

На правах рукописи



Бычков Александр Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДАХ И  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОБООТБОРА ДЛЯ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Специальность 05.14.12 – техника высоких напряжений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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

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

**Официальные оппоненты:** Ушаков Василий Яковлевич,  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
профессор кафедры электрических сетей  
и электротехники

Вдовико Василий Павлович,  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник  
Инжиниринговая компания ООО  
“Энергетика, Микроэлектроника,  
Автоматика”,  
ведущий эксперт

**Ведущая организация:** Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Казанский государственный  
энергетический университет», г. Казань

Защита состоится: 12 марта 2015г. в 10:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном  
техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса,  
20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201 5 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



А.Г. Русина

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Известно, что аварии и нештатные режимы на крупных объектах энергетики влекут за собой серьезные социально-экономические и технические последствия. Из годовых отчетов ФСК ЕЭС за 2005-2012 гг. видно, что количество нарушений на оборудовании подстанций (ПС) постоянно растет. Это объясняется как износом оборудования ПС (29%), так и дефектами изготовления (19%). Замена всех устаревших единиц электрооборудования зачастую невозможна, ввиду экономических и технических сложностей, к тому же не всегда рациональна. Выявление предпосылок к возникновению аварий является **важной и актуальной задачей**. Диагностирование оборудования и режимов его работы позволит не только сократить средства на ремонт, но и избежать катастроф. Очевидно, что затраты на диагностирование намного меньше затрат на ремонт оборудования, особенно в случае возникновения аварий.

В настоящее время наиболее информативными и часто применяемыми методами диагностирования развивающихся повреждений на ранней стадии являются регистрация частичных разрядов (ЧР) в бумажно-масляной изоляции и физико-химический анализ изоляционных жидкостей и газов. Проведенный литературный обзор показал, что исследования в области совершенствования диагностических методов позволят повысить объективность оценки технического состояния силового маслонаполненного электрооборудования.

**Целью работы** является изучение механизмов развития частичных разрядов в трансформаторном масле в резконеоднородном поле и совершенствование пробоотбора для газового анализа состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследование ЧР в системе электродов «острие-плоскость» с оптической и электрической регистрацией протекающих процессов.
2. Регистрация течений для оценки скоростей распространения растворенных веществ.
3. Исследование и разработка пробоотборных устройств с гибкой оболочкой.

**Объект исследования.** Высоковольтное маслонаполненное электрооборудование.

**Предмет исследования.** Совершенствование методов диагностирования высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось на основе теоретического и экспериментального методов исследования. В теоретическом плане выполнено моделирование энерговыделения и

кажущегося заряда при частичном разряде; рассмотрены возникновение термоконвективных течений и диффузия газов в элементах пробоотборных устройств.

В экспериментальном плане проведены экспериментальные исследования частичных разрядов с электрической и фотоэлектронной регистрацией процессов; проведена регистрация термоконвективных течений на модели с использованием полимерных частиц-индикаторов; проведены экспериментальные исследования сохранности проб трансформаторного масла в пробоотборных устройствах с гибкой оболочкой.

**Достоверность и обоснованность** результатов обеспечена сочетанием теоретических исследований с проведением экспериментов, использованием адекватного исследуемым процессам математического аппарата, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также непротиворечивостью экспериментальных результатов и сделанных на их основе выводов известным теоретическим положениям.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

- экспериментально обнаружено три различных типа частичных разрядов, два из них при отрицательной полярности острейного электрода;
- разработана методика и определён коэффициент газообразования в трансформаторном масле при частичном разряде в объеме жидкости;
- зарегистрированы термоконвективные течения в модели высоковольтного маслonaполненного электрооборудования;
- экспериментально показана сохранность проб трансформаторного масла в пробоотборных устройствах с гибкой оболочкой.

**Реализация и внедрение:**

Разработана методика определения коэффициентов газообразования при возникновении частичных разрядов в объеме изоляционной жидкости.

Предложен способ визуализации течений в трансформаторном масле путем использования полимерных частиц-индикаторов.

Экспериментально и теоретически обоснована возможность применения нового типа пробоотборных устройств с гибкой оболочкой.

В ОАО "Электросетьсервис ЕНЭС" переданы данные, полученные при выполнении работы, именно: признаки электрических сигналов частичных разрядов различного типа; коэффициент газообразования при частичных разрядах в трансформаторном масле.

Результаты работы использованы в:

ООО «Инжиниринговый Центр ЭЛХРОМ» при изготовлении опытной партии пробоотборных устройств с гибкой оболочкой.

**Личный вклад.** Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Постановка цели работы и задач исследования выполнены совместно с научным руководителем С.М. Коробейниковым. Все

экспериментальные исследования выполнены автором единолично. Обработка и анализ экспериментальных данных по частичным разрядам выполнены совместно с С.М. Коробейниковым и Д.В. Вагиным. Разработка математической модели частичного разряда в жидкости выполнена совместно с Д.В. Вагиным. Разработка математической модели течений в высоковольтном маслonaполненном электрооборудовании, а так же диффузии газов в узлах пробоотборного устройства выполнены с С.М. Коробейниковым.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Наличие трех различных типов частичных разрядов, два из них при отрицательной полярности острейного электрода;
2. Определение коэффициента газообразования в трансформаторном масле при частичном разряде в объеме жидкости;
3. Результаты регистрации термоконвективных течений в модели высоковольтного маслonaполненного электрооборудования;
4. Пробоотборные устройства с гибкой оболочкой могут обеспечивать сохранность проб для применения в диагностике оборудования с бумажно-масляной изоляцией

**Апробация работы.** Диссертационная работа и её основные положения докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-практической конференции «XXXIX Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2010 г.;

- Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Виктора Соколова «Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы» Екатеринбург, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2011 г.;

- Всероссийской научно-технической конференция «Наука. Промышленность. Оборона.» Новосибирск, НГТУ, 2012, 2013, 2014 г.г.;

- Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» Украина, г. Николаев, 2011, 2013 г.г.;

- Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» г. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2012 г.;

- Международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST 2013 г.), Монголия, Улан-Батор.

- VI Международном научном конгрессе (МНК) «СИББЕЗОПАСНОСТЬ – 2014 г.».

- На I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», г. Новосибирск, НГТУ, 2014 г.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 27 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления результатов диссертационной работы.

Работа выполнялась в рамках:

1. ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы". Тема: "Разработка систем диагностики состояния теплоэнергетического и электроэнергетического оборудования" ГК №16.516.11.6092, 2011-2012 г.г., (Руководитель Коробейников С.М.).

2. РФФИ «Мой первый грант» 2014-2015 г.г. по договору № НК 14-08-31311\14. «Оптические исследования частичных разрядов в газовых включениях трансформаторного масла», 2014-2015 г.г., (Руководитель Бычков А.Л.).

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных работ из 115 наименований. Работа изложена на 152 страницах основного текста, иллюстрируется 67 рисунками и 17 таблицами.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе «*Обзор литературных данных по газообразованию газораспределению и пробоотбору трансформаторного масла*» рассмотрены методики определения коэффициента газообразования, механизмы распределения газообразных продуктов разложения по объему электрооборудования, а также проведен анализ устройств для отбора проб трансформаторного масла из бака трансформатора и газов из реле Бухгольца.

В настоящее время существуют два метода, направленных на определение газостойкости изоляционных жидкостей при воздействии частичных разрядов. Основное отличие методов заключается в условиях, при которых создаются электрические разряды, приводящие к разрушению испытуемых жидкостей. Первая методика, описанная в стандарте международной электротехнической комиссии, основана на регистрации разрядов в ячейке с искусственно созданным парогазовым промежутком. Вторая – заключается в моделировании дефекта маслонеполненного конденсатора, при этом разряд протекает вдоль поверхности твердого диэлектрика. По-нашему мнению, в обеих методиках есть неточности, связанные с определением вложенной энергии, поскольку в первой методике

разряд протекал в парогазовой полости и не имел непосредственного контакта с испытуемой жидкостью, во второй методике не учтено влияние осевшего заряда, который, без сомнения, будет возникать при разряде вдоль поверхности диэлектрика. Поэтому нами предложена методика экспериментального определения коэффициента газообразования при ЧР в резконеоднородном электрическом поле (ЭП).

Наряду с газообразованием, важным моментом для получения достоверных диагностических данных является газораспределение. Выявлено, что диффузионным путем нельзя объяснить равномерное распределение газообразных продуктов в баке трансформатора, размеры которого порой достигают ~10 м. Например для самого «быстрого» газа – водорода, перемещение диффузионным путем за 1 месяц составляет:

$$\Delta x_m = \sqrt{2 \cdot D \cdot t} = 10^{-1} \text{ м} \quad (1)$$

где  $D$ - коэффициент диффузии изучаемого газа в масле;  $t$ - время.

В маслонаполненном электрооборудовании с принудительным охлаждением циркуляцию обеспечивают масляные насосы. Таким образом, оценка времени равномерного распределения газов в баке трансформатора АДЦТН- 500000/500/220-У1, мощностью 500 МВА, производства ОАО «Электрозавод» дало значение около 3 часов, что вполне удовлетворительно. В электрооборудовании с естественным охлаждением циркуляция происходит за счет термоконвективных течений, скорости которых в настоящее время неизвестны.

Последним этапом диагностического контроля газообразных продуктов в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании является отбор, транспортировка и проведение газового анализа пробы, отобранной из электрооборудования. На данном этапе важнейшим условием является поддержание представительности проб, а именно тождественности объемной концентрации газов в баке электрооборудования, концентрации, находящейся в пробоотборном устройстве к моменту проведения анализа. Представительность пробы не в последнюю очередь зависит от качества пробоотборника. Анализ пробоотборных устройств изоляционных жидкостей и газов показал, что наилучшими характеристиками в настоящее время обладает специализированный пробоотборник Elchrom. Также нашли широкое применение в электроэнергетике многоцветные стеклянные шприцы производства ОАО «Медстекло» г. Клин. Стоит отметить, что с применением пробоотборников Elchrom в холодный период года есть некоторые проблемы, связанные с узлом герметизации, а шприцы Клинского производства сняты с производства, поэтому необходимость исследований в этой области становится более актуальной.

Во **второй** главе «*Определение коэффициента газообразования и анализ характеристик частичных разрядов*» проведены экспериментальные и теоретические исследования газообразования в трансформаторном масле при частичных разрядах в резконеоднородном ЭП. Разработана экспериментальная ячейка с системой электродов «острие-плоскость», а также изготовлены острийные электроды с радиусом скругления острия около 3 мкм. Экспериментально определены пороговые напряжения появления частичных разрядов вблизи острия - катод и анод на переменном напряжении промышленной частоты, которые составили 18 кВ и 19 кВ соответственно. Зарегистрированы характерные типы импульсов частичных разрядов вблизи острия - катод и анод, зависящие как от степени дегазации масла, так и от полярности острия (рисунок 1, 2)

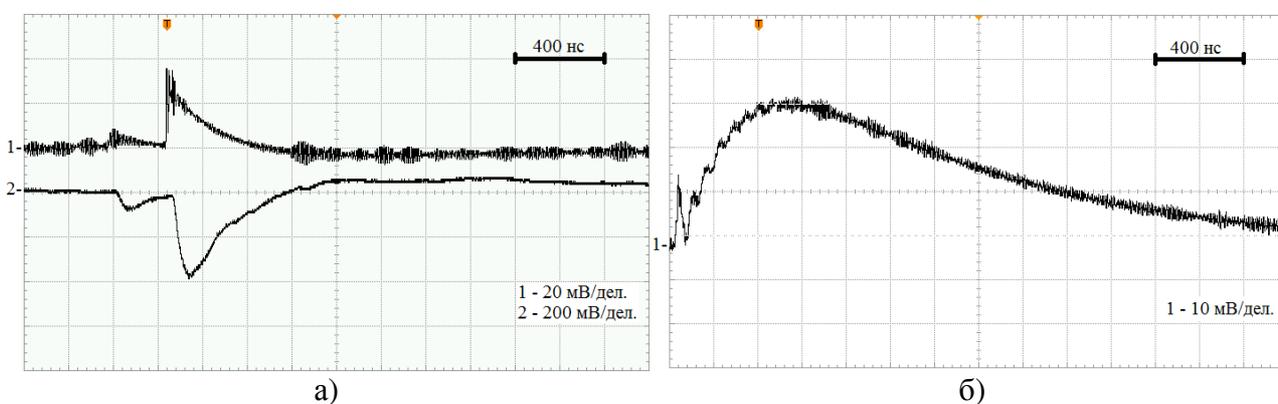


Рисунок 1 – Частичный разряд вблизи острия-катод

а- в дегазированном трансформаторном масле ГК (1 - электрический сигнал с емкости связи; 2 - сигнал с фотоэлектронного умножителя); б- в не дегазированном трансформаторном масле ГК

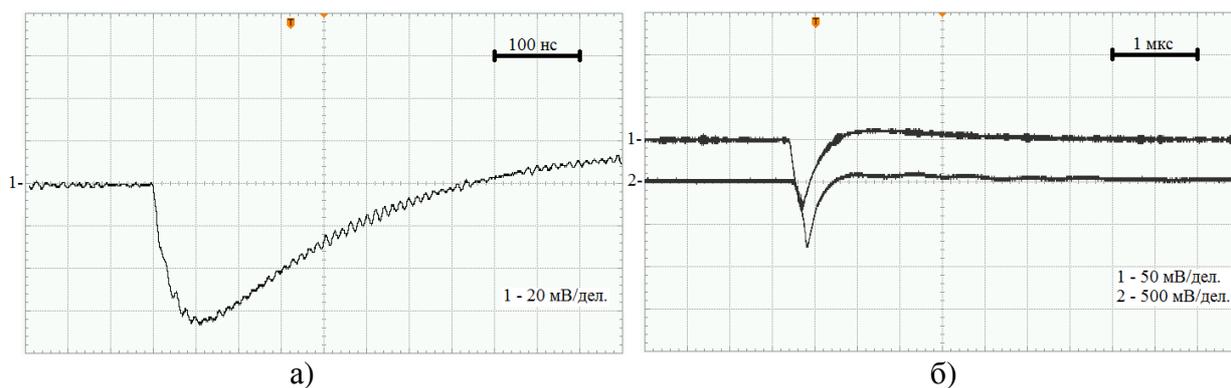


Рисунок 2 – Частичный разряд вблизи острия-анод

а- развертка 50 нс/дел, электрический сигнал; б- развертка 0,5 мкс/дел. 1 - электрический сигнал с емкости связи; 2 - сигнал с ФЭУ

Наряду с электрическим методом регистрации был применен фотоэлектронный, при помощи ФЭУ. Стоит отметить, что на фильтрованном трансформаторном масле ГК, при комнатной температуре на положительной и отрицательной полярности острия, импульсы свечения, зарегистрированные

при помощи ФЭУ, практически повторяли форму импульсов тока. При этом, ЧР, возникающие вблизи острейного катода и анода, отличаются между собой по длительности, как переднего, так и заднего фронтов. На катоде зарегистрировано два типа импульсов: «короткие» - со временем переднего фронта порядка  $2\div 3$  нс, заднего фронта  $300\div 350$  нс, «длинные» - со временем переднего фронта порядка  $200\div 250$  нс, заднего фронта  $2\div 2,5$  мкс. На аноде зарегистрированы импульсы с передним фронтом порядка  $45\div 55$  нс, задним около 350 нс. Характерные значения кажущегося заряда длинных катодных импульсов  $15\div 40$  пКл, коротких катодных  $1,5\div 5$  пКл, анодных  $1,5\div 5$  пКл.

Применительно к анализу ЧР, происходящих в трансформаторном масле (ТМ), можно сказать следующее. Короткие импульсы ЧР, возникающих вблизи острия катод, как правило, появляются в виде серий. На наш взгляд, короткие ЧР являются следствием возникновения и развития стримеров в жидкости, в развивающихся парогазовых полостях. Что касается длинных импульсов, то их поведение можно объяснить следующим образом. Первый предимпульс, скорее всего, является близким по своей природе к коротким импульсам, а последующая фаза, очевидно, должна иметь особенности, связанные с наличием растворенных газов. После возникновения предимпульса, парогазовое образование имеет малую плотность, ввиду высокой точки кипения трансформаторного масла. Поэтому разряды в образовании, если взять произведение  $p \cdot d$ , должны принадлежать к левой ветви кривой Пашена. В дегазированном масле, рост стримера приведет к прекращению разряда. В слабодегазированном масле должна происходить диффузия растворенного в жидкости газа в вакуумную полость стримерного разряда, что приводит к повышению давления в ней. При этом, невзирая на увеличение размеров стримерной зоны при его росте, может не произойти прекращения разряда в силу того, что разряд при повышенном давлении (в соответствии с левой частью кривой Пашена) происходит при пониженном падении напряжения на разряде. Тем самым, разряд в квазинепрерывном режиме может существовать длительное время, достигающее нескольких микросекунд.

При развитии положительного дозвукового стримера происходит перенос положительного заряда к кончику развивающегося стримера. Поскольку подвижность положительных зарядов намного (примерно на порядок) ниже подвижности электрона в газовой фазе, то электропроводность стримера должна иметь меньшие значения, что в конечном счете приводит к более медленному развитию разряда. На наш взгляд увеличение фронта положительного ЧР по сравнению с фронтом отрицательного ЧР может быть объяснено именно этими обстоятельствами.

При проведении серий экспериментов, с регистрацией характеристик (действующее напряжение, мгновенное напряжение при возникновении ЧР, амплитуда напряжения ЧР) от 500 до 2000 импульсов ЧР, определен

коэффициент газообразования в трансформаторном масле ГК при частичном разряде в объеме жидкости, который составил 7400 мкл/Дж, что почти на порядок больше данных, полученных ранее. Такое увеличение, по-нашему мнению, связано с тем обстоятельством, что в нашем случае большая часть энергии уходит на разрыв внутримолекулярных связей молекул трансформаторного масла.

Подчеркнем, что экспериментальные данные по ЧР позволили определить порог ударной ионизации в трансформаторном масле ГК, который составляет 15÷20 МВ/см.

Кроме того, была составлена математическая модель возникновения ЧР. Считалось, что разряд возникает в сферической области диаметром  $D$ , который менялся в пределах от 2 до 400 мкм, после разряда эта область считалась проводящей. Кажущийся заряд определялся в результате расчета методом конечных элементов емкостей до разряда и после разряда, по выражению:

$$Q = \Delta C \cdot U \quad (2)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения кажущихся зарядов в пКл для рассмотренных случаев разрядов

Размер области, мкм	2	4	8	10	40	100	400
$C_{\text{яч}} - C_1$	0,2	1	3,5	5,1	30,4	80,5	318
$C_{\text{яч}} - C_2$	1,2	6,5	25,3	38,4	269	705	2410
$C_1 - C_2$	1,4	7,6	28,8	43,6	299	786	2730

где  $C_{\text{яч}}$ - емкость ячейки;  $C_1$ - емкость системы с газовым пузырьком;  $C_2$ - емкость системы в которой произошли ионизационные процессы в локальной сферической области.

Сопоставление расчетных данных с результатами экспериментов показывают, что они хорошо соответствуют друг другу. При этом короткие ЧР соответствуют протеканию ЧР в областях размером 4÷8 мкм, длинные ЧР - 10÷40 мкм.

В **третьей** главе «Теоретические и экспериментальные исследования механизмов и времени газораспределения в трансформаторном масле» проводились экспериментальные исследования скоростей газораспределения на модели высоковольтного маслонаполненного трансформатора, а также проводилось сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Экспериментальная установка (рисунок 3) представляет собой прозрачный герметичный куб, объемом 1,5 литра, выполненный из органического стекла и заполненный трансформаторным маслом марки ГК.

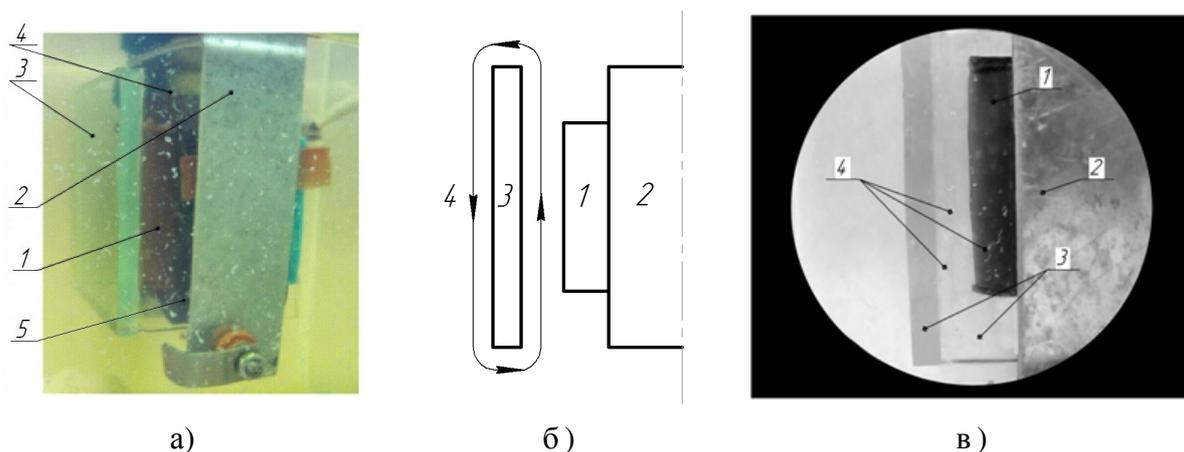


Рисунок 3 - Экспериментальная ячейка (а- фрагмент, б- схема, в- регистрационная картина)

1- обмотка; 2- скоба; 3- стеклянный «барьер»; 4- частицы-индикаторы – белые пятна; 5 – сердечник

Активная часть модели трансформатора состояла из магнитопровода высотой 50 мм и катушки, изготовленной в лабораторных условиях путем намотки на картонный каркас медного провода марки ПЭВ-2, диаметром 0,2 мм. Напряжение подавалось от сети переменного тока 220 В. При этом сопротивление катушки составляло 72 Ом, ток - 0,3 А, что соответствовало активной мощности 6,5 Вт.

Между стенкой корпуса и магнитопроводом на расстоянии 6 мм размещался стеклянный «барьер», моделирующий маслобарьерную изоляцию. Для визуализации течения внутрь объема экспериментальной установки засыпался полипропиленовый порошок в количестве 10-15 г. Размер частичек полипропилена составлял - 100-200 мкм. С учетом того, что удельная плотность полипропилена - 905 кг/м<sup>3</sup>, трансформаторного масла 895 кг/м<sup>3</sup>, можно предположить, что скорость оседания частиц полипропилена не превышала 0,1 мм/с. Количество полипропиленового порошка выбиралось из расчета обеспечения не менее 3-4 частиц в области регистрации при равномерном перемешивании.

Питание экспериментального образца осуществлялось от бытовой сети через регулятор напряжения. Контроль температуры осуществлялся двумя ртутными термометрами. Регистрация скорости течения ТМ осуществлялась при помощи микроскопа МБС-9 со встроенной в окуляр видеокамерой CNR-WSAM820. Интервал времени между кадрами составлял 0,2 с. Пространственный масштаб определялся путем оптической регистрации элементов известных размеров.

Перед началом экспериментов масло с полипропиленовым порошком перемешивалась с помощью магнитной мешалки для равномерного распределения частичек полипропилена по всему объему испытываемого образца. После этого включалось питание от сети и контролировалась

температура верхних и нижних слоев масла до установления стационарного температурного режима. Далее, при помощи микроскопа и видеокамеры производилась регистрация частиц полипропилена, определялись их скорости. Перепад температуры между верхними и нижними слоями масла составлял  $7^{\circ}$ . Анализ видеосъемок показал, что движение частиц имело циклический характер, обусловленный процессом конвекции. Вблизи катушки и магнитопровода частицы поднимались вверх, затем переходили в горизонтальное движение, удаляясь от источника тепла, опускались, потом снова приходили в горизонтальное движение по направлению к катушке и магнитопроводу. После этого цикл повторялся. Например, одну и ту же частицу характерной удлиненной формы наблюдали в течение примерно 5 циклов подъема-спуска. Один цикл подъема-спуска длился примерно 120 с. После обработки результатов, выявлена скорость вертикального движения частиц, которая составила 1,1-1,3 мм/с.

Оценим скорость конвективного течения жидкости  $v$  вблизи нагретой поверхности. Толщина слоя прогретой жидкости составляет  $\Delta x_c \approx (a \cdot \tau_B)^{1/2}$ , где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau_B$  – время вертикального движения жидкости вдоль поверхности высотой  $l_B$  ( $\tau_B \approx l_B / v$ ). Скорость конвективного течения жидкости можно оценить через баланс выталкивающей силы Архимеда  $\Delta \rho \cdot g$  и силы вязкого сопротивления  $\eta \cdot \frac{d^2 \vartheta}{dx^2}$ . Для  $\Delta \rho \approx \beta \cdot \Delta T \cdot \rho$ , где  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения получаем:

$$\vartheta = \frac{\Delta x_c^2 \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot \beta \cdot g}{12\eta} \quad (3)$$

Перепад температур  $\Delta T$  определим из соображений, что весь поток тепла, излучаемый поверхностью, переносится конвективным потоком. Т.е.  $v \Delta x_c \cdot l_{\text{попер}} \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot C \approx q \cdot S$ , где  $l_{\text{попер}}$  – поперечный размер струи,  $C$  – теплоемкость,  $q$  – удельная излучаемая мощность. Отсюда:

$$\Delta T = \frac{q \cdot S}{v \cdot \Delta x_c \cdot l_{\text{попер}} \cdot \rho \cdot C} \quad (4)$$

Подставим это выражение в (3), и учитывая, что  $\Delta x_c = (a \tau_B)^{1/2} = (a \cdot l_B / v)^{1/2}$  после преобразований получаем:

$$\vartheta = \left( \frac{\sqrt{a} \cdot \beta \cdot g \cdot l_{\text{вертик}}^{1/2} \cdot P}{12\eta \cdot l_{\text{попер}} \cdot C} \right)^{2/5} \quad (5)$$

где  $P = q \cdot S$  – мощность, выделяющаяся в модели трансформатора. В наших экспериментах мощность составляла 6,5 Вт, причем доля мощности, рассеиваемой на изучаемой части, составляла примерно одну четвертую часть.

Подставляя данные:  $a = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\beta = 7 \cdot 10^{-4} 1/\text{К}$ ,  $\eta = 20 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ,  $C = 0,46 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $l_{\text{верт}} = 35 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{попер}} = 150 \text{ мм}$  получим теоретическую оценку скорости конвективного потока 0,9-1,1 мм/с. Экспериментальные данные, как указано выше, дали значения 1,1-1,3 мм/с.

На наш взгляд, с учетом приближенности оценок, такое совпадение теоретических расчетов с полученными экспериментальными результатами следует признать достаточно точным! Отметим, что при прочих равных условиях с увеличением мощности  $P$  скорость  $v \approx P^{2/5}$ , толщина слоя  $\Delta x_c \approx (1/v)^{1/2} \approx (1/P)^{1/5}$ , а  $\Delta T \approx P^{4/5}$ , то есть повышение температуры является преобладающим фактором в теплопереносе.

В **четвертой** главе «Разработка и исследование одноразового пробоотборного устройства» разработано одноразовое пробоотборное устройство (рисунок 4) с гибкой оболочкой, которое представляет собой емкость, состоящую из трехслойного материала (полиэтилен+алюминиевая фольга+полипропилен) с широкими сварными швами. В верхней части пробоотборного устройства приварена горловина с наконечником луер-лок. Наконечник луер-лок соединяется с медицинской иглой, что дает возможность отбора проб ТМ, практически не изменяя методики.



Рисунок 4 – Одноразовое пробоотборное устройство

Конструкция многослойных одноразовых емкостей предполагает наличие, как минимум, двух полимерных пленок с металлической пленкой между ними. При этом тонкий слой металла (алюминия) обеспечивает газонепроницаемость, т.к. растворимостью и скоростью диффузии газов сквозь него можно пренебречь. По-существу, пути утечки газов могут возникнуть только из-за дефектов тонкого алюминиевого слоя, а также в местах спаивания пластин между собой.

Теоретические оценки сохранности пробы трансформаторного масла в пробоотборнике с гибкой оболочкой и дефектом в металлическом слое дали времена около 200 лет. Отсюда можно сделать вывод о том, что диффузионным потоком через дефекты в алюминиевом слое можно пренебречь. Оценки сохранности пробы с учетом диффузии через сварной шов дали значение одну неделю, поэтому было решено провести экспериментальные исследования газоплотности одноразовых пробоотборных устройств.

Методика проведения испытаний заключалась в следующем. Трансформаторное масло ГК подвергалось дегазации с последующим насыщением тремя диагностическими газами (водород, метан, этан). После подготовки масла пробоотборные устройства заполнялись и отбирались первые (исходные) пробы для газового анализа. Спустя интервалы времени (1, 2, 4, 6 недель) отбирались последующие пробы масла из пробоотборника с гибкой оболочкой. Результаты газового анализа за 6 недель представлены на рисунке 5.

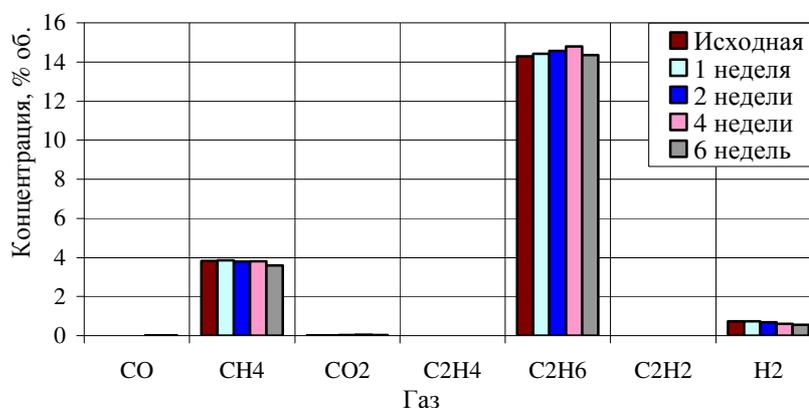


Рисунок 5 – Изменение концентрации газов в ПУ с гибкой оболочкой за 1, 2, 4, 6 недель

Анализируя изменения концентраций газов, можно сказать, что пробоотборное устройство с гибкой оболочкой обладает достаточной газоплотностью, для применения его при диагностике электрооборудования с бумажно-масляной изоляцией.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационной работы по исследованию газообразования при частичных разрядах и совершенствованию пробоотбора для газового анализа высоковольтного маслонаполненного электрооборудования получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально обнаружено три различных типа частичных разрядов, два из них при отрицательной полярности острейшего электрода. Импульсы ЧР при отрицательной полярности электрода имели особенности, связанные с разной степенью дегазации трансформаторного масла. В дегазированном масле были зарегистрированы группы импульсов, длительностью около 200 нс, которые являлись следствием возникновения стримеров в развивающихся парогазовых полостях. В насыщенном воздухом трансформаторном масле возникали единичные импульсы частичных разрядов

длительностью около 1,5 мкс. Столь длительное протекание разряда связано с диффузией воздуха в образовавшуюся полость. Импульсы вблизи острия-анод отличались от «коротких» импульсов частичных разрядов на катоде более длинным передним фронтом. Увеличение времени протекания процесса связано с подвижностью положительных зарядов в газах, которая практически на порядок меньше чем у электронов.

2. Разработана методика и определён коэффициент газообразования в трансформаторном масле при частичном разряде в объеме жидкости, который составил 7400 мкл/Дж. Большее значение коэффициента газообразования, по сравнению с полученными ранее, связано с тем, что основная часть энергии при ЧР в резконеоднородном поле затрачивается на ионизацию молекул масла.

3. Зарегистрированы термоконвективные течения в модели высоковольтного маслонаполненного электрооборудования, полученные значения скорости которых не противоречат теоретическим оценкам.

4. Экспериментально показана сохранность проб трансформаторного масла в пробоотборных устройствах с гибкой оболочкой в течение 6 недель. Это дает основание утверждать, что одноразовые пробоотборные устройства с гибкой оболочкой на металл-полимерной основе пригодны для использования в диагностике электрооборудования с бумажно-масляной изоляцией.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Рыжкина А. Ю. Определение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле // Журнал технической физики . - 2011. - № 3. - С. 106-107.

2. Коробейников С. М., Соловейчик Ю. Г., Бычков А. Л. и др. Растворение пузырьков диагностических газов в трансформаторном масле // Теплофизика высоких температур. - 2011. - № 5. - С. 771-776.

3. Sviridenko M. V., Melekhov A. V., Korobenkova A. Yu., Bychkov A. L., Korobeynikov S.M. Microbubbling in transformer oil due to vibration // IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2013. – Vol. 20, No. 2. - С. 675-677.

4. Коробейников С. М., Свириденко М. В., Мелехов А. В., Бычков А. Л., Дарьян Л. А. Диффузия и течения в трансформаторном масле. Регистрация термоконвективных течений // Энергетик. - 2013. - № 2. - С. 47-48.

5. Коробейников С. М., Свириденко М. В., Бычков А. Л., Дарьян Л.А. Диффузия и течения в трансформаторном масле: работа масляного затвора // Энергетик. - 2013. - № 3. - С. 36-39.

6. Bychkov A. L., Korobeynikov S. M., Ovsiyannikov A. G. Partial discharges registration in transformer oil at the ‘point-plane’ electrode system // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 698. - С. 615-620.

*Научные публикации в других изданиях:*

7. Коробенкова А. Ю., Мелехов А. В., Зоткин А. А., Бычков А. Л., Лысикова М. С. Исследование растворения основных диагностических газов в трансформаторном масле, с целью оптимизации работы высоковольтного маслонаполненного оборудования // Сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Создание новых материалов для эксплуатации в экстремальных условиях». - Якутск: Паблиш Групп, 2009. - С. 126-128.
8. Зоткин А. А., Коробейников С. М., Бычков А. Л., Коробенкова А. Ю. Выявление причин повышенного газообразования в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании // Труды Международной научно-практической конференции XXXIX «Неделя науки СПбГПУ». - СПб.: СПбГПУ, 2010. - С. 43-44.
9. Бычков А. Л. Выяснение причин повышенного газообразования в модели реактора // Материалы Всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых Наука. Технологии. Инновации. - Новосибирск: НГТУ, 2010. - С. 41-43.
10. Бычков А. Л., Коробенкова А. Ю. Изучение растворения газовых пузырьков в трансформаторном масле // Труды XI Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2010. - С. 92-94.
11. Коробенкова А. Ю., Бычков А. Л., Коробейников С. М. Оценки коэффициентов диффузии диагностических газов в трансформаторном масле // Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию Виктора Соколова «Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы». - Екатеринбург: Автограф, 2010. - С. 173-177.
12. Бычков А. Л., Зоткин А. А., Коробенкова А. Ю. Изучение процессов газообразования в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании на модели реактора // Труды 12 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2011. - С. 98–101.
13. Мелехов А.В., Бычков А. Л., Рыжкина А. Ю., Коробейников С. М., Зоткин А.А. Образование и поведение пузырьков в трансформаторном масле при вибрации // Материалы 15 Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2011. - С. 20-23.
14. Свириденко М. В., Аникеева М. А., Коробейников С. М., Бычков А. Л. Измерения частичных разрядов в трансформаторном масле // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2012. - С. 564-567.
15. Свириденко М. В., Коробейников С. М., Бычков А. Л., Аникеева М. А. Измерения частичных разрядов в трансформаторном масле // Материалы X Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». - СПб: СОЛО Санкт-Петербург, 2012. - С. 129-131.
16. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Аникеева М. А. Исследование термоконвективных течений в трансформаторном масле // Материалы X

Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». - СПб: СОЛО Санкт-Петербург, 2012. - С. 185-187.

17. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Анисеева М. А. Исследование течений и оценка скорости газораспределения в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2012. - С. 104-108.

18. Коробейников С. М., Лавров Ю. А., Илюшов Н. Я., Бычков А. Л. Грозозащита подстанций в условиях Крайнего Севера // Международный научный конгресс «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения». - Новосибирск: СГГА, 2013. - С. 116-120.

19. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Свириденко М. В., Исследование частичных разрядов в трансформаторном масле в системе электродов «Острие-плоскость» // Материалы 16 Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. - С. 22-25.

20. Коробенкова А. Ю., Коробейников С. М., Бычков А. Л. Механизм газообразования в трансформаторном масле при низкочастотной вибрации // Материалы 16 Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. - С. 212-215.

21. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Овсянников А. Г. Разработка экспериментальной установки для оптико-электронной регистрации частичных разрядов // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2013. - С. 62-65.

22. Свириденко М. В., Коробейников С. М., Бычков А. Л. Экспериментальное изучение влияния ультразвука на трансформаторное масло // Материалы 16 Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. - С. 26-29.

23. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Овсянников А. Г. Исследование частичных разрядов в трансформаторном масле в системе электродов «Острие – плоскость» // Труды 15 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: НГТУ, 2014. - С. 120-124.

24. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Овсянников А. Г. Исследование частичных разрядов в трансформаторном масле в системе электродов «острие – плоскость» // Материалы 9 научно-практического семинара общественного совета специалистов Сибири и Востока по проблемам диагностирования и испытания комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией «Диагностика электрических установок». - Красноярск, Дивногорск: ОСС ДЭУ, 2014. - С. 70-74.

25. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Овсянников А. Г. Исследование частичных разрядов в трансформаторном масле на переменном напряжении в системе электродов «острие-плоскость» // Труды 1 Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение». - Новосибирск: НГТУ, 2014. - С. 129-131.

26. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Овсянников А. Г. Предупреждение аварий высоковольтного маслонаполненного электрооборудования путем оптимизации диагностического метода регистрации частичных разрядов // Материалы научного конгресса «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения». - Новосибирск: СГГА, 2014. - С. 11-17.

27. Korobeynikov S. M., Bychkov A. L., Korobenkova A. Yu., Sviridenko M. V. Mechanism of gassing in oil-filled equipment due to vibration // The 8 international forum on strategic technologies IFOST. - Ulaanbaatar: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. - С. 610-613.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс. (383) 346-08-57  
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 157 подписано в печать 29.12.2014 г.