известно давно [153]; они отрицательно влияют на напряжение пробоя, особенно в случае малых межэлектродных промежутков [154]. Наиболее актуальной проблемой является поведение капель воды в трансформаторном масле, так как вода образуется при разрушении бумажной изоляции, может перейти из атмосферы вовремя так называемого «трансформаторного дыхания», а при перепадах температуры может выделяться эмульсионная форма капель, опасная для электроизоляции [154, 155]. Поведение капель в поле постоянного тока детально изучено оптически [154, 155], но недостаточно изучено для переменного поля, которое фактически действует в трансформаторе.

### 5.2.1 Экспериментальные результаты

Измеренный диаметр капли воды составил 2,6 мм, напряженность электрического поля изменялась от 0,5 кВ/мм до 0,9 кВ/мм (среднеквадратичное значение). В слабых электрических полях  $E_{amp} < 0,5$  кВ/мм деформация практически незаметна, а удлинение происходит при удвоенной частоте действующего напряжения. В более сильных полях  $E_{amp} \sim 1,0$  кВ/мм сначала деформация капли происходит в режиме колебаний, как и в предыдущем случае. Затем при каждом последующем удлинении пузыря его форма начинает изменяться. Капля становится длиннее, ее кончики приобретают коническую форму. В этом случае возможны 2 варианта дальнейшего развития деформации: капля может доходить до касания электродов, либо микрокапли будут выбрасываться из кончика капли. Последний случай показан на рисунке 5.4.

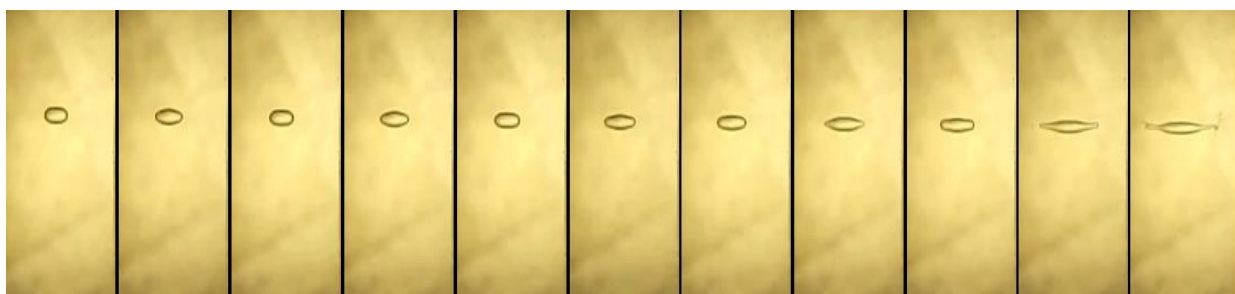


Рисунок 5.4 – Длительная деформация капли воды под действием переменного напряжения.  $E_{\text{amp}} = 0,9$  кВ/мм

По сравнению с деформацией газовых пузырей, которая подробно описана в разделе 5.1.2 [156] можно сказать, что деформация водяных капель имеет более высокие значения, для точного определения которых требуются дополнительные исследования. Здесь, на рисунке 5.4 представлена не вся последовательность кадров, выбираются только моменты, когда напряжение достигает амплитудных значений, и моменты, когда напряжение приближается к нулю. Видно, что деформация продолжает развиваться в течение нескольких периодов. Такая картина наблюдается, если амплитудное значение напряженности поля больше  $E_{\text{amp}} > 0,8$  кВ/мм, и чем больше напряженность, тем быстрее переход к длительной деформации. Со временем, после того как капля пересечет зазор, ее поведение изменится и станет еще более сложным (Рисунок 5.5).

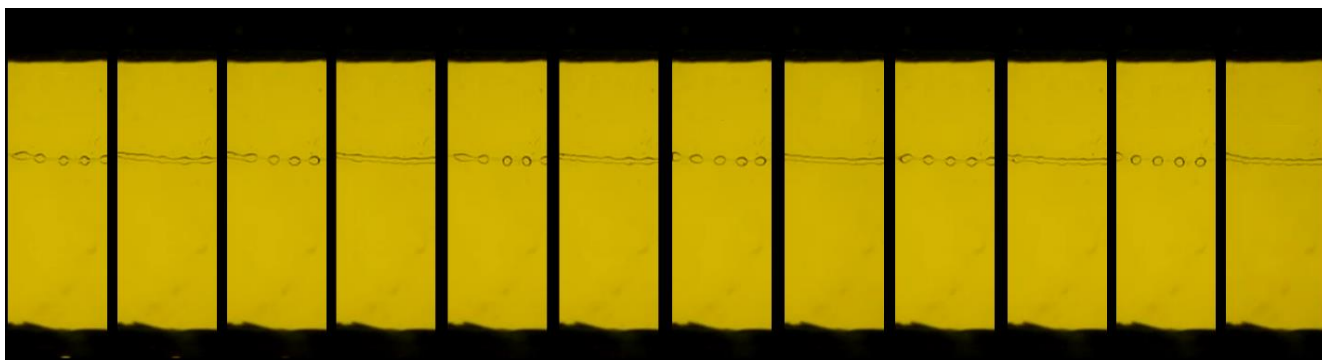


Рисунок 5.5 – Различные формы элементов водяного моста под действием переменного напряжения. Кадры, снятые в последовательные моменты отсутствия напряжения и максимума напряжения.  $E_{\text{amp}} = 0,85$  кВ / мм

В моменты, когда напряжение близко к нулю, водяной мост превращается в отдельные сферические капли с промежутками между ними. В моменты изменения амплитуды напряжения отдельные капельки исчезают, превращаясь в сплошной столб между электродами. Причем при каждом последующем образовании отдельных капель они появляются в том месте, где в предыдущий раз был разрыв между каплями! На рисунке 5.5 также видно, что вся структура водной толщ смещается вниз под действием силы тяжести.

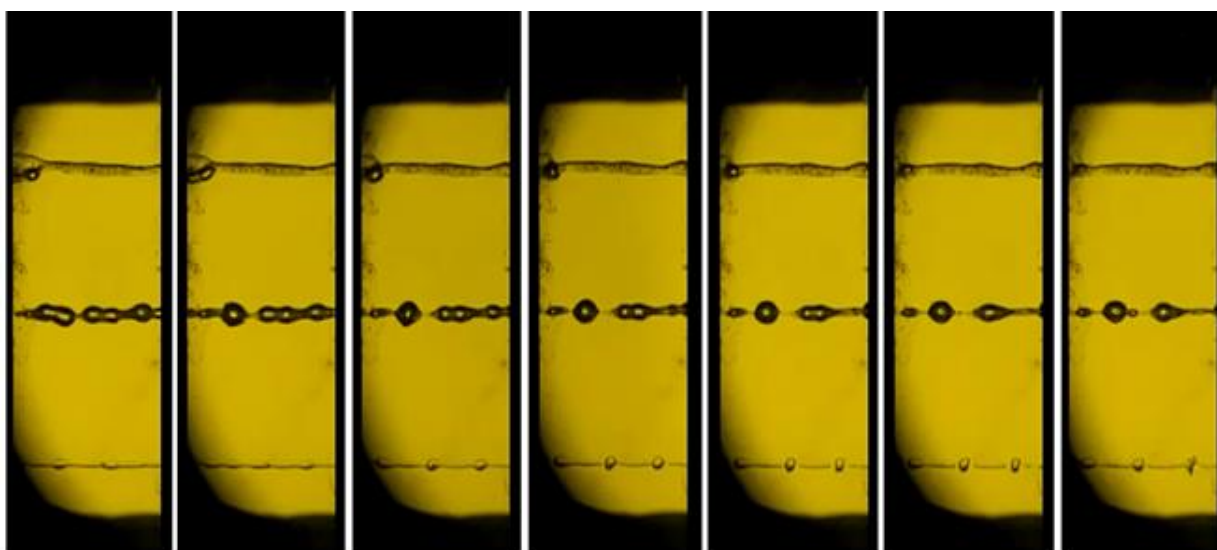


Рисунок 5.6 – Интенсивное испарение в растянутой капле воды.

$$E_{\text{amp}} = 0,9 \text{ кВ / мм}$$

Паровые пузыри (Рисунок 5.6) появляются внутри водяного моста. Они, как капли, появляются и исчезают, постепенно увеличиваясь в размерах. Более того, под действием выталкивающей силы вся конструкция «пузырь-вода» меняет направление движения и начинает всплывать вверх.

### 5.2.2 Обсуждение экспериментальных результатов

Методика определения деформации пузырька (капли) подробно описана в разделе 5.1.3. Ниже, на рисунке 5.7 представлены результаты экспериментальных исследований и расчетная кривая.

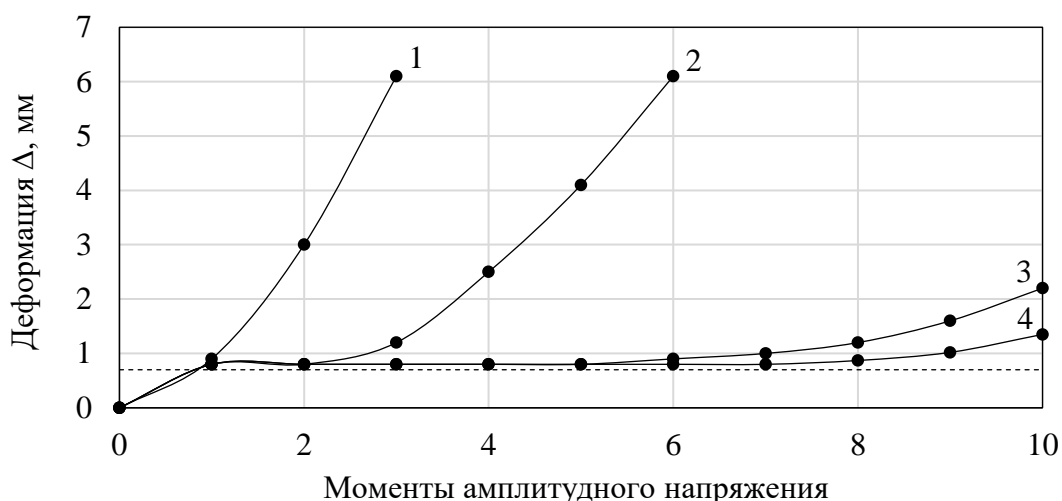


Рисунок 5.7 – Зависимость деформации от времени. Реперные точки - моменты достижения амплитудных значений напряженности поля. Электрические поля: 1 -  $E_{amp} = 1,2$  кВ / мм; 2 -  $0,85$  кВ / мм; 3 -  $0,8$  кВ / мм; 4 -  $0,65$  кВ / мм; 5 - расчет по (1) для  $E_{amp} = 0,8$  кВ / мм

Как видно из рисунка 5.7 расчетные и экспериментальные значения деформации каплей не соответствуют друг другу. Экспериментальные значения намного больше расчетных. Более того, если при малых напряжениях качественная картина деформации каплей и пузырьков (Раздел 5.1.2) соответствовала друг другу (колебательное движение с частотой 100 Гц, восстановление сферической формы при отсутствии напряжения), то при больших значениях электрического поля деформация со временем увеличивается. И это заканчивается установлением водяного мостика или неустойчивостью с выбросом микрокапель с острых концов капли.

Как можно объяснить такое деформационное поведение? Чисто диэлектрическое поведение, даже если с формальной точки зрения диэлектрическая проницаемость проводящей капли бесконечна, не позволяет нам что-либо полностью объяснить. Torza, S., Cox, R.G. и Mason [157], исследовали эффекты электропроводности, вязкости, ЭГД-поток внутри и снаружи капли, но в их модели присутствует только колеблющаяся часть деформации. Дальнейшее развитие их модели [158-160] с учетом природы жидкости не может объяснить эти



явления. Эксперименты с каплями подтвердили возможность их разрушения, аналогичного зарегистрированным нами, а также появление нитчатых структур. Однако длительная деформация и периодическое образование капель в статьях не упоминаются.

Что же касается водяных мостиков, то развитие неустойчивости, такой как конус Тейлора, прекрасно объясняет образование микрокапель на вершине капли, однако длительная деформация с этих позиций также не объясняется.

Попробуем объяснить образование капель из тела водного моста. Во-первых, капля растягивается до перемычки. Во-вторых, перемычка не является цилиндром, в ней возникает периодическая структура, состоящая из сферических капель с промежутком между ними, который иногда представляет собой не промежуток, а тонкую нить между каплями. Следует отметить, что при амплитудном значении напряжения капля максимально деформируется, принимая цилиндрическую форму (жидкость равномерно распределяется по водяному мостику в направлении электрического поля). А при отсутствии напряжения вода в этом столбе имеет тенденцию образовывать несколько сферических капель. В этом случае капли начинают формироваться на участках, где в предыдущий период произошел разрыв между каплями воды. Это создает впечатление направленного движения капель в водном мосту.

Как это можно объяснить? Самый простой способ - из энергетических соображений. Энергия системы состоит из электрической энергии  $\frac{Q^2}{2C}$  и поверхностной энергии  $\sigma S$ . Здесь  $Q$  - заряд обкладок конденсатора,  $C$  - его емкость,  $S$  - площадь поверхности капли,  $\sigma$  - поверхностное натяжение. Электрическая емкость системы снижается с образованием длинного столба, а значит, электрическая часть энергии уменьшается. При этом растет поверхностная часть. Полная энергия системы уменьшается при растяжении, в том случае, когда напряженность поля велика, а именно при максимальном напряжении. В моменты, когда напряженность поля мала, электрическая энергия также мала и преобладает

поверхностная энергия. Для сферических капель она минимальна, соответственно столб распадается на сферические капли.

Почему в следующем полупериоде образуются капли в местах, где были разрывы? Видимо, это связано с инерционностью жидкости. Сжатие капли в цилиндр сопровождается центростремительным движением жидкости как внутри капли, так и снаружи. Инерция движения приводит к схлопыванию капли и образованию нитевидной структуры, а затем и к ее исчезновению в этом месте.

Далее происходит образование паровых пузырьков. Когда границы удлиненной капли соприкасаются с высоковольтными электродами, через нее начинает течь ток. Понятно, что электропроводность капли намного выше электропроводности окружающего масла. Высокая диэлектрическая проницаемость воды приводит к диссоциации примесей, растворенных в трансформаторном масле, после их проникновения внутрь капли воды. Протекание тока приводит к нагреву и последующему перегреву жидкости внутри водяного моста и началу процесса испарения. Когда капли начинают формироваться, плотность тока увеличивается на возникающих волокнах, соединяющих соседние капли. Это можно увидеть на рисунке 5.6. Сначала пар начинает появляться в виде одиночных включений между сферическими каплями воды. Кажется, что пузыри обычно исчезают к моменту образования следующего столбика. Время схлопывания пузырька пара в данном случае определяется охлаждением пузырька за счет диффузии температуры от стенки  $\tau \approx \frac{r^2}{\pi\kappa}$ , где  $r$  - радиус пузырька,  $\kappa$  - коэффициент температуропроводности водяного пара. Оценки показывают, что для миллиметрового пузырька это время составляет примерно 3-5 мс, т.е. пузырек должен схлопнуться. В результате схлопывания возникает волна давления, и происходит дробление капель. Вследствие чего масло насыщается микрокаплями воды. При этом с каждым полупериодом напряжения интенсивность газообразования увеличивается. В определенный момент количество пара в зазоре становится настолько большим, что мост начинает двигаться вверх (вместо того,

чтобы двигаться вниз). В этом случае паровые полости могут возникать и не исчезать.

### Выводы по главе 5

- Исследована деформация пузырьков воздуха в трансформаторном масле под действием переменного напряжения;
- экспериментально доказано, что степень деформации пропорциональна размеру пузырька, это указывает на постоянное значение  $\sigma$ ;
- в экспериментах с поведением капли воды под воздействием переменного электрического поля было обнаружено несколько новых явлений:
  - длительная деформация капли до перекрытия зазора;
  - образование и разрушение водяного мостика при переходе напряжения через ноль и образование сферических капель;
  - капли образуются в местах, где в предыдущем полупериоде были разрывы;
  - парообразование в перемычках водяного моста, что способствует насыщению масла микрокапельками воды.
- рост количества ЧР во всплывающих пузырьках, если до этого проводился эксперимент с каплями в том же масле.

## Глава 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКАХ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

### 6.1 Частичные разряды в свободно плавающих пузырьках

Обычно газовые пустоты в твердой электроизоляции рассматриваются как основной источник ЧР при воздействии высокого напряжения. Именно они вызывают старение изоляции и определяют срок службы оборудования [140, 141, 145, 146]. Физический механизм и основные характеристики ЧР в газовых полостях твердых диэлектриков исследованы в работах [5, 6, 142, 143]. В этих работах сделан вывод о том, что напряжение зажигания ЧР внутри полостей определяется законом Пашена, а угасание происходит за счет действия зарядов противоположного знака, осевших на диэлектрических стенках полостей (в результате развития ЧР). Подробно исследованы зависимости частоты следования ЧР от приложенного к изоляции напряжения, изучены процессы разрушения диэлектриков под действием ЧР и другие важные вопросы. Авторы [147-155] изучали феноменологию ЧР в жидкостях в контексте электрического пробоя жидкостей. Поэтому использовались электродные системы с сильно неоднородным полем. Одним из важных вопросов был вопрос о начальной фазе разложения жидкости. Установлено, что в зазорах «острие-плоскость» с напряженностью поля более 10 МВ / см первым образуется стример, что приводит к образованию парогазовых пузырьков [154]. В свою очередь, появление ЧР в пузырьках приводит к разрастанию канала разряда и, в конечном итоге, к электрическому пробоя всего промежутка. С практической точки зрения следует отметить, что пузырьки в масле в высоковольтном электрооборудовании могли появиться не только в результате распространения стримера, но и по другой причине. Чаще всего пузыри возникают из-за недостатков технологических процессов изготовления оборудования; кроме того, они могут появиться в процессе эксплуатации из-за локального перегрева в определенных местах конструкций, при кавитации [144] в потоках жидкости, создаваемых системой охлаждения и т. д. Пузыри в масле являются одними из

самых опасных включений, поскольку могут привести к отключению электроэнергии из-за аварии [156].

### **6.1.1 Методика проведения экспериментов**

Ход работы по исследованию характеристик ЧР во всплывающих пузырьках в трансформаторном масле состоял из пяти основных этапов:

- подготовка исследуемой жидкости (сушка, фильтрация и дегазация);
- установка экспериментальной ячейки (Раздел 4.2.1, Рисунок 4.6) в экспериментальную установку (Раздел 3.1.1, Рисунок 3.2);
- проведение исследования (введение пузырьков гелия в экспериментальную ячейку и регистрация);
- анализ видеозаписи;
- анализ электрического и светового сигналов.

Стоит отметить, что при проведении исследований размер межэлектродного промежутка был выбран равным  $D = 6,8$  мм. Диаметр пузырька гелия получался равным  $d = 1,5$  мм. Частота подачи пузырьков регулировалась так, чтобы одновременно в области между электродами находилось 3-4 пузырька. Всплывали они со скоростью 12 см/сек.

### **6.1.2 Определение необходимого напряжения для возникновения частичных разрядов в пузырьке гелия**

Перед проведением экспериментальных исследований были определены напряжения возникновения ЧР в пузырьке гелия диаметром 1.5 мм в межэлектродном промежутке 6.8 мм. Гелий был выбран из-за наименьшей электрической прочности. Дело в том, что для использования пузырьков из других газов необходимо подавать напряжения более 30 кВ. Имеющийся силовой трансформатор и автотрансформатор для регулировки напряжения сильно перегревались и не могли выдать напряжение, при котором могут возникать ЧР в

пузырьках с другим газом. Кроме того, в цепи регистрации возникали помехи ввиду коронирования проводов при повышенном напряжении. При пониженном напряжении этих проблем не было.

Сначала определили напряжение, при котором в пузырьке возникнут условия для возникновения ЧР. Для расчета использовали закон Пашена [157]:

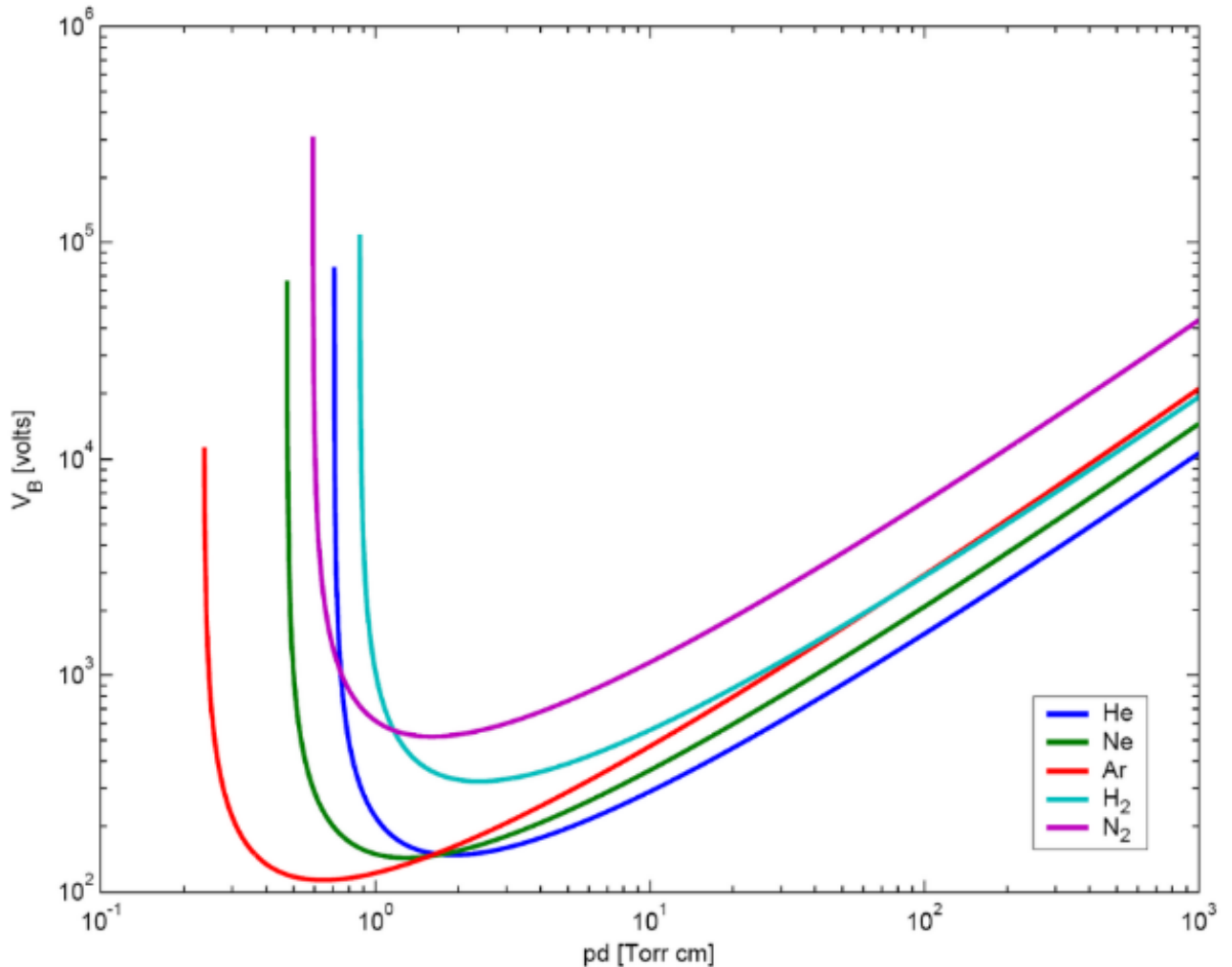


Рисунок 6.1 - Кривые Пашена для гелия, неона, аргона, водорода и азота

$$p \times h = 760 \text{ Торр} \times 0,15 \text{ см} = 114 \text{ Торр} \times \text{см}$$

По графику (Рисунок 6.1) находим напряжение пробоя пузырька:

$$U = 1,7 \text{ кВ}$$

Напряженность поля в пузырьке:

$$E_1 = \frac{U}{d} = \frac{1700 \text{ В}}{0,0015 \text{ м}} = 1,1 \times 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Напряженность поля в межэлектродном пространстве (при использовании формулы для поля в диэлектрическом шаре:

$$E_0 = \frac{E_1 \times (2 \times \varepsilon_2 + 1)}{3 \times \varepsilon_2} = \frac{1,1 \times 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}} \times (2 \times 2,3 + 1)}{3 \times 2,3} = 0,9 \times 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Напряжение на ячейке:

$$U_{\text{яч}} = E_0 \times d = 0,9 \times 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}} \times 0,0068 \text{ м} = 6 \text{ кВ}$$

Таким образом, было получено значение напряжения, при котором в установленных нами условиях, будет происходить ЧР в пузырьке гелия.

### 6.1.3. Регистрация частичных разрядов в пузырьках гелия

После всех подготовительных этапов производилась подача напряжения частотой 50 Гц на экспериментальную ячейку. Значение напряжения первоначально было установлено согласно расчету. Однако, анализ видеозаписи показал, что за 1 час исследования ЧР в пузырьках не развивались. За это время под действие электрического поля в среднем попадало от 26000 до 34000 пузырьков. Затем напряжение увеличивалось на 1 кВ и в интервале 1 часа проводилась видео регистрация. Первые ЧР (Рисунок 6.2) были зарегистрированы при напряжении  $U = 21 \text{ кВ}$  (амплитудном значении). На рисунке 6.2. видно, 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 в верх 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 величине приложенного напряжения.

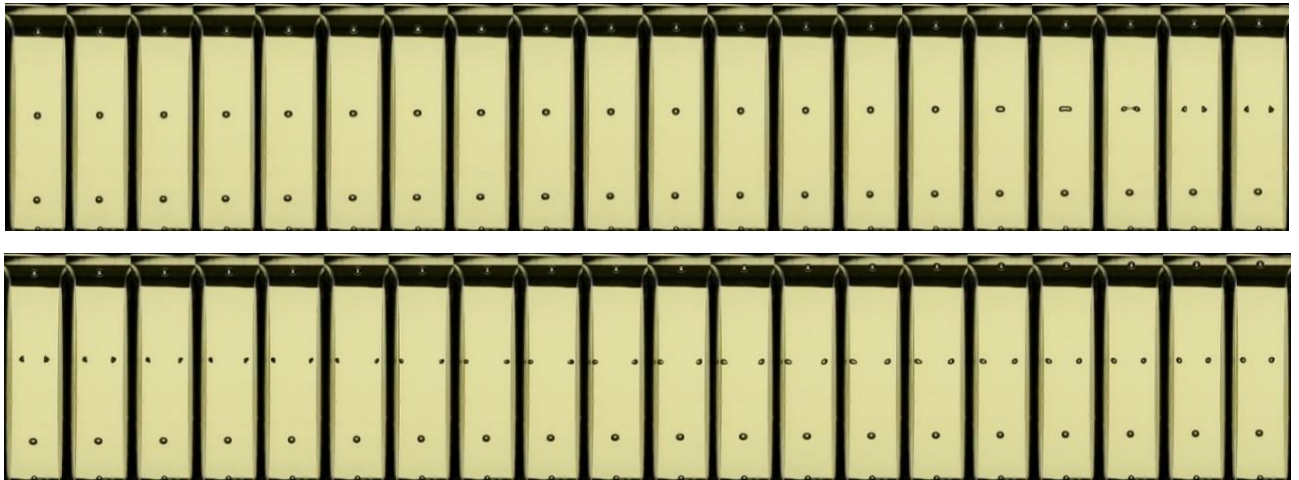


Рисунок 6.2 – ЧР в пузырьке геля

Одновременно с оптической производилась также и электрическая регистрация сигнала ЧР. Схема электрической регистрации представлена на рисунке 3.3 и подробно описана в главе 3.1.1. Осциллограмма данного ЧР представлена на рисунке 6.3, запуск производился с ФЭУ-97, так как на нем наводилось меньше помех (соотношение сигнал/шум более 10).

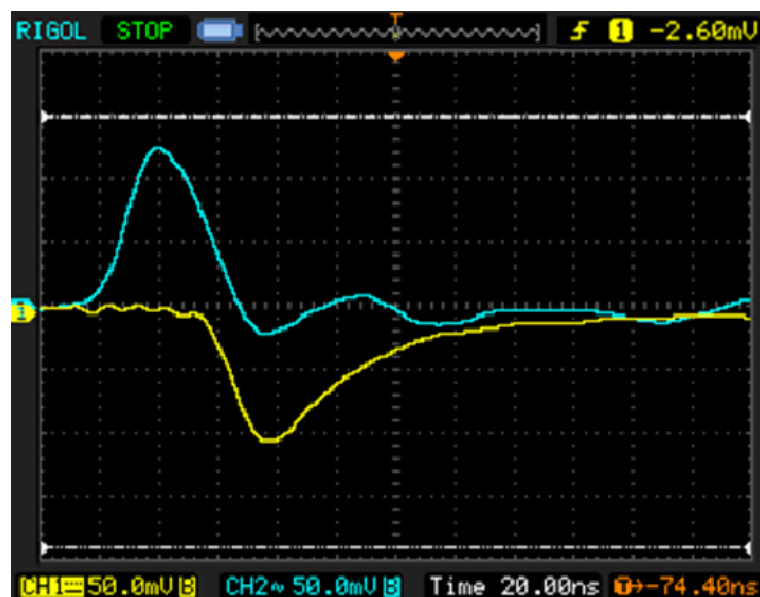


Рисунок 6.3 – Электрические сигналы ЧР в пузырьке геля  
желтый – сигнал с ФЭУ; синий – со схемы регистрации



По электрическому сигналу со схемы регистрации мы можем определить длительность импульса, а также ток. В данном случае ток  $I$  равен:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{136 * 10^{-3} \text{В}}{41,667 \text{ОМ}} = 3,26 \text{ мА}$$

Длительность импульса  $t$  равна  $50 \text{ нС}$

Кажущийся заряд  $q$  равен:

$$q = \frac{I * t}{2} = \frac{3.26 * 10^{-3} \text{А} * 50 * 10^{-9} \text{с}}{2} = 81.5 \text{ пСл}$$

В среднем, для этих условий, значение кажущегося заряда варьировалось от 70 до 110 пСл. Этот диапазон хорошо коррелируется с полученным в результате математического моделирования процесса [158].

Также было исследовано фазовое распределение ЧР в свободно плавающих пузырьках гелия. Типичная картина электрического сигнала и фазового распределения представлена на рисунках 6.4 и 6.5.

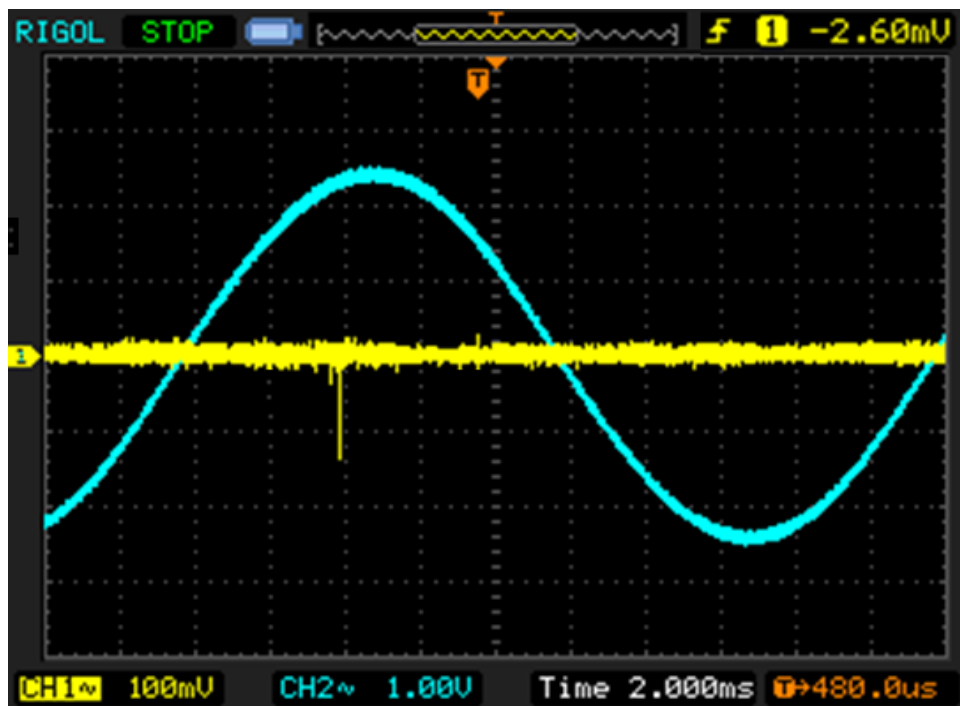


Рисунок 6.4 – Световой сигнал ЧР (желтая линия) в пузырьке гелия с одновременной регистрацией полюса напряжения (синяя линия)

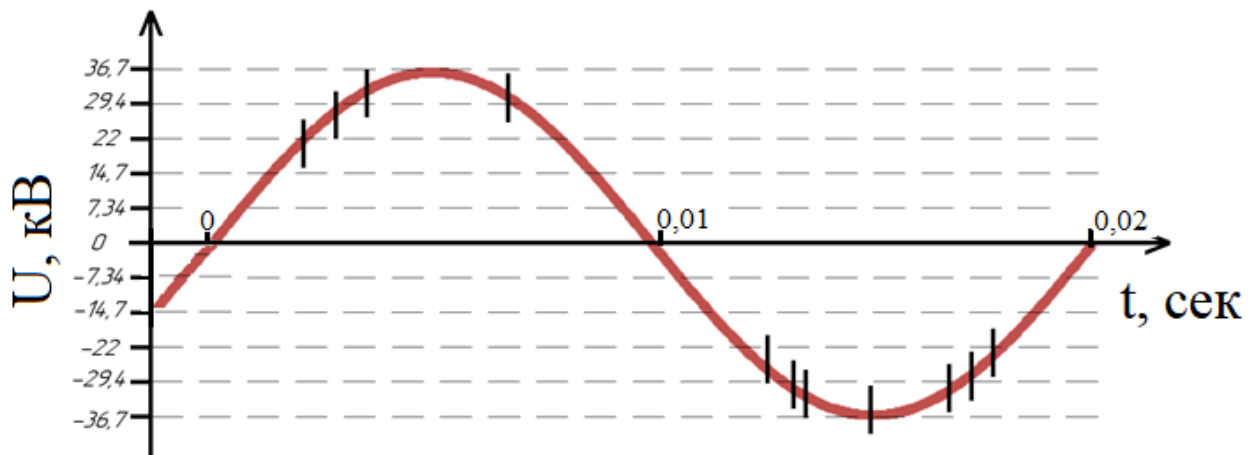


Рисунок 6.5 – Типичная картина фазового распределения ЧР (черные штрихи)

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 пузырей гелия равна примерно 0,003%.

#### 6.1.4 Обсуждение полученных результатов

Стоит обсудить два ключевых момента. Первый – несоответствие напряжения возникновения ЧР в свободно плавающих пузырьках закону Пашена [157]. В экспериментах мы видели превышение экспериментальных значений над расчетными более, чем в 3 раза. Второй – низкая вероятность развития ЧР. В экспериментах она составляла 0,003%. Можно предположить, что не все ЧР в пузырьках вызывают их разрыв, а при низких напряженностях электрического поля количество осевших на стенках зарядов после развития ЧР может быть недостаточным для увеличения деформации. При этом электрический сигнал таких ЧР может быть ниже уровня помех в нашей системе регистрации. Таким образом мы регистрируем только более «мощные» ЧР.

Для изучения данных вопросов было решено провести серию исследований ЧР в хорошо изученной системе – газовое включение с твердой оболочкой [158]. По

нашему заказу была изготовлена стеклянная капля (Рисунок 6.6) из молибденового стекла с воздушной полостью внутри.

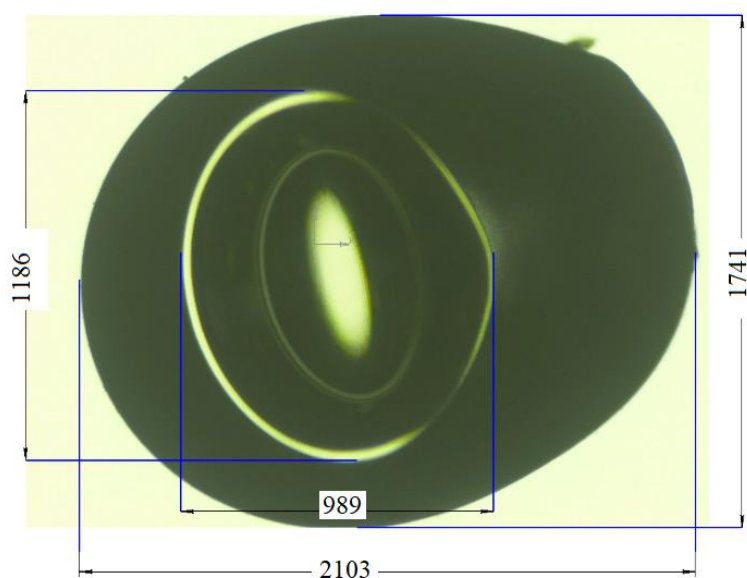


Рисунок 6.6 – Размеры стеклянной сферы

Стеклянная сфера приклеивалась на квадратный брусок из оргстекла сечением  $0,25 \text{ мм}^2$ . Искажением поля из-за разницы диэлектрических проницаемостей оргстекла и мала пренебрегли. Диэлектрическая проницаемость оргстекла  $\approx 3.5$ , что ненамного превышает диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла  $\approx 2.3$ . Располагалась стеклянная капля так, чтобы длинная сторона воздушного включения ( $l \approx 1,1 \text{ мм}$ ) была направлена вдоль электрического поля. Зная размеры воздушного включения и используя ранее описанную методику расчета, было определено напряжение возникновения ЧР в микросфере  $U = 27 \text{ кВ}$ .

При подаче напряжения заданного значения, после небольшой задержки (порядка нескольких минут) был зарегистрирован ЧР (Рисунок 6.7). Мы видим, что уровень светового сигнала (по которому запускается осциллограф) составляет порядка  $7 \text{ мВ}$ . При этом самые «слабые» ЧР в свободно плавающих пузырьках имели уровень  $\approx 100 \text{ мВ}$ . Также было выявлено, что после прохождения первого ЧР в стеклянной сфере они развиваются каждый раз, смене полюса напряжения (Рисунок 6.8). Связано это с тем, что для ЧР в воздушных полостях твердых

диэлектриков механизм заключается в генерации инициирующих электронов за счет распада отрицательных ионов. Ионы могут генерироваться внутри полости под действием предыдущего ЧР. Эти ионы могли дрейфовать в полости и оседать на поверхности внутренних стенок. Можно предположить, что на поверхности полости в диэлектрике также находится некоторое количество ионов кислорода. Эти ионы также могут инициировать электроны.

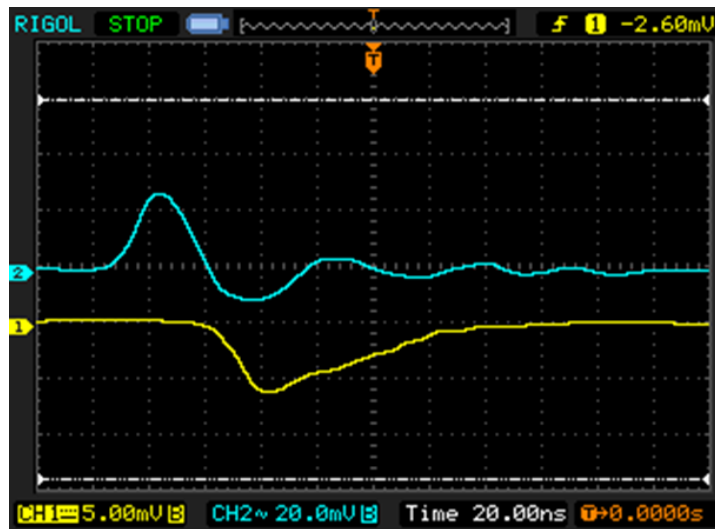


Рисунок 6.7 – Осциллограммы ЧР в стеклянной сфере  
Желтый – сигнал с ФЭУ; синий – сигнал со схемы

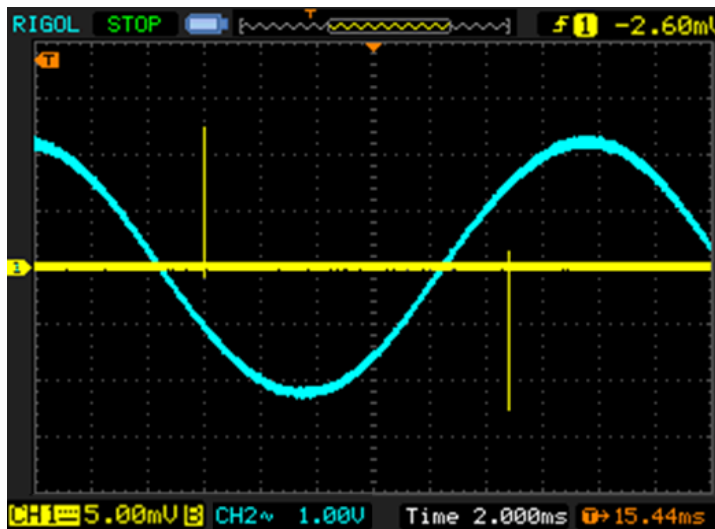


Рисунок 6.8 – Световой сигнал ЧР (желтая линия) в стеклянной микросфере с  
одновременной регистрацией полюса напряжения (синяя линия)

Таким образом, мы сделали вывод о том, что редкость ЧР в свободных пузырьках связана с дефицитом иницирующих электронов [16] в свободно плавающем пузырьке. Обычно эти электроны появляются из-за космического излучения и гамма-фона из недр Земли. Можно предположить, что в наших условиях (подвал, экранированное металлическое помещение) превышение значений напряжения возникновения ЧР связано именно с этим. Так же на это косвенно указывает тот факт, что при дальнейшем повышении напряжения частота возникновения ЧР в пузырьках увеличивается. Обусловлено это тем, что с увеличением напряжения увеличивается длительность времени, при которой напряжение на пузырьке превышает необходимое для ЧР значение, т.е. растет время, за которое в пузырьке может быть иницирован разряд. Кроме того, с ростом напряженности растет и вероятность появления иницирующего электрона за счет развала отрицательных ионов.

## **6.2 Исследование влияния дефицита иницирующих электронов на напряжение возникновения частичных разрядов в свободно плавающих пузырьках гелия в трансформаторном масле**

Выше были отмечены большие расхождения между ожидаемыми и фактическими напряжениями возникновения ЧР [159, 160]. Разряды загорались в пузырьках при напряженности электрического поля более, чем в три раза превышающие расчётные значения по закону Пашена, а времена задержки ЧР даже при этих перенапряжениях достигали нескольких часов. Объяснение установленного факта базировалось на запаздывании ЧР из-за отсутствия начальных электронов. Известно, что закон Пашена формулирует условие самостоятельности разрядов в газах, а электрический пробой наступает при наличии начального электрона, от которого по механизму ударной ионизации и образуется первая лавина электронов. Таким образом, закон Пашена формулирует необходимые условия, а присутствие начального электрона является достаточным условием пробоя газового промежутка. Появление начальных электронов в

полости возможно в результате эмиссии из диэлектрика, окружающего полость. Однако при напряженностях электрического поля, устанавливаемых в наших экспериментах, эмиссия свободных электронов ничтожно мала, и ею можно пренебречь. Преобладает генерация начальных электронов при ионизации нейтральных частиц газа радиационным фоном земли. От воздействия ионизирующего излучения в  $1 \text{ см}^3$  атмосферного воздуха каждую секунду происходит 4–10 актов ионизации, а равновесная концентрация ионов обоих знаков поддерживается на уровне 700–800  $\text{см}^3$ . Принимая во внимание малые размеры газовых пузырьков в жидкости и полостей твердой изоляции, времена запаздывания ЧР следует ожидать большими, что надо учитывать в методиках испытаний по контролю разрядной активности. В [4] приведены численные оценки времени запаздывания ЧР. При изменении диаметра полости от 1 до 0,1 мм расчетное время запаздывания ЧР увеличивается с 11 минут до 178 часов. Задержка возникновения ЧР в полостях или газовых пузырьках увеличивается дополнительно при поглощении внешнего ионизирующего излучения материалами испытуемого объекта. Заметим, что в описываемые [159, 160] испытания проводились в полностью экранированной кабине, сваренной из листовой стали толщиной 2 мм, а само помещение испытательной лаборатории находилось в подвале здания на глубине около 2 м от уровня земли. Понятно, что фоновые излучения в испытательную ячейку практически не проникали, что и могло явиться причиной кажущегося отклонения напряжения возникновения ЧР в пузырьках больше значений, определяемых на основе закона Пашена. Для проверки выдвинутых нами гипотез было решено провести дополнительные исследования, направленные на создание избытка иницирующих электронов в экспериментальной ячейке.

В высоковольтный шкаф, описанный в главе 3.1.1, под углом  $45^\circ$  к экспериментальной ячейке (Рисунок 6.9, 1) был установлен портативный рентгеновский аппарат (Рисунок 6.9, 2) МИРА-2Д с потребляемой мощностью 300 Вт. Установка под углом  $45^\circ$  была вызвана необходимостью экранирования

высокоскоростной камеры, располагающейся за свинцовой стенкой (Рисунок 6.9, 3).

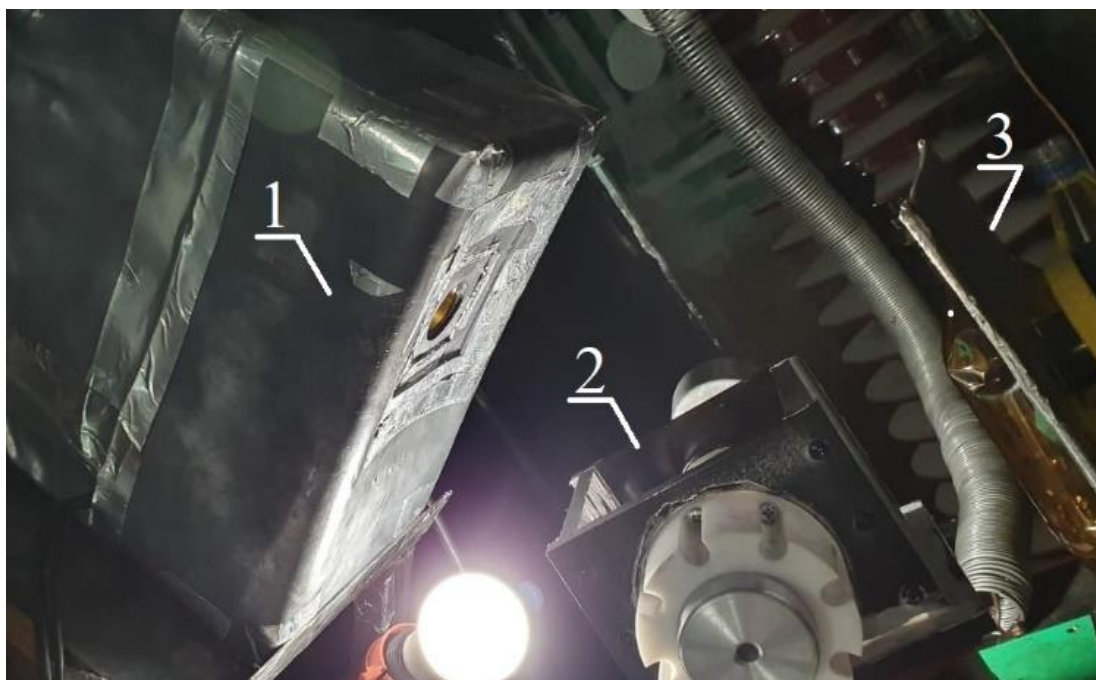


Рисунок 6.9 – Экспериментальная установка с рентген аппаратом

После проведения всех необходимых подготовительных мероприятий, описанных ранее, на экспериментальную ячейку подавалось напряжение и включался рентген аппарат. Напомним, что расчётное значение напряжения зажигания ЧР в пузырьке гелия в наших условиях равнялось 6 кВ. Результаты представлены на рисунке 6.10.

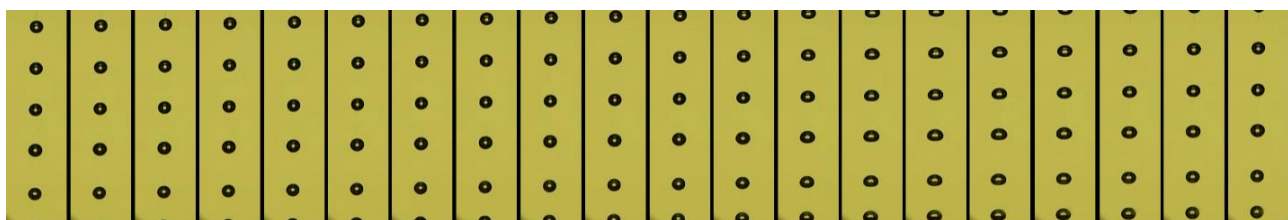


Рисунок 6.10 – ЧР в пузырьках гелия при воздействии рентгеновским излучением (амплитудное значение напряжения 6 кВ)

Анализируя видеозапись (Рисунок 6.11), по характеру поведения пузырька, а именно деформации во время развития ЧР в нем, мы увидели, что при включении

рентгеновского напряжения ЧР развились во всех пузырьках одновременно (Рисунок 6.11, 13 кадр), без времени ожидания. Далее пузырек продолжал увеличиваться в размере, достигая максимальной деформации (Рисунок 6.11, 15 кадр). Затем на протяжении 4 кадров происходило уменьшение его размера. И, наконец, в момент смены полюса напряжения (Рисунок 6.11, 19 кадр) пузырек вернулся в свое изначальное состояние. Более наглядную картину можно наблюдать при увеличении напряжения (Рисунок 6.11). Так, на напряжении 17 кВ ЧР (Рисунок 6.11, 12 кадр) привел к сильному удлинению (Рисунок 6.11, 15 кадр) и разрыву пузырька (Рисунок 6.11, 16 кадр) на два более маленьких, движущихся в сторону электродов (Рисунок 6.11, 17 – 20 кадры).

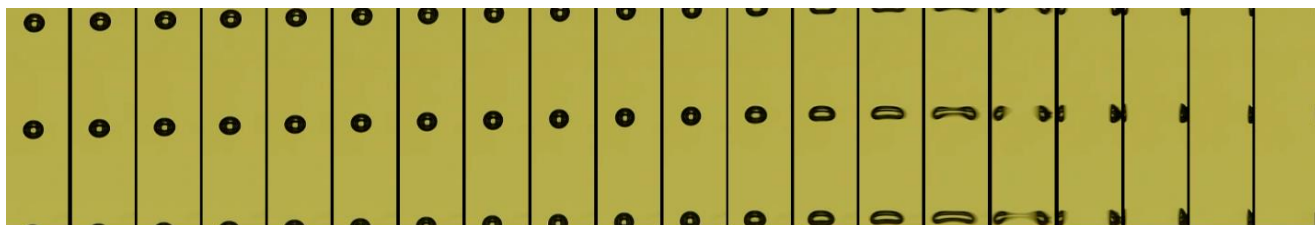


Рисунок 6.11 – ЧР в пузырьках гелия при воздействии рентгеновским излучением (амплитудное значение напряжения 17 кВ)

Также в ходе работы были приведены исследования, касающиеся исследования влияния интенсивности рентгеновского излучения на вероятность развития ЧР в пузырьках гелия. Для исключения влияния рассеянного излучения источник рентгеновского излучения, изображенный крупным планом на рисунке 6.12, был закрыт свинцовым кожухом (Рисунок 6.9, 1) с толщиной стенки 4 мм.





Рисунок 6.12 - Лицевая сторона рентген аппарата с защитным экраном крупным планом

В кожухе имелась диафрагма (Рисунок 6.12, 3) для рентгеновского излучения, которая закрывалась свинцовыми шторками разной толщины. Для исключения влияния преломленного рентгеновского излучения шторки устанавливались в специальные углубления в свинце (Рисунок 6.12, 2). После установки полученный шов перекрывался полоской свинца толщиной 2 мм. Тем самым количество преломлений потока фотонов увеличивалось до 3, что сильно снижало их энергию. Измерение экспозиционной дозы излучения на расстоянии 15 см от источника рентгена без экранирования излучателя показали значения 0.11 мР на 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха. Были выполнены эксперименты со свинцовыми шторками толщиной 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм и 6 мм. При толщине шторки 6 мм не наблюдалось ни одного ЧР, что говорило об эффективном экранировании рентген аппарата. При толщине шторки 5 мм зарегистрированы ЧР в небольшом количестве (несколько), не позволяющем провести уверенную статистическую обработку. Без шторок ЧР наблюдались во всех пузырьках, которые подверглись экспозиции рентгеновского излучения. При толщине шторок 2, 3 мм и 4 мм для каждого из перечисленных выше значений напряжения было выполнено по 15 серий измерений. Сделаны оценки по ослаблению излучения в свинце. Наименьшее ослабление наблюдается при энергии 80-88 кэВ. Для этих энергий интенсивность излучения уменьшается в

76 раз при толщине экрана 2 мм и в 5780 раза при толщине экрана 4 мм. Результаты исследований сведены в Таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Статистические данные по количеству пузырьков, подвернувшихся действию сильного электрического поля и по количеству ЧР в них.

U, кВ	2 мм		3 мм		4 мм	
	Общее кол. пузырьков	Кол. ЧР	Общее кол. пузырьков	Кол. ЧР	Общее кол. пузырьков	Кол. ЧР
12,5	3240	93	3132	61	3462	19
14,5	3412	194	3289	109	3398	37
16,6	3125	229	3339	128	3836	46
18,7	3846	345	3555	139	4187	64
20,7	4101	387	4115	162	4002	69

В процессе исследования было выявлено, что в некоторых случаях происходило несколько ЧР подряд (Рисунок 6.13). При этом после первого ЧР пузырек деформировался (Рисунок 6.13, 6 кадр), но не рвался. В момент, когда пузырек максимально деформирован и уже начинает возвращаться в свое начальное состояние, происходил повторный разряд (Рисунок 6.13, 13 кадр) и пузырек удлинялся еще сильнее. И так происходило до тех пор, пока не достигались критические значения деформации (максимальное количество повторных разрядов – 5) и пузырек не разрывался на 2 пузырька (Рисунок 6.13, 19 кадр).



Рисунок 6.13 – Повторные ЧР при амплитудном значении напряжения 11 кВ

Также стоит отметить тот факт, что помимо удлинения, крайне редко регистрировалось «сплющивание» (Рисунок 6.14, 12 кадр) пузырька после ЧР (Рисунок 6.14, 3 кадр).



Рисунок 6.14 – Схлопывание пузырька гелия после ЧР при амплитудном значении напряжения 10 кВ

В ходе проведения исследования были 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 6.15, 2 кадр) кулоновскими электрическими силами пузырь разрывался на два заряженных пузырька. Они двигались к противоположному по заряду электроду (Рисунок 6.15, 6 кадр). Затем в момент смены полюса напряжения между одним из пузырьков и электродом происходил разряд (Рисунок 6.15, 10 кадр), который приводил к пробую масляного промежутка (Рисунок 6.15, 11 кадр).



Рисунок 6.15 - 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 6.16, 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 6.16, 2 кадр). В дальнейшем по этим структурам происходил пробой масляного промежутка (Рисунок 6.16, 3 кадр).



Рисунок 6.16 - 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 6.17 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 6.17, 1 кадр), который вызывал еще большую деформацию. После очередного ЧР (Рисунок 6.17, 7 кадр) с границ деформированного пузырька наблюдалось развитие нитевидных структур (Рисунок 6.17, 8 кадр), по которым происходил пробой масляного промежутка (Рисунок 6.17, 9 кадр).

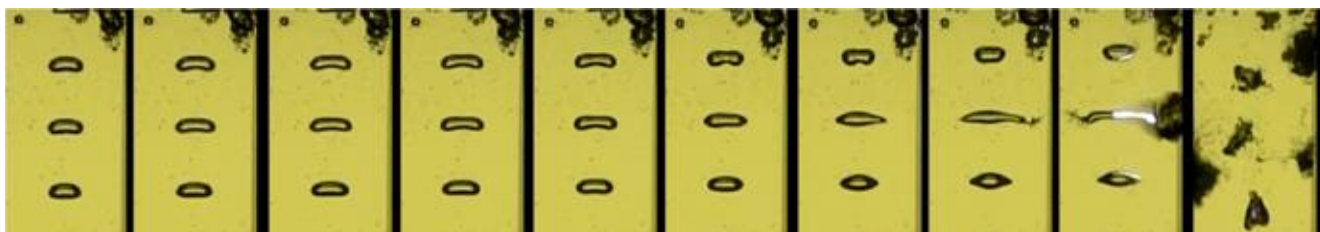


Рисунок 6.17 - Развитие стримеров с границ пузырька при  $E_{амп} \approx 1.4$  кВ/мм

## Выводы по главе 6

- Оптически зарегистрированы ЧР, развивающиеся в свободно плавающих воздушных пузырьках;
- зарегистрированы и проанализированы световые и электрические сигналы ЧР;
- выявлено несоответствие напряжения зажигания ЧР в пузырьке закону Пашена;
- выявлена причина несоответствия, которая выражена в отсутствии инициирующих электронов;
- получены экспериментальные результаты, показывающие влияние интенсивности рентгеновского излучения на вероятность развития ЧР в пузырьке гелия;
- оптически зарегистрированы 3 механизма зарождения стримеров в трансформаторном масле при аномально низких напряженностях электрического поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы по исследованию ЧР в газовых включениях в трансформаторном масле получены следующие основные результаты:

1 разработан и апробирован новый метод определения коэффициентов диффузии, основанный на сопоставлении экспериментальных кривых и 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 коэффициенты газообразования в системе острие-плоскость для рапсового масла и уточнены для трансформаторного;

3 экспериментально исследована зависимость электрической прочности трансформаторного масла при добавлении в него Нанотрубок Tuball. 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 постоянное значение  $\sigma$ ;

5 оптически зарегистрированы ЧР, развивающиеся в свободно плавающих пузырьках в трансформаторном масле под действием переменного напряжения. Выявлено несоответствие напряжения зажигания ЧР в пузырьке закону Пашена. Получены экспериментальные результаты, показывающие влияние интенсивности рентгеновского излучения на вероятность развития ЧР в пузырьке гелия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ состояния оборудования энергетического, бурового и тяжелого машиностроения в организациях ТЭК // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору URL: <http://www.gosnadzor.ru/activity/analiz/energy/sibir/> (дата обращения: 23.01.2021).

2 Аварийность // Министерство энергетики Российской Федерации URL: <https://minenergo.gov.ru/node/267> (дата обращения: 23.01.2021).

3 Национальный стандарт Российской Федерации "Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов" от 26.11.2012 № 55191-2012 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2014 г.

4 N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, R. Bartnikas Trends in partial discharge pattern classification: a survey // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Volume: 12. Issue: 2. Pages. 248-264.

5 L. Niemeyer A generalized approach to partial discharge modeling // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Volume: 2. Issue: 4. Pages. 510-528.

6 R. Bartnikas Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Volume: 9. Issue: 5. Pages. 763-808.

7 M. Duval A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. Volume: 18. Issue: 3. Pages. 8-17.

8 G. C. Stone Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Volume: 12. Issue: 5. Pages. 891-904.

9 Гарифуллин М. Ш. Контроль технического состояния маслонаполненного трансформаторного электрооборудования методами оптической спектроскопии. Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. Казань, 2014. 290 с.

10 Ризванова Г. И., Гафиятуллин Л. Г., Гарифуллин М. Ш., Козлов В. К., Туранов А. Н. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. Номер: 9. С. 91-94.

11 Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков, под ред. А. А. Суворова. Екатеринбург: Урал, 2015. 64 с.

12 Методические указания "По диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле" от 2001 № РД 153-34.0-46.302-00 // Российское акционерное общество энергетики и электрификации РАО «ЕЭС России», департамент научно-технической политики и развития. 2015 г.

13 ГОСТ "Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения" от 1987 № 23829-85 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2014 г.

14 ГОСТ "Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции" от 1999 № 1516.2-97 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2004 г.

15 E. Husain, R. S. Nema Analysis of Paschen Curves for air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> Using the Townsend Breakdown Equation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1982. Volume: 17. Issue: 4. Pages. 350-353.

16 R. Bartnecas A comment concerning the rise times of partial discharge pulses, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Volume: 12. Issue: 2. Pages. 196-202.

17 C. Y. Perkasa, N. Lelekakis, J. Wijaya, D. Martin Investigating bubble formation in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper insulation systems // 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). 2012.



- 18 Meng Gao, Yuqin Ding, Tonglei Wang, Tao Wen, Qiaogen Zhang Study on bubble evolution in oil-paper insulation during dynamic rating in power transformers // IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2016.
- 19 C. Y. Perkasa, J. Wijaya, N. Lelekakis, D. Martin Preliminary study of bubble formation in vegetable oil filled power transformer // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2013.
- 20 Caesar Y. Perkasa, Nick Lelekakis, Tadeusz Czaszejko, Jaury Wijaya, Daniel Martin A comparison of the formation of bubbles and water droplets in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Volume: 21. Issue: 5. Pages. 2111-2118.
- 21 T. V. Oommen, S. R. Lindgren Bubble evolution from transformer overload // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives. 2001.
- 22 M. N. Narayanachar, V. Prabhashanker Partial discharges in transformer oil // Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena — Annual Report. 1987.
- 23 N. J. Felici Bubbles Partial discharges and liquid breakdown // Institute of Physics Conference Series. 1979. Volume: 79. Issue: 48. Pages. 181-190.
- 24 M. Kh. Gadzhiev, A. S. Tyuftyaev, N. A. Demirov, P. L. Akimov Damping properties of a two-phase mixture of transformer oil with gas bubbles // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Volume: 1556.
- 25 Yongze Zhang, Xiantao Tao, Cheng Pan, Ju Tang Role of air bubbles in the breakdown of flowing transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Volume: 27. Issue: 5. Pages. 1752-1760.
- 26 M. Cevallos, M. Butcher, J. Dickens, A. Neuber, H. Krompholz Bubble Dynamics and Channel Formation for Cathode Initiated Discharges in Transformer Oil // IEEE Pulsed Power Conference. 2005.
- 27 Zhitao Chao, Boxue Du, Yu Gao, Yong Liu, Wenjia Hu Effect of suspending bubbles on tracking failure of oil-impregnated pressboard // IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). 2013.

28 Yongze Zhang, Ju Tang, Cheng Pan, Shouxiao Ma, Qiang Yao, Yulong Miao, Yi Luo Comparison of PD Characteristics Induced by Metal Particles and Bubbles in Flowing Transformer Oil // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2018.

29 Xi Chen, Maoqiang Bi, Tianyan Jiang, You Wang An equivalent circuit model for partial discharge occurring in transformer oil bubbles // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016.

30 Zhong Zheng, Lihua Chen, Junwei Diao, Rongliang Wang Evolution of bubble in oil-paper insulation and its influence on partial discharge // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2014.

31 ГОСТ "Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции (с Изменениями N 1-6)" от 1976 № 20690-75 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 1995 г.

32 Q. Liu, Z. D. Wang Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Volume: 18. Issue: 1. Pages. 285-294.

33 A. Béréal, R. Tobazéon Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1986. Volume: 21. Issue: 4. Pages. 613-627.

34 O. Lesaint, R. Tobazéon Streamer generation and propagation in transformer oil under AC divergent field conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1988. Volume: 23. Issue: 6. Pages. 941-954.

35 John C. Devins, Stefan J. Rzed, Robert J. Schwabe Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids // Journal of Applied Physics. 1981. Volume: 52. Issue: 7. Pages. 4531-4545.

36 O. Lesaint, T. V. Top Streamer initiation in mineral oil. Part I: Electrode surface effect under impulse voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Volume: 9. Issue: 1. Pages. 84-91.

- 37 Potao Sun, Wenxia Sima, Dingfei Zhang, Qiulin Chen, Lian Ye, Jiaqi Chen Effects of impulse waveform parameters on the breakdown characteristics of nano-TiO<sub>2</sub> modified transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Volume: 25. Issue: 5. Pages. 1651 - 1659.
- 38 Gaurav Shukla, Hemantkumar Aiyer Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Volume: 22. Issue: 4. Pages. 2185 - 2190.
- 39 M. A. Abid, I. Khan, Z. Ullah, Kaleem Ullah, A. Haider, S. M. Ali Dielectric and Thermal Performance Up-Gradation of Transformer Oil Using Valuable Nano-Particles // IEEE Access. 2019. Volume: 7. Pages. 153509 - 153518.
- 40 Kumari Swati, R. Sarathi, K. Sahitya Yadav, Nathaniel Taylor, Hans Edin Corona discharge activity in nanoparticle dispersed transformer oil under composite voltages // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Volume: 25. Issue: 5. Pages. 1731 - 1738.
- 41 Potao Sun, Wenxia Sima, Xiongwei Jiang, Dingfei Zhang, Jiahui He, Qiulin Chen Failure of nano-modified oil impregnated paper under repeated impulse voltage: Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on space charge characteristics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Volume: 25. Issue: 8. Pages. 2103 - 2111.
- 42 Purbarun Dhar, Ajay Katiyar, Lakshmi Sirisha Maganti, Arvind Pattamatta, Sarit K Das Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Volume: 23. Issue: 2. Pages. 943 - 956.
- 43 U. S. Choi, J. A. Eastman Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 1995. Volume: 66. Pages. 99–105.
- 44 Danial Amin, Rashmi Walvekar, Mohammad Khalid, Mahesh Vaka, Nabisab Mujawar Mubarak, T. C. S. M. Gupta Recent Progress and Challenges in Transformer Oil Nanofluid Development: A Review on Thermal and Electrical Properties // IEEE Access. 2019. Volume: 7. Pages. 151422 - 151438.

- 45 Wei Yu, Huaqing Xie A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications // *Journal of Nanomaterials*. 2012.
- 46 J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thompson Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // *Applied Physics Letters*. 2001. Volume: 78. Issue: 6. Pages. 718–720.
- 47 Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi A review on development of nanofluid preparation and characterization // *Powder Technology*. 2009. Volume: 196. Issue: 2. Pages. 89-101.
- 48 P. Kopčanský, L. Tomčo, K. Marton, M. Koneracká, M. Timko, I. Potočová The DC dielectric breakdown strength of magnetic fluids based on transformer oil // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005. Volume: 289. Pages. 415-418.
- 49 Yuxiang Zhong, Yuzhen Lv, Chengrong Li, Yuefan Du, Mutian Chen, Shengnan Zhang, You Zhou, Long Chen Insulating Properties and Charge Characteristics of Natural Ester Fluid Modified by TiO<sub>2</sub> Semiconductive Nanoparticles // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Volume: 20. Issue: 1. Pages. 135-140.
- 50 C. Choi, H. S. Yoo, J. M. Oh Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants // *Current Applied Physics*. 2008. Volume: 8. Issue: 6. Pages. 710-712.
- 51 C. P. Y. Alicia, W. Rashmi, M. Khalid, A. K. Rasheed, T. Gupta Synthesis and thermo-physical characterization of graphene based transformer oil // *Journal of Engineering Science and Technology*. 2016. Volume: 11. Issue: 5. Pages. 140–152.
- 52 J. Taha-Tijerina, T. N. Narayanan, G. Gao, M. Rohde, D. A. Tsentalovich, M. Pasquali, P. M. Ajayan Electrically Insulating Thermal Nano-Oils Using 2D Fillers // *ACS Nano*. 2012. Volume: 6. Issue: 2. Pages. 1214–1220.
- 53 N. S. Suhaimi, M. T. Ishak, N. I. A. Katim, M. H. A. Hamid Investigation on breakdown strength of mineral oil based carbon nanotube // *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. 2016.

- 54 M. Chiesa, S. K. Das Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009. Volume: 335. Issue: 1-3. Pages. 88-97.
- 55 Y. F. Du, Y. Z. Lv, J. Q. Zhou, X. X. Li, C. R. Li Breakdown Properties of Transformer Oil-based TiO<sub>2</sub> Nanofluid // *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2010.
- 56 International Standard "Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test Method" от 1995 № 60156 // *International Electrotechnical Commission*. 2018.
- 57 А. Никурадзе "Жидкие диэлектрики" Изолирующие жидкости. Москва: ОНТИ НКТП, 1936. 236 с.
- 58 Arakelian V. G., Fofana I Water in oil-filled high-voltage equipment. Part I. States, solubility and equilibrium in insulating materials // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2007. Volume: 23. Issue: 4. Pages. 31-43.
- 59 Arakelian V. G., Fofana I Water in oil-filled high-voltage equipment. Part II. Water content as physico-chemical diagnosis tool of insulation condition // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2007. Volume: 23. Issue: 5. Pages. 15-243.
- 60 Бузаев В. В., Сапожников Ю. М. Связь между равновесием различных форм присутствующей в масле воды и состоянием изоляции высоковольтного маслонаполненного электрооборудования // *Вестник ВНИИЭ*. 2004. С. 248.
- 61 Fofana I., Borsi H., Gochenbach J. Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor condition // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2001. Volume: 8. Issue: 6. Pages. 1040-1047.
- 62 Lesaint O., Costeanu L. Positive streamer inception in cyclohexane: evidence of formative time and cavitation process // *Proceedings of IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. 2017. Pages. 1122.
- 63 Duy C.T., Lesaint O., Denat A., Bonifaci N. Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Volume: 16. Issue: 6. Pages. 1582–1594.

- 64 Peschot A., Bonifaci N., Lesaint O., Valadares C., Poulain C. Deviations from the Paschen's law at short gap distances from 100 nm to 10  $\mu\text{m}$  in air and nitrogen // Applied Physics Letters. 2014. Volume: 105. Pages. 123109-123109.
- 65 Y. Du, M. Zahn, B.C. Lesieutre, A.V. Mamishev, S.R. Lindgren Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1999. Volume: 15. Issue: 1. Pages. 11-20.
- 66 F. M. Clark Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation // Transactions of Electrical Engineering. 1942. Volume: 61. Pages. 742-749.
- 67 J. Fabre, A. Pichon Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers // International Conference on Large High Voltage Electric System. 1960.
- 68 H. P. Moser, V. Dahinden Special print of Scientia Electrica. Vermont USA: EHV-Weidmann Lim., 1979.
- 69 W A. Fessler, W J. McNutt, T. O. Rouse Bubble Formation in Transformers // EPRI Report EL-5384. 1987.
- 70 Hongzhi Ding, Richard Heywood, Paul Griffin, Lance Lewand An overview of water and relative saturation in power transformers // IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). 2017. Pages. 2153-3733.
- 71 Daniel Martin, Nick Lelekakis, Jaury Wijaya, Kerry Williams Water uptake rates of transformer paper insulation impregnated with vegetable oil // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2013. Volume: 5.
- 72 W. He, J.S. Chang, M.H.I. Baird Formation and dispersion of small water droplets in an insulating oil under a pulsed electric field // Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - CEIDP. 1996.
- 73 Зайковский В. В., Харламов С. Н., Муратов В. Н. Экспериментальное исследование движения капель воды в водонефтяной эмульсии при разделении в неоднородном электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Том: 327. Номер: 10. С. 22-34.

74 F. W. Heinrichs Bubble Formation in Power Transformer Windings at Overload Temperatures // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1979. Volume: 8. Issue: 5. Pages. 1576 - 1582.

75 Dominique Legendre, Roberto Zenit and J. Rodrigo Velez-Cordero On the deformation of gas bubbles in liquids // Physics of Fluids. 2012. Volume: 24. Issue: 4.

76 РД "Объем и нормы испытаний электрооборудования" от 1997 № 34.45-51.300-97 // Российское акционерное общество энергетики и электрификации "ЕЭС РОССИИ". 2004 г.

77 A. Beroual Parameters influencing the behavior of water droplets immersed in dielectric liquids submitted to electric stress // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2013.

78 C. G. Garton, Z. Krasucki Bubbles in insulating liquids: stability in an electric field, Proc. Roy. Soc. Ser. A 280. London. 1964. Pages. 211-226.

79 Taylor G. I. Disintegration of water drops in an electric field, Proc. R. Soc. London. A 280. 1964. Pages. 383–397.

80 J. S. Mirza, C. W. Smith, J. H. Calderwood the elongation of small bubbles in electrically stressed dielectric liquids and the breakdown criterion // IEE Conf. Diel. Mats. Meas. and Appl. 1970. Pages. 229-236.

81 Brazier-Smith P. R. Stability and shape of insolated and pairs of water drops in an electric field // The physics of Fluids. 1971. Volume: 14. Issue: 1.

82 K. J. Cheng, J. B. Chaddock Deformation and stability of drops and bubbles in an electric field // Physics Letters. 1984. Pages. 51-56.

83 Sherwood J. D. Breakup of fluid droplets in electric and magnetic fields // Journal of Fluid Mechanics. 1988. Volume: 88. Pages. 133–146.

84 X. Zou., N. Gumagul, T. Uesaka, J. Bouchard Accelerated aging of papers of pure cellulose: mechanism of cellulose degradation and paper embitterment // Polymer Degradation and Stability. 1994. Volume: 43. Issue: 3. Pages. 393-402.

85 Гроссман О. И., Ойдрам Р. М. Новая методика определения газостойкости изоляционных масел // Труды Таллиннского политехнического института. 1971. №305. С. 67-74.

86 Бобровская Л. Д. Разрушение электрической изоляции при длительном воздействии напряжения // Электрофизические проблемы твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений. 1974. С. 22-39.

87 L. Gherardi, B. Vecellio. Investigation of the passing properties of dielectric liquids // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1985. Volume: 20. Issue: 2. Pages. 431-435.

88 Hirabayshi S. Gas generation by corona discharge in insulating oil // Nissin Electric Review. 1971. Volume: 45. Issue: 8. Pages. 1015-1023.

89 Герцик А. К. Ионизационные характеристики бумажно-масляной конденсаторной изоляции при искаженной форме воздействующего напряжения // Известия научно-исследовательского института постоянного тока. 1958. Volume: 3. Pages. 62-88.

90 Tomago A. Development of oil-impregnated all-polypropylene - film power capacitor // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1977. Volume: 12. Issue: 4. Pages. 293 – 301.

91 Nishimatsu M., Mukai S., Yamaguchi O. Chemical structures and electrical properties of insulating oils // Nissin Electric Review. 1979. Volume: 24. Issue: 4. Pages. 104-114.

92 Дарьян Л. А., Аракелян В. Г. Стойкость изоляционных жидкостей к газообразованию // Электротехника. 1997. №2. С. 45-49.

93 Kuwahara H. Partial discharge characteristics of silicone liquids // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1976. Volume: 11. Issue: 3. Pages. 86-91.

94 Matches K. N. Influence of electrical discharge in oil and combinations of oil and paper // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1976. Volume: 11. Issue: 4. Pages. 164 – 180.

95 Пинталь В. С., Шахгеданова С. М., Шахиович М. И. Влияние химического состава масла на интенсивность начальных ЧР // Электротехнические материалы. 1976. Volume: 67. Issue: 2. Pages. 1-3.



- 96 Masunaga H. Interaction between diarylalkane and polypropylene films in capacitors // International Electrotechnical Commission. 1977. Pages. 59.
- 97 Г. С. Кучинский Частичные разряды в высоковольтных конструкциях // Энергия. 1979. С. 224.
- 98 Viale F., Poittevin J., Pallou B. Study of a correlation between energy of partial discharges and degradation of paper-oil insulation // CIGRE. 1982.
- 99 Ойдрам Р. А. Определение коэффициента газовыделения изоляционных масел // Энергетика. 1963. С. 53-58.
- 100 Лысаковский Г. Г. Электрофизические проблемы долговечности и надежности высоковольтной изоляции и изоляционных конструкций // Электричество. 1978. №9. С. 28-33.
- 101 Brambilla C., Farlivi F., Nenga P., Mirra C. An instrument for measuring energy related to partial discharges in insulation systems // Alta Frequenra. 1974. Volume: 5. Pages. 243.
- 102 Garcia G., Fallou B. Equipment for the energy measurement of partial discharges // Proc. 1-st. Int. Conf. Conduct. and Breakdown Solid Dielec. 1983.
- 103 Kale F., Mopel J. P. On the relation between the partial discharge's energy and the cooled gases in transformer oil // Proceedings CIGRE SC 15 Colloquim "Insulating testing to assure reliable service". 1979.
- 104 А. Г. Овсянников Разработка методов диагностики изоляции высоковольтного энергетического оборудования под рабочим напряжением на основе регистрации частичных разрядов: дис. д-р. технических наук: 05.14.12. Новосибирск, 2001. 431 с.
- 105 Михеев Ген. М., Михеев Георг. М., Фадеев Е.Г., Попов А.Ю. Лазерная диагностика ультразвуковой дегазации диэлектрической жидкости / ЖТФ. 2002. Том 72. Выпуск 10. С. 73 – 78.
- 106 А. Л. Бычков, Ю.Г Соловейчик, С. М. Коробейников, А. В. Мелехов, А. Ю. Коробенкова, Д. В. Вагин Растворение пузырьков диагностических газов в трансформаторном масле // Теплофизика высоких температур. 2011. Том 49. Выпуск 5. С. 771-776.

107 A. Ridel, A. Bychkov Optical recording of bubble dissolution of diagnostic gases in electrical insulating liquids // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Volume: 792. Pages. 602-605.

108 Sergey M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. V. Vagin Determining the gas diffusion coefficients in dielectric liquids by the bubble dissolution detecting method // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2021. Volume: 9. Issue: 2. Pages. 31-42.

109 S. M. Korobeynikov, M. A. Anikeeva Study of the Solubility of Gases in Rapeseed Oil as an Insulating Material // *High Temperature*. 2016. Volume: 54. Pages. 113-117.

110 Дарьян Л.А. Научные основы физико-химической диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа. Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. Новосибирск, 2009. 437 с.

111 S. M. Korobeynikov, N. N. Chuprina, M. Anikeeva Check and justification of the method of diffusion coefficients determination in liquids by optical recording of gas bubble dissolution // *13 International forum on strategic technology*. 2018. Pages. 850-852.

112 Cussler E. L., *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems* // New York: Cambridge University Press. 2009. Pages: 127.

113 G. W. Kaye *Tables of physical and chemical constants and some mathematical functions*. Longman. 1973.

114 Dr. Adolf Fick Ueber Diffusion. Prosecutor in Zurich. 1855

115 Карцев А.А., Могилевский Г.А., Суббота М.И., Табасаранский З.А. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений // Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. 1954. Москва. 429 стр.

116 Jianfeng He, Jian Li, Jinghan Zhou Dissolved Gas Diffusion Coefficients and Properties in Camellia Insulating Oil // *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2018.

117 Zhengyong Huang, Jianfeng He, Chenmeng Xiang, Jian Li, Feipeng Wang, Jinghan Zhou, and Tianyan Jiang Gas diffusion behavior in green camellia insulating oils // AIP Advances. 2018. Volume: 8. Pages. 115-127.

118 Tetsuya Morishita Fluctuation formulas in molecular-dynamics simulations with the weak coupling heat bath // The Journal of Chemical Physics. 2000 Volume: 113.

119 Dar'yan, L.A. and Arakelyan, V.G. Insulating Liquids Resistance against Gas-Formation // Elektrotehnika. 1997. Volume: 2. Pages. 45-49.

120 Бычков А.Л. Исследование газообразования при частичных разрядах и совершенствование пробоотбора для газового анализа высоковольтного маслонеполненного электрооборудования. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – 155 с.

121 M. A. Anikeeva and S. M. Korobeynikov Study of stability against oxidation of rapeseed oil // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. Volume: 25. Pages. 236-238.

122 S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. Karpov, Y. Prokopenko, A. L. Bychkov Intensification of electrohydrodynamic flows using carbon nano-tubes // Journal of Physics: Conference Series. 2020..

123 R. Kattan, A. Denat, and O. Lesaint Generation, growth, and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electric field // Journal of Applied Physics. 1989. Volume: 66.

124 S. M. Korobeynikov, A. L. Bychkov, E. V. Chimitova, V. A. Demin Statistical Analysis of Partial Discharge Characteristics in Transformer Oil at the “Point-Plane” Electrode at Alternating Voltage = Статистический анализ характеристик частичных разрядов в трансформаторном масле у острейного электрода на переменном напряжении // Problems of the Regional Energetics = Problemele energeticii regionale = Проблемы региональной энергетики. 2017. Volume: 2. Issue: 34. Pages. 36-34.

125 A. Bychkov, S. Korobeynikov, A. Ovsyannikov Partial discharges registration in transformer oil at the ‘point-plane’ electrode system // Applied Mechanics and Materials. 2014. Volume: 698.

126 Осадченко В.Х., Волкова Я.Ю., Кандрина Ю.А. Фильтры высоких и низких частот // Электротехника. 2019. С. 12-13.

127 С. М. Коробейников, А. В. Ридель Сравнение коэффициентов газообразования при частичных разрядах в системе «острие–плоскость» в рапсовом и трансформаторном маслах / // Прикладная физика = Applied Physics. 2018. Volume: 6. Pages. 25-28.

128 Rongsheng Liu, Leif A. A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2011.

129 Ahmed M. Samya, Mohamed E. Ibrahim, Amr M. Abd-Elhadyb, Mohamed A. Izzularab On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Volume: 117.

130 Daigo Komesu, Satoshi Ichimura, Hiroshi Morita Effects of Nanoparticle Concentration and Surfactant on Dielectric Strength of Nanofluids // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2019

131 Единственный аддитив, способный изменить все материалы, которые окружают вас прямо сейчас // Graphene Nanotubes For Global Industries URL: <https://ocsial.com/ru/nanotubes/> (дата обращения: 09.02.2021).

132 Аппарат для определения пробивного напряжения трансформаторного масла АИМ-90 // Компания СТЭНА URL: <https://www.astena.ru/aim-90.html> (дата обращения: 09.02.2021).

133 Ультразвуковые генераторы с выходным каскадом на полевых транзисторах // Ультразвуковая техника - ИНЛАБ URL: <http://utinlab.ru/articles/ultrazvukovye-generatory-ultrazvukovye-preobrazovateli-volnovody> (дата обращения: 09.02.2021).

134 Arash Jenab, Daniel E. Green, Ahmet T. Alpas, Sergey F. Golovashchenko Experimental and numerical analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Volume: 255. Issue: 4. Pages. 914-926.

135 Барбашова Г. А., Шомко В. В. Влияние цикличности ввода электрической энергии в канал подводного искрового разряда // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. Volume: 43. Issue: 2. Pages. 43-49.

136 Y. Tsujikawa, M. Onoda, H. Nakayama, K. Amakawa Partial Discharge in a Void Filled with Sulfur Hexafluoride and Formation of Sulfide // *The Japan Society of Applied Physics*. 1988. Volume: 27. Issue: 3. Pages. 451-453.

137 M.Kh. Gadzhiev, S. Tyuftyaev, M.V. Il'ichev Single bubble of an electronegative gas in transformer oil in the presence of an electric field // *Technical Physics*. 2017. Volume: 62. Pages. 1500-1504.

138 S. M. Korobeynikov The Role of Bubbles in the Electric Breakdown of Liquids: Prebreakdown processes // *High Temperature*. 1998. Volume: 36. Issue: 3. Pages. 362-367.

139 M. Talaat, A. El-Zein Analysis of air bubble deformation subjected to uni-form electricfield in liquid dielectric // *International Journal of Applied Electromanetics*. 2012. Volume: 2. Issue: 1. Pages. 362-367.

140 J.H. Mason The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // *Proceedings of the IEE - Part I: General*. 1951. Volume: 98. Issue: 109. Pages. 44 – 59.

141 Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Ушаков В. Я., Клишкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В., под ред. Ушакова В. Я. Томск: НТЛ, 2005. 488 с.

142 Van Brunt, R.J. Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona: Recent Advances and Future Challenges // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994. Volume: 1. Issue: 5. Pages. 761-784.

143 Pedersen A., Crichton G. C., McAllister I.W. The Functional Relation between Partial Discharges and Induced Charge // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995. Volume: 2. Issue: 4. Pages. 535-543.

144 S. M. Korobeynikov, A. L. Bychkov, A. V. Ridel, M. A. Anikeeva Gassing in transformer oil at low and high frequency vibration // *11 International forum on strategic technology (IFOST 2016)*. 2016. Volume: 2. Pages. 405-407.

145 Коробейников С. М., Тесленко В. С., Дрожжин А. П. Иницирование пробоя в жидкости с помощью кавитационных пузырьков // Научный вестник Новосибирского Государственного Технического Университета. 2003. №2. С. 93-100.

146 Morshuis P.H.F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: Some thoughts on progress made and where to go now // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Volume: 12. Issue: 5. Pages. 905-913.

147 Denat, A., Gosse, J. P., Gosse, B. Electrical Conduction of Purified Cyclohexane in a Divergent Electric Field // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1988. Volume: 23. Issue: 4. Pages. 545-554.

148 FitzPatrick, G. J., McKenny, P.J., Forster, E. O. The Effect of Pressure on Streamer Inception and Propagation in Liquid Hydrocarbons // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1990. Volume: 25. Issue: 4. Pages. 672-682.

149 S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. A. Medvedev Deformation of bubbles in transformer oil at the action of alternating electric field // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2019. Volume: 75. Pages. 105-109.

150 Borsi H., Schröder U. Initiation and formation of partial discharges in mineral-based insulating oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. Volume: 1. Issue: 3. Pages. 419-425.

151 Sakoda T., Arita T., Nieda H., Ando K., Otsu M., Honda C. Studies of elastic waves caused by corona discharges in oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. Volume: 6. Issue: 6. Pages. 825-830.

152 Pompili M., Mazzetti C., Bartnikas R. Phase relationship of PD pulses in dielectric liquids under ac conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2000. Volume: 7. Issue: 1. Pages. 113-117.

153 Pompili M., Mazzetti C., Bartnikas R. Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Volume: 12. Issue: 2. Pages. 395-403.

154 M. Pompili, C. Mazzetti, R. Bartnikas PD pulse burst characteristics of transformer oils // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Volume: 21. Issue: 2. Pages. 689-698.

155 Kunihide Tachibana, Yuki Takekata, Yusuke Mizumoto, Hideki Motomura and Masafumi Jinno Analysis of a pulsed discharge within single bubbles in water under synchronized conditions // Plasma Sources Science and Technology. 2011. Volume: 20.

156 S. Korobeynikov, A. Ovsyannikov, A. Ridel, D. Karpov, M. N. Lyutikova, Y. Kuznetsova, V. Yassinskiy Study of partial discharges in liquids // Journal of Electrostatics. 2020. Volume: 103.

157 Friedrich Paschen, Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie. 1889. Volume: 273. Issue: 5. Pages. 69-96.

158 S. M. Korobeynikov, A. G. Ovsyannikov, A. V. Ridel, D. I. Karpov Study of partial discharges in bubbles and microsphere in transformer oil // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Volume: 1128.

159 Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Medvedev D.A., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Volume: 26. Issue: 4. Pages. 1035-1042.

160 S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. I. Karpov, A. G. Ovsyannikov, M. B. Meredova Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Volume: 26. Issue: 5. Pages. 1605-1611.

## ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**УТВЕРЖДАЮ**

Начальник ПУ по диагностике

АО «Электросетьсервис ЕНЭС»

А.В. Шелепов



**АКТ**

внедрения результатов исследований Риделя Александра Викторовича на тему  
«Исследование электрофизических процессов в жидкой электрической изоляции с микровключениями»

гор. Новосибирск

05 апреля 2021 г.

На предприятии создана комиссия в следующем составе:

1. Председатель: - Шелепов А.В. начальник ПУ по диагностике.
2. Член комиссии: Живодерников С.В. – начальник отдела ДМО, к.т.н.
3. Член комиссии: Лавров В.Ю. – начальник испытательной лаборатории.
4. Член комиссии: Анисеева М.А. – ведущий инженер отдела ДМО, к.т.н.

Рассмотрены результаты внедрения выводов и рекомендаций диссертации Риделя А.В., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Комиссия пришла к следующему выводу: полученные в работе данные по образованию стримеров в трансформаторном масле при малых напряженностях поля позволят повысить безопасность эксплуатации высоковольтного оборудования и надёжность электроснабжения на основе повышения достоверности диагностических заключений. Предполагаемый экономический эффект - до 150 тыс. руб. в год за счет снижения стоимости необходимых анализов проб изоляционных жидкостей. Срок окупаемости капитальных вложений при внедрении составит менее 1 года.

Председатель комиссии:

Шелепов А.В.

Член комиссии:

Живодерников С.В.

Член комиссии:

Лавров В.Ю.

Член комиссии:

Анисеева М.А.