

На правах рукописи

**Савина Алла Юрьевна**

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАСЕЛ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент,  
**Кизеветтер Дмитрий Владимирович**

Официальные оппоненты: **Волокобинский Юрий Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор Санкт-Петербургского  
государственного университета  
телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

**Старовойтенков Виктор Валентинович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
проректор по учебной работе Федерального  
государственного автономного образовательного  
учреждения дополнительного профессионального  
образования «Петербургский энергетический  
институт повышения квалификации»  
(ФГАОУ ДПО "ПЭИПК")

Ведущая организация: Открытое акционерное общество  
«Научно-исследовательский институт  
по передаче электроэнергии постоянным  
током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»)

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.229.16 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,  
29, Главное здание, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.16  
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Наталия Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Общеизвестно, что система оценки работоспособности электроизоляционных масел (кабельных, конденсаторных, турбинных, трансформаторных и других), востребованных в широком спектре электротехнических устройств различного назначения, нуждается в совершенствовании с целью повышения информативности и достоверности, так как характеристики жидких диэлектриков во многом определяют надежность и технико-экономические показатели указанного оборудования. С этой точки зрения роль мониторинга трансформаторного масла (ТМ) особо значима, так как оно является слабым элементом высоковольтной изоляции силовых трансформаторов.

Известно, что силовой трансформатор (СТ), основным видом электрической изоляции которого остается (пока не имеющая конкурентоспособных альтернатив) бумажно-пропитанная композиция, считается наиболее ответственным и дорогостоящим элементом системы производства, передачи и распределения электроэнергии (неуклонный мировой рост которой диктует опережающий спрос на высококачественное трансформаторное оборудование). Статистически подтверждено, что срок службы СТ зависит от ряда факторов, среди которых основным является старение изоляции. Применительно к России ситуация осложнена изношенностью энергетического оборудования и, как следствие, ростом вероятности отказов, аварий и нарушений нормального жизнеобеспечения страны. Поэтому, помимо ввода новых энергоустановок, необходимы срочные меры по ремонту, замене и модернизации парка силовых трансформаторов. Вполне очевидно, что поиск путей повышения работоспособности действующих СТ требует решения комплекса задач, среди которых диагностика электрофизических свойств целлюлозной бумаги и электроизоляционного масла в процессе эксплуатации является актуальным и необходимым элементом профилактики аварий и надежного обеспечения энергобезопасности страны.

Так как трансформаторное масло - наиболее уязвимый компонент бумажно-пропитанной изоляции, то проблема выбора критериальной характеристики и ее предельного значения, свидетельствующего о необходимости своевременной замены ТМ, давно и широко обсуждается специалистами. Тем не менее, единой точки зрения по данному вопросу до сих пор не выработано. Оценка степени старения жидкого диэлектрика базируется на измерении большого количества разнообразных параметров. Среди них: электрическая прочность, тангенс угла диэлектрических потерь, кислотное число, влагосодержание, содержание механических примесей, прозрачность, цвет и др. Однако применяемые методы являются косвенными и не позволяют в полной мере оценить работоспособность трансформаторного масла. Так следует особо отметить отсутствие достоверной информации о развитии столь опасного явления как шламообразование, хотя осаждение шлама на конструктивных элементах и изоляции СТ

является отдельной причиной его выхода из строя. Действительно, действующие нормативы предусматривают определенную периодичность испытаний ТМ (и немедленное отключение СТ в случае несоответствия характеристик жидкого диэлектрика установленным требованиям, что в реальных условиях далеко не всегда возможно). Кроме того, принятые методы оценки показателей масла позволяют достоверно констатировать только уже свершившийся факт осаждения шлама, но не достаточно эффективны для решения проблемы предотвращения указанного явления. Поэтому необходимо усовершенствование системы контроля характеристик электроизоляционных масел (включая трансформаторные), базирующееся на разработке и применении нового, прямого, а в перспективе - непрерывного мониторинга их оптических свойств в процессе эксплуатации, что является актуальной, остро стоящей и, несомненно, практически полезной задачей.

**Цель работы. На основе исследований электроизоляционных масел и разработки специальной волоконно-оптической системы обеспечить возможность количественной оценки содержания механических частиц, а также - мониторинга шламообразования в процессе эксплуатации масел, что может способствовать повышению надежности и работоспособности электротехнических устройств различного назначения.**

В соответствии с поставленной целью работы, представляется необходимым решить следующие **задачи:**

1. Путем экспериментальных исследований оценить эффективность применения используемых электрических и оптических методов выявления механических примесей в жидких диэлектрических средах (на примере нефтяного трансформаторного масла).

2. Изучить характеристики и методы измерения параметров различных флуоресцирующих полимерных оптических волокон с целью дальнейшего их применения при создании устройства непрерывного мониторинга электроизоляционных масел.

3. Разработать методику количественной оценки наличия шлама в технических маслах, на базе которой создать устройство, позволяющее провести указанную оценку.

4. Расширить представления о возможности выбора критериальной характеристики, позволяющей на основе мониторинга шламообразования проводить своевременную замену трансформаторного масла.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые разработана методика, позволяющая получать качественные изображения движущихся микрочастиц в потоке электроизоляционных жидкостей, на основе которой создано оптическое устройство (что подтверждено патентом РФ №122187 «Волоконно-оптический осветитель»), относящееся к специальному наноборудованию.

2. Обеспечена возможность получения более достоверных сведений о форме движущихся в среде жидкого диэлектрика частиц, в то время как существующие косвенные методы базируются на допущении об их сферичности.

3. Впервые для определения параметров механических частиц в потоке электроизоляционной жидкости применено оптоволокно, активированное флуоресцирующим красителем.

4. Разработан новый способ измерения затухания во флуоресцирующих оптических световодах, который можно назвать интегральным методом бокового освещения, обладающий меньшей чувствительностью к локальным дефектам, чем существующий метод бокового освещения. Проведен сравнительный анализ эффективности указанных методов измерения. При помощи разработанного способа были определены коэффициенты затухания излучения волокон с различной концентрацией флуоресцирующего красителя, что позволило произвести расчеты параметров волоконно-оптического осветителя для получения более качественного изображения движущихся микрочастиц.

5. Перечисленные разработки впервые обеспечили реализацию прямого метода определения формы, размеров и концентрации движущихся механических примесей в электроизоляционных маслах.

#### **Практическая значимость:**

1. На основе сформулированных научных предположений и комплекса экспериментальных исследований создано оптическое устройство, целесообразность применения которого для количественной оценки наличия механических примесей в технических маслах подтверждена актом внедрения ЗАО «Турботект Санкт-Петербург», а также - патентом РФ №122187.

2. Создана методика расчета параметров волоконно-оптического осветителя – длины волокна и концентрации флуоресцирующего красителя в сердцевине световода для достижения оптимальных технических характеристик.

3. Разработанные методики и волоконно-оптический осветитель могут быть использованы для непрерывного мониторинга состояния электроизоляционного масла с целью увеличения срока эксплуатации оборудования (в частности – силовых трансформаторов с бумажно-пропитанной изоляцией).

4. Комплекс выполненных автором разработок обеспечивает возможность получения информации, необходимой для выбора количественной критериальной характеристики, которая в перспективе может позволить конкретизировать критическую степень шламообразования в трансформаторных маслах, что будет служить индикатором их своевременной замены.

5. Ряд результатов диссертационной работы используется кафедрой «ТВН, ЭИиКТ» Института энергетики и транспортных систем СПбГУ в учебном процессе при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

**На защиту выносятся:**

1. Применение полимерного оптического волокна, активированного флуоресцирующим красителем, для получения изображений движущихся микрообъектов.
2. Методика определения формы, концентрации и размера микрочастиц, находящихся в движении в электроизоляционной жидкости при их освещении волоконно-оптическим осветителем.
3. Результаты определения концентрации и размеров частиц, полученные при помощи использования волоконно-оптического осветителя на производстве и в лабораторных условиях.
4. Интерпретация результатов определения электрических и оптических характеристик проб трансформаторного масла (полученных как бригадой специалистов на промышленных объектах, так и автором диссертационной работы в лабораторных условиях), изъятых из действующих силовых трансформаторов, а также – искусственно состаренных при различных внешних воздействиях.
5. Возможность непрерывного мониторинга шламообразования в трансформаторном масле при его эксплуатации.

**Достоверность результатов.** Обеспечивается использованием современных методов измерения как оптических, так и электрофизических характеристик объекта исследования; корректной статистической обработкой опытных данных; их корреляцией с литературными сведениями.

**Личный вклад автора.** Состоит в участие в постановке цели и задач исследований, в усовершенствовании, а также – в разработке новых методик, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов. Все приведенные в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Апробация работы.** Материалы работы обсуждались на 21-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург, 2011 г.); Международной научно-практической конференции «XL Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2011 г.); конференции «I Всероссийский конгресс молодых ученых», (Санкт-Петербург, 2012 г.); XVI Всероссийской научно-методической конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах», (Санкт-Петербург, 2012 г.); 67-й Всероссийской конференции с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню радио», (Москва, 2012 г.); конференции, посвященной 50-летию полупроводникового лазера «Лазеры. Измерения. Информация», (Санкт-Петербург, 2012 г.); Международной научной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург, 2013 г.), 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL' 2013) (Sudak, Ukraine, 2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 - в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (160 наименований) и приложений. Диссертация выполнена на 183 страницах, содержит 81 рисунок и 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор отечественных и зарубежных работ, отражающих тенденции развития методов диагностики электроизоляционных масел и актуальность данной тематики. Показано, что каждый вид технических масел, широко используемых в электротехническом оборудовании, нуждается в совершенствовании. Особо отмечена роль трансформаторного масла, как компонента бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) силовых трансформаторов, снижение работоспособности которой является одной из основных причин отказов СТ, а неуклонный рост энергопотребления (в условиях изношенности отечественного парка силового оборудования) придает дополнительную значимость проблеме.

Проанализированы основные закономерности старения электроизоляционных масел, а также - БПИ в целом, вследствие которого имеют место столь опасные явления, как рост диэлектрических потерь изоляции, образование шлама и его осаждение на конструктивных элементах трансформатора. Продемонстрировано, что проблема разработки эффективных способов борьбы с накоплением шлама и контроля процесса шламообразования остается не решенной. Несмотря на острую необходимость обеспечения своевременной замены трансформаторного масла при эксплуатации и многообразие методов исследования его работоспособности, единая точка зрения по данному вопросу отсутствует. Показано, что существующие методы определения размеров твердых частиц и результаты испытаний ТМ, проведенные разными авторами, недостаточно информативны и противоречивы. Продемонстрировано, что в сложившейся ситуации представляются наиболее перспективными и все более активно применяются оптические методы диагностики жидких сред.

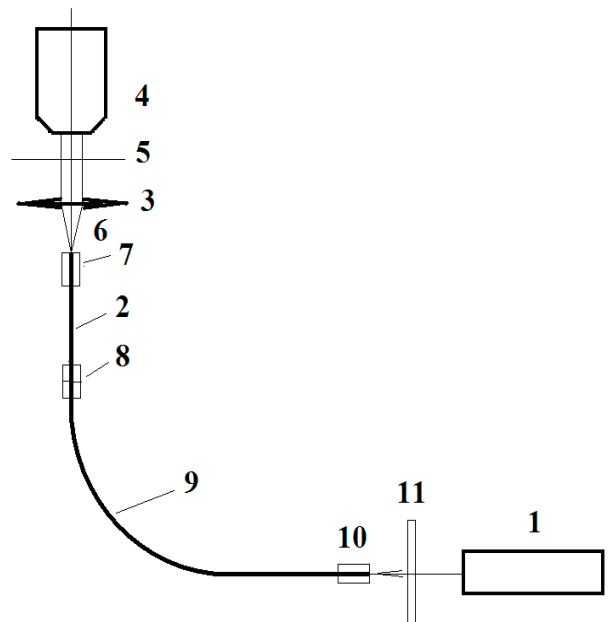
**Вторая глава** посвящена вопросам методического обеспечения проводимых исследований, а также – разработке методик выбора параметров волоконно-оптического осветителя и количественной оценки механических примесей (шлама) в технических маслах.

Приведены сведения о стандартных (ГОСТ) методах контроля характеристик электроизоляционных масел, применяемых на практике при периодических испытаниях трансформаторного масла из действующих СТ и высоковольтных вводов, в том числе -

бригадой специалистов (в состав которой входил соавтор наших публикаций Воробьев А.С.). Дано краткое описание ряда из них, имеющих непосредственное отношение к контролю содержания механических частиц и шламообразования в жидких диэлектриках, то есть к вопросу, составляющему предмет рассмотрения диссертационной работы.

Рассмотрены методы исследования диэлектрических потерь и оптических характеристик проб ТМ (как промышленных, так и искусственно состаренных под действием различных факторов), использованных в лабораторных условиях; приведено описание электрофизической аппаратуры.

Представлено обоснование необходимости создания усовершенствованной методики обнаружения частиц, находящихся в движении в электроизоляционной жидкости; определения их формы, размеров и концентрации. Впервые для определения концентрации и размеров механических частиц в технических маслах была разработана и применена методика, основанная на использовании в качестве осветителя - полимерного оптического волокна, активированного флуоресцирующим красителем. На основе данной методики было создано специальное устройство – волоконно-оптический осветитель (рис. 1), защищенное патентом РФ №122187. Суть методики заключается в фиксировании телевизионной камерой изображений частиц, движущихся в электроизоляционной жидкости (при ее освещении некогерентным светом). Измерительная установка содержит волоконно-оптический осветитель; кювету, установленную в фокальной плоскости объектива, через которую прокачивается электроизоляционная жидкость с исследуемыми частицами, и микроскоп с телевизионной камерой. При помощи волоконно-оптического осветителя осуществляется эффективное преобразование мощного когерентного излучения импульсного лазера (в случае использования которого для освещения движущихся микрочастиц происходит образование интерференционной картины, затрудняющей или делающей невозможным определение размеров и концентрации частиц) в некогерентное излучение с широким спектром без



**Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического осветителя:**

1 – лазерный излучатель; 2 – отрезок полимерного оптического волокна, активированного флуоресцирующим красителем; 3 – коллиматор; 4 – микрообъектив микроскопа; 5 – фокальная плоскость микро-объектива; 6 – световой пучок; 7 – выходной соединитель; 8 – соединитель; 9 – волоконный световод с кварцевой сердцевиной; 10 – входной соединитель; 11 – светофильтр



существенного изменения длительности импульса, а также - доставка некогерентного излучения к оптической системе микроскопа. Использование указанного осветителя позволяет получить малую длительность импульса (порядка 10 нс) и большую оптическую мощность, которую можно сфокусировать на небольшую площадь.

Концентрация частиц оценивалась по формуле:  $n = \frac{N}{h \cdot S}$ , где  $N$  – среднее количество видимых частиц,  $S$  – площадь поля зрения микроскопа,  $h$  – оценочная величина глубины зоны резкости (глубины резко изображаемого пространства). Достоверность полученных результатов обеспечивалась большим количеством (100-250 на пробу) обработанных кадров. Размер механических частиц определялся при помощи разработанной нами специальной компьютерной программы для обработки полученных изображений.

Во второй главе также приведено описание методики выбора параметров волоконно-оптического осветителя, необходимых для получения наилучшего качества изображения микрочастиц. Показано, что одной из основных характеристик флуоресцирующих полимерных оптических волокон (ФПОВ) является коэффициент затухания излучения ( $\alpha$ ), значение которого необходимо для расчета оптимальной длины ФПОВ, используемого в волоконно-оптическом осветителе. Применение существующих российских и международных стандартов по определению коэффициента  $\alpha$  в случае активных полимерных волокон (к которым относятся ФПОВ) затруднено, так как физические свойства активных световодов существенно отличаются от свойств пассивных оптических волокон (кварцевых и полимерных) вследствие преобразования спектральных характеристик распространяющегося по оптическому волокну излучения. Обзор зарубежной литературы позволил установить, что оптимальным неразрушающим методом измерения затухания во флуоресцирующих полимерных световодах является метод локального бокового освещения, известный в англоязычной литературе как SIF (Side-Illumination Fluorescence). Однако наряду с несомненными достоинствами у данного способа есть и ряд определенных недостатков. Среди них: высокая чувствительность к локальным неоднородностям волокна (небольшие флуктуации концентрации красителя или диаметра сердцевинки световода приводят к изменению мощности флуоресценции), а также - дефекты формы сердцевинки и отражающей оболочки (в частности, царапины на наружной поверхности волокна), влияющие на точность измерений при боковом локальном освещении. Во второй главе представлен и разработанный нами метод интегрального бокового освещения (основанный на освещении протяженного участка световода), который позволил существенно снизить указанные виды влияний на точность измерений коэффициента затухания, а также приведены результаты определения коэффициента затухания излучения флуоресценции, полученные двумя способами (методом локального бокового освещения и разработанным нами методом интегрального бокового освещения). Проведен сравнительный анализ эффективности

указанных методов измерения. Показано, что коэффициент затухания излучения зависит от температуры, в связи с этим определены температурные зависимости параметров флуоресценции родаминовых красителей и ФПОВ, использованных для создания волоконно-оптического осветителя.

**В третьей главе** приводятся основные экспериментальные результаты изучения электрофизических и оптических характеристик трансформаторных масел (полученные традиционными методами, а также - при помощи разработанной методики с использованием созданного волоконно-оптического осветителя) и их детальный анализ.

Как показано в первой главе, в процессе эксплуатации силовых трансформаторов в результате многофакторного воздействия происходит существенное изменение электрофизических характеристик компонентов бумажно-пропитанной изоляции, а также - накопление осадка (шлама) на активных частях и изоляции трансформатора, следствием чего является постепенное снижение работоспособности СТ в целом. Снижение работоспособности изоляции, развивающееся по пути роста диэлектрических потерь ТМ, хорошо известно и достаточно полно отражено в литературе, тогда как значительно менее изучен вопрос контроля за **шламообразованием** - отдельной причиной отказа СТ. Оседание шлама на поверхности изоляции и магнитопроводе приводит к ухудшению теплоотдачи от токоведущих частей и возникновению перегрева, что в ряде случаев может привести к серьезным авариям. Поэтому для повышения надежности СТ необходима достоверная диагностика состояния наиболее слабого компонента его изоляции – трансформаторного масла.

Анализ результатов испытаний образцов ТМ марки ГК (полученных при отборе проб из действующего оборудования), проведенных согласно действующим ГОСТам и нормативам бригадой специалистов, показал, что по контролируемым параметрам невозможно эффективно оценить состояние жидкости с позиции шлагообразования. Не дают объективного ответа на этот вопрос ни такие характеристика ТМ, как прозрачность (несмотря на различия в значениях электрофизических показателей все пробы масла были прозрачными); ни содержание растворимого шлама, определяемое весовым методом (во всех пробах оно составило менее 0,004 %). Выявлено, что такой параметр состояния ТМ, как показатель класса чистоты (оптический метод), имеет серьезный разброс. На величину пробивного напряжения, помимо механических частиц, оказывают влияние и иные факторы, в частности, влагосодержание. Анализ полученных значений тангенса угла диэлектрических потерь указанных проб трансформаторного масла позволяет предположить, что, хотя  $\text{tg}\delta$  – один из важнейших показателей при оценке работоспособности электроизоляционной жидкости, однако с точки зрения шлагообразования данный параметр не оптимален, что согласуется и с литературными данными. В целом сведения о состоянии ТМ, полученные в результате стандартных

испытаний, на наш взгляд, не однозначны, недостаточно информативны и не позволяют дать объективную оценку работоспособности масла и бумажно-масляной изоляции.

Высказанные предположения были подтверждены проведенными нами исследованиями проб ТМ, отобранных из действующего оборудования и полученных в результате старения под действием различных факторов в лабораторных условиях. Несмотря на существенные различия в значениях диэлектрических потерь пробы масла во всех случаях оставались прозрачными, хотя  $\text{tg}\delta$  (измеренный при температуре  $90^\circ\text{C}$  на частоте 50 Гц) некоторых образцов превышал 100 % вследствие высокой степени разрушения жидкости. Так, например, превосходило 100 % значение  $\text{tg}\delta_{90^\circ\text{C}}$  пробы отработанного масла, полученного непосредственно после слива из СТ. Причем следует отметить, что **основная масса шлама, образовавшегося в исследуемом образце, уже осела на конструктивных элементах и изоляции оборудования.** При дальнейших испытаниях в процессе выдержки пробы указанного ТМ в герметичной емкости при комнатной температуре осаждение шлама продолжалось, вследствие чего диэлектрические потери жидкости существенно снизились (как минимум - в 20 раз). Следовательно, результаты периодических измерений  $\text{tg}\delta$  ТМ действующего оборудования могут не отражать истинного состояния жидкого диэлектрика, являясь заниженными, что согласуется с литературными сведениями по данному вопросу. Кроме того, можно предположить, что нормативная периодичность испытаний ТМ недостаточна для оперативного отслеживания изменения его характеристик. Таким образом, осуществление контроля состояния трансформаторного масла традиционными методами (в частности, периодическое измерение диэлектрических потерь электроизоляционной жидкости и оценка ее прозрачности) по ряду причин не позволяют оперативно получать полноценную информацию о работоспособности жидкого диэлектрика и бумажно-масляной изоляции в целом.

В последнее время все большее распространение для диагностики электроизоляционных жидкостей получают оптические методы, такие как: изучение флуоресценции масел и определение светопропускания жидких сред. Поэтому в настоящей работе при исследовании промышленных и лабораторных образцов трансформаторного масла был применен хорошо известный, но не стандартизованный метод оценки коэффициента относительного светопропускания ( $K_{oc}$ ). Для повышения достоверности полученных результатов испытания проводились двумя способами: при помощи регистрации значения параметра в видимом диапазоне длин волн микроколориметром МКМФ-1, а также – путем измерения спектральных зависимостей масла с последующим определением спектров пропускания. Кроме того, для исследуемых проб жидкости определялись и спектры флуоресценции. Пример полученных при помощи микроколориметра зависимостей значений  $K_{oc}$  проб трансформаторного масла от длины волны используемого светофильтра приведен на рис. 2.

Результаты исследований предсказуемо показали, что наибольшим светопропусканием обладало исходное масло (производства 2013 г.), предназначенное для заливки в СТ.

$K_{oc}$  отработанного масла, слитого из действующего трансформатора вследствие его сильной деструкции, удалось измерить лишь на длинах волн 570 нм и 610 нм (причем в качестве эталона было использовано исходное ТМ, в отличие от остальных измерений, в которых с этой целью применялся более «чистый» фенилкселилэтан - ФКЭ). Длительная выдержка отработанного ТМ способствовала существенному росту его светопропускания: на длине волны 425 нм, наиболее чувствительной к присутствию продуктов старения,  $K_{oc}$  указанной пробы относительно ФКЭ изначально составил 10 %, а после дополнительного «отстаивания» - увеличился в среднем на 20 % (из-за

постепенного оседания твердых частиц и их агломератов). Дополнительно было подтверждено мнение о негативном влиянии на состояние масла длительного хранения и нарушения его технологии. Схожие данные были получены и при помощи определения спектральных зависимостей масла. Однако на наш взгляд использование микроколориметра предпочтительно, так как при данном типе оборудования пропускание определяется в более широком спектральном диапазоне. В целом рассмотренные оптические методы позволяют констатировать отсутствие или наличие механических примесей (шлама) в масле, но не пригодны для обнаружения последних в потоке электроизоляционной жидкости (например, при ее перекачке), а также - для непрерывного мониторинга шламообразования (в частности, в ТМ действующего оборудования), иными словами - не решается задача постоянного контроля состояния жидкого диэлектрика, необходимого для предотвращения оседания шлама на изоляции СТ и своевременной замены ТМ. Для получения достоверной информации о наличии, концентрации и размерах частиц, содержащихся в электроизоляционных маслах, а также - с целью расширения представлений о возможностях оптических методов диагностики, нами была разработана методика (описание которой приведено во второй главе) обнаружения указанных микрообъектов при помощи запатентованного нами волоконно-оптического осветителя. Эффективность работы осветителя для микроскопа на основе флуоресцирующего полимерного оптического волокна (в составе установки «Очиститель масла

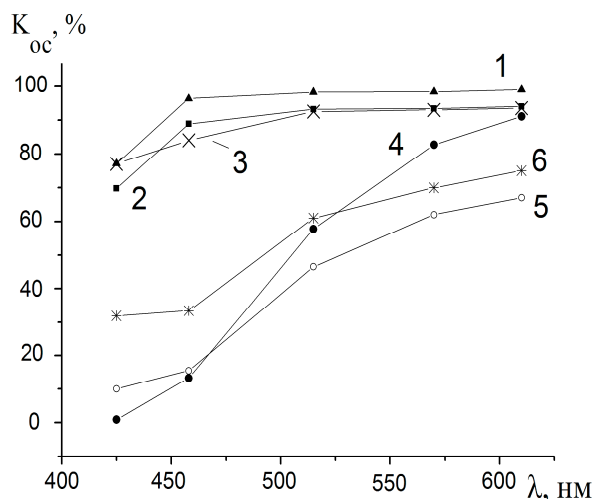


Рис. 2. Зависимости  $K_{oc}$  образцов ТМ от длины волны светофильтра:

1 – исходное (производства 2013 г.); 2 – исходное (после 7-ми лет хранения); 3 – исходное (при нарушении технологии хранения); 4 – регенерированное; 5 – отработанное (после длительной выдержки); 6 – отработанное (после длительной выдержки и дополнительного «отстаивания»)

электростатический ОМЭ01-02», предназначенной для очистки таких диэлектрических жидкостей, как, например, минеральные и некоторые синтетические масла), а также – разработанная методика обнаружения частиц были опробованы на турбинном масле в ЗАО «Турботект Санкт-Петербург». После проведения предварительных расчетов в качестве волоконно-оптического осветителя было выбрано волокно длиной 0,15 м с концентрацией красителя 25 мг/кг. Для получения изображений частиц использовались оптический микроскоп с различными микрообъективами и телевизионная камера, сопряженная с персональным компьютером через устройство видеозахвата изображений. Примеры полученных при помощи волоконно-оптического осветителя изображений микроскопических частиц в потоке турбинного масла ТП-22С (скорость движения которых составляла 0,5 и 1 м/с) приведены на рис. 3 а) и 3 б). Для сравнения на рис. 3 в) представлено изображение движущихся частиц, полученное при освещении масла когерентным светом.

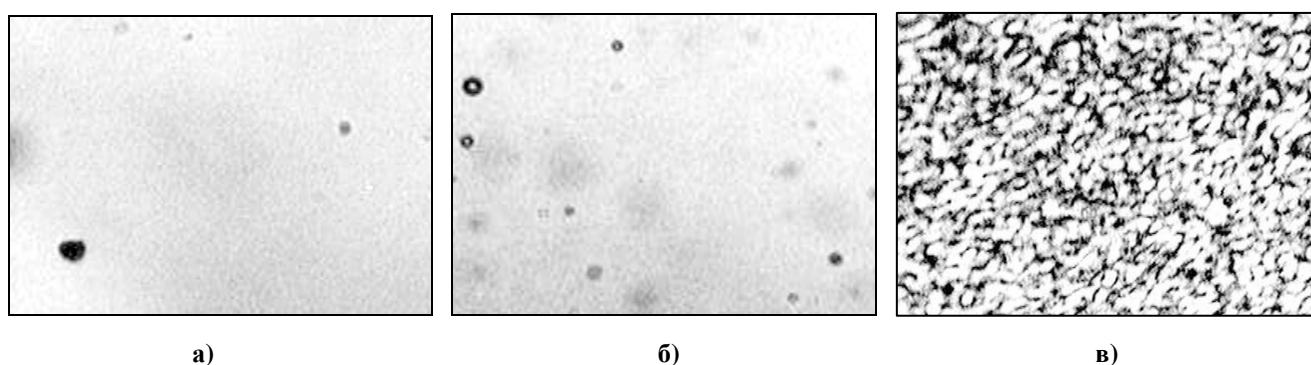


Рис. 3. Изображения движущихся частиц в потоке турбинного масла, полученные: а), б) - с использованием волоконно-оптического осветителя; в) - при освещении когерентным светом

Видно, что в последнем случае затруднено не только определение размеров частиц, но и выявление их изображений (на фоне «пятнистой» картины), тогда как на рис. 3 а) и 3 б) частицы хорошо различимы. При помощи разработанной нами методики были определены концентрация и размеры движущихся механических частиц в турбинном масле, а также – проанализировано изменение их концентрации при перегонке масла через маслоочистительную систему с течением времени (рис. 4), тем самым была доказана эффективность работы последней, что подтверждено актом внедрения ЗАО «Турботект Санкт-Петербург».

Применение разработанной нами методики обнаружения движущихся частиц и оптического устройства на ее основе, на наш взгляд, может способствовать и совершенствованию методов контроля состояния ТМ, в частности, с позиции шламообразования. Для проверки указанного

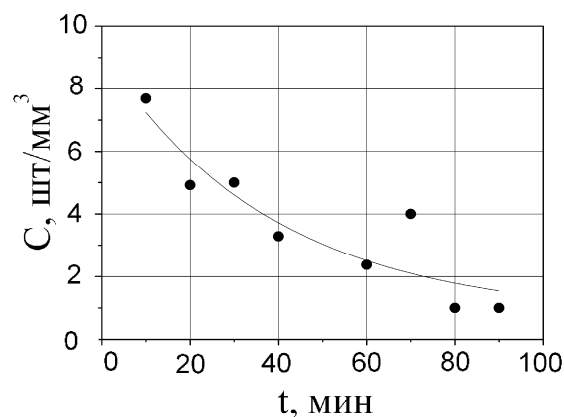


Рис. 4. Зависимость концентрации частиц в турбинном масле от времени очистки

предположения, а также – с целью расширения представлений о возможных путях создания системы непрерывного мониторинга трансформаторного масла были сделаны по 100 снимков каждой пробы различных образцов ТМ марки ГК и проведен анализ концентрации и размеров содержащихся в них частиц. Путем сопоставления изображений проб ТМ как при движении частиц, так и в статичном состоянии, было подтверждено предположение о том, что достоверную информацию о содержании и характере фрагментов шлама в электроизоляционной жидкости можно получить только при исследовании масла в динамическом режиме. Изучение (при помощи волоконно-оптического осветителя) проб ТМ, отобранных из баков действующих СТ и трансформаторных вводов, показало, что нет математически определенной взаимосвязи между такими параметрами, как концентрация частиц,  $K_{oc}$  и  $tg\delta$ . Кроме того, по сведениям специалистов, предоставивших пробы ТМ из действующих трансформаторных вводов, последние проработали одинаковое время, однако концентрация накопившихся в них частиц оказалась различной, что обусловлено особенностями конкретных эксплуатационных условий.

Для предварительного анализа отличительных особенностей частиц (что может быть использовано при выборе критериального параметра - критического с точки зрения возможного выпадения шлама в осадок) нами были получены и исследованы модельные образцы ТМ марки ГК, состаренные под действием электрических разрядов, а также - под действием повышенной температуры в присутствии меди (активного катализатора процесса деструкции). Оба образца отстаивались в стеклянных емкостях в течение 2-х недель при комнатной температуре. Далее был произведен отбор масла из верхней («верхняя» проба) и нижней («нижняя» проба) частей указанных емкостей.  $tg\delta_{90^{\circ}C}$  обеих проб («верхняя» и «нижняя») первого образца превысил 100%.  $tg\delta_{90^{\circ}C}$  «верхней» пробы второго образца составил 18 %, тогда как значение данного параметра для его «нижней» пробы было близко к 100%. Далее при помощи разработанной методики была проведена оценка распределения по величине и концентрации частиц шлама, содержащихся в рассматриваемых образцах ТМ. В «верхней» пробе образца ТМ, состаренного под действием электрических разрядов, была зафиксирована высокая концентрация ( $250\ 000$  частиц/ $cm^3$ ) мелкодисперсных частиц: максимальная плотность их распределения по размерам колебалась в пределах от 1 до 4 мкм. В то же время в «верхней» пробе образца ТМ, состаренного под действием повышенной температуры в присутствии меди, концентрация частиц оказалась в среднем в 23 раза ниже и составила  $11\ 000$  частиц/ $cm^3$ , максимальная плотность распределения частиц по размерам колебалась также в пределах от 1 до 4 мкм. По-видимому, в данном случае образовались продукты, основная часть которых выпала в осадок. Действительно, изучение «нижних» проб обоих образцов показало, что частицы, образовавшиеся в масле при термостарении, объединены в агломераты. В случае воздействия электрических разрядов агрегирования частиц

не наблюдалось: в ТМ зафиксированы более легкие фрагменты сажи, часть которых находилась во взвешенном состоянии в «верхней» части емкости, образуя проводящие мостики (что препятствовало измерению диэлектрических потерь масла). Таким образом, при помощи запатентованной методики даже в тех маслах, у которых диэлектрические потери превышают 100 %, можно оценить концентрацию и особенности содержащихся в электроизоляционной жидкости частиц шлама, тогда как анализ указанных проб ТМ на основе использования только традиционных методов испытания мог бы привести к ошибочным заключениям.

Возможный качественный состав шлама трансформаторного масла хорошо известен. В частности, в жидком диэлектрике могут накапливаться частицы сажи, влага, фрагменты целлюлозных волокон, металлические микрофрагменты. Для проверки возможности выявления и идентификации указанных частиц в пробу исходного ТМ были введены мелкодисперсные волокна электроизоляционной целлюлозы (рис. 5 а). На рис. 5 б) представлен кадр ТМ, слитого из действующего СТ, частица на котором, на наш взгляд, может быть идентифицирована, как фрагмент целлюлозного волокна. Аналогичным образом идентифицированы частицы сажи (рис. 6), а также - водяная «пыль» (рис. 7) и металлические частицы (рис. 8).



а)

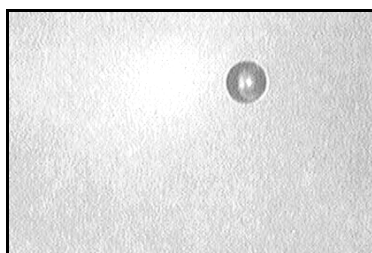
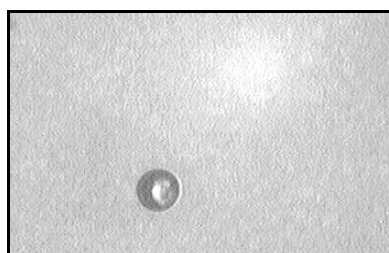


б)

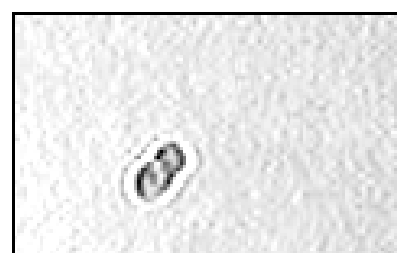
**Рис. 5. Волокно целлюлозы: а) - в модельной пробе ТМ;  
б) - в пробе отработанного ТМ из действующего СТ**



**Рис. 6. Частицы сажи в ТМ**



**Рис. 7. Движение капли воды в ТМ**



**Рис. 8. Металлическая частица**

Рис. 5 позволяет надеяться, что при развитии исследований в данном направлении подобная фотоинформация может быть полезной и для оценки степени старения целлюлозного компонента бумажно-пропитанной изоляции. Из рис. 6 видно, что частицы сажи имеют неправильную форму с ворсистыми краями. Последовательно снятые кадры, приведенные на рис. 7, демонстрируют движение в ТМ капли воды, представляющей собой сферу. На рис. 8 представлена частица металла. Таким образом, продемонстрировано, что созданное оптическое устройство (волоконно-оптический осветитель) - практический инструмент, позволяющий

выявить наличие, форму, концентрацию, размеры движущихся частиц, а в ряде случаев и высказать обоснованное предположение об их природе.

### **Основные выводы и результаты работы:**

1. На основе анализа контролируемых (согласно нормативной документации) электрофизических, а также - оптических характеристик широкого спектра образцов ТМ было подтверждено, что данные параметры являются необходимыми, но не достаточными с точки зрения получения достоверной информации о наличии механических частиц и процессе шламообразования в жидком диэлектрике.

2. Изучение трансформаторного масла не стандартизированными оптическими методами позволяет предположить, что наиболее эффективным (с позиции обнаружения продуктов старения и инородных примесей) является определение коэффициента относительного светопропускания жидкости при помощи микроколориметра. Одновременно показано, что рассмотренные оптические методы позволяют дать заключение об отсутствии или наличии продуктов старения и механических примесей в ТМ, но не пригодны для обнаружения последних в потоке электроизоляционной жидкости, а также - для непрерывного мониторинга шламообразования в жидком диэлектрике действующего оборудования.

3. Впервые разработана методика, позволяющая получать качественные изображения движущихся микрочастиц в потоке электроизоляционных жидкостей, и на ее основе создано специальное устройство, что подтверждено патентом РФ № 122187 «Волоконно-оптический осветитель».

4. Разработан новый способ измерения коэффициента затухания излучения в полимерных оптических волокнах, активированных флуоресцирующими красителями (который можно классифицировать, как интегральный метод бокового освещения), обладающий меньшей чувствительностью к локальным дефектам, чем существующий метод бокового освещения. Проведено сравнение указанных методов и объяснены возможные отличия результатов измерений. При помощи разработанного интегрального метода бокового освещения были определены коэффициенты затухания излучения волокон с различной концентрацией флуоресцирующего красителя, что позволило произвести расчеты параметров волоконно-оптического осветителя для получения более качественного изображения движущихся микрочастиц.

5. Создан практический инструмент для определения наличия, концентрации, формы и размера механических примесей в электроизоляционных маслах, позволяющий в ряде случаев высказать обоснованное предположение об их природе, а также (в перспективе) осуществлять непрерывный мониторинг шламообразования в электроизоляционных жидкостях, в частности, действующих силовых трансформаторов.



**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Пат. №122187 Российская Федерация. Волоконно-оптический осветитель / Д.В. Кизеветтер, А.Ю. Савина, А.И. Бодров, Н.О. Стельмакова, П.Г. Габдуллин, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков, Н.В. Ильин, Н.В. Банкул; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Турботект Санкт-Петербург». - № 201211185/28; заявл. 15.03.2012; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32 (из списка публикаций ВАК).

2. Савина, А.Ю. Измерение затухания в полимерных оптических волокнах, активированных флуоресцирующим красителем / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – №2(146). – С. 119-124 (из списка публикаций ВАК).

3. Савина, А.Ю. Аппроксимация спектров флуоресценции родаминовых красителей / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – №3(153). – С. 71-74 (из списка публикаций ВАК).

4. Савина, А.Ю. Сравнительный анализ методов измерения затухания излучения во флуоресцирующих полимерных волокнах с использованием бокового освещения / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков // Оптика и спектроскопия. – 2013. – № 3. – Т. 115. – С. 452-456 (из списка публикаций ВАК).

5. Савина, А.Ю. К вопросу о диагностике состояния трансформаторного масла в процессе эксплуатации / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, Н.М. Журавлева, А.В. Воробьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №3(178). – С. 118-125 (из списка публикаций ВАК).

6. Савина, А.Ю. Передаточные характеристики полимерных оптических волокон с красителем / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков // Лазеры. Измерения. Информация: сборник трудов конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 69-70.

7. Савина, А.Ю. Спектральные характеристики полимерных волокон, активированных родамином / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 61-62.

8. Савина, А.Ю. Измерение затухания в полимерных оптических волокнах с флуоресцирующими красителями / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио (выпуск LXVII). – М. – 2012. – С. 189-191.

9. Савина, А.Ю. Спектральные характеристики полимерных оптических волокон, активированных родамином / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков //

Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Всероссийской научно-методической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – Т.1. – С. 33.

10. Савина, А.Ю. Изготовление флуоресцирующих полимерных волокон и измерение их оптических характеристик / А.Ю. Савина, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков, Д.В. Кизеветтер // Лазеры. Измерения. Информация: сборник трудов конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 76.

11. Савина, А.Ю. Температурная зависимость спектров флуоресценции оптических волокон, активированных родамином / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, Г.Г. Баскаков, В.М. Левин // Лазеры. Измерения. Информация: сборник трудов конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 82-83.

12. Савина, А.Ю. Методы измерения затухания излучения в флуоресцирующих волоконных световодах / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер // «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты»: труды Международной конференции. – Алушта, 2012. – С. 27 – 28.

13. Савина, А.Ю. Осветитель для микроскопа на основе флуоресцирующего полимерного оптического волокна / А. Ю. Савина // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 62.

14. Савина, А.Ю. Исследование оптических свойств технических масел / А.Ю. Савина, Н.М. Журавлева, А.В. Воробьев, Д.В. Кизеветтер // Лазеры. Измерения. Информация: сборник трудов Международной научной конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 108.

15. Савина, А.Ю. Исследование флуоресценции электроизоляционных масел / А.Ю. Савина // Лазеры. Измерения. Информация: сборник трудов Международной научной конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 110.

16. Savina, A.Y. Dye-doped polymer optical fiber pulse illuminator for microscopes / A.Y. Savina, D.V. Kiesewetter, P.G. Gabdullin, A.I. Bodrov, N.O. Stelmakova, V.M. Levin, G.G. Baskakov // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL' 2013), Sudak, Ukraine, 2013. – P. 41-42.

17. Савина, А.Ю. Исследование качества электроизоляционных масел оптическими методами / А.Ю. Савина, Д.В. Кизеветтер, Н.М. Журавлева, А.В. Воробьев // Лазеры. Измерения. Информация. 2013: сборник докладов 23-й Международной конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – Т.1. – С. 274-282.