

На правах рукописи



Лютикова Марина Николаевна

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ**

05.14.12 – Техника высоких напряжений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск - 2022

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

Научный консультант: **Коробейников Сергей Миронович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, заведующий кафедрой
Безопасности труда

Официальные оппоненты: **Ушаков Василий Яковлевич**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
отделение электроэнергетики и электротехники, профессор
Дарьян Леонид Альбертович,
доктор технических наук,
Акционерное общество «Техническая инспекция Единой Энергетической Системы», директор по научно-техническому сопровождению
Кандалинцева Наталья Валерьевна,
доктор химических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный педагогический университет», институт естественных и социально-экономических наук, директор, профессор кафедры химии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Защита состоится «__» _____ 2022 года в ____ на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru. Текст автореферата размещен на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по адресу: <http://vak.ed.gov.ru>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.173.01.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

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

Анатолий Анатольевич Осинцев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Надежная работа высоковольтного маслонаполненного оборудования напрямую зависит от состояния изоляции. Одним из основных звеньев изоляционной системы является трансформаторное масло, применяемое уже более 120 лет. Постоянно растущий спрос на электроэнергию требует от генерации, магистральных и распределительных сетей увеличения производства и передачи. Следовательно, растет нагрузка на изоляционную систему высоковольтных трансформаторов, что приводит к увеличению скорости старения изоляции и сокращению срока ее службы. Поэтому, в первую очередь, существует потребность в совершенствовании свойств изоляционных материалов. Улучшение изоляционных свойств на практике можно осуществить путем модификации структуры целлюлозной изоляции и/или совершенствования эксплуатационных свойств жидкого диэлектрика. Слабые стороны минерального масла (относительно невысокая химическая стабильность, низкие температура вспышки, температура воспламенения и биоразлагаемость) предлагается усилить путем введения специальных присадок (ингибиторы окисления, деактиваторы, пассиваторы, депрессорные присадки, наночастицы и т.д.). Кроме того, в настоящее время смешивание трансформаторных масел с биоразлагаемыми сложными эфирами в различных соотношениях рассматривают как один из способов улучшения изоляционной системы высоковольтного оборудования.

В магистральных электрических сетях России большое количество трансформаторов эксплуатируется с минеральным маслом ГК ($\approx 49\%$) и ТКп ($\approx 22\%$). В процессе старения масла ГК характерно образование воскообразных отложений, которые зачастую обнаруживаются на бумажно-масляной изоляции высоковольтного оборудования (высоковольтные вводы и трансформаторы). Существует предположение, что отложения X-воска являются очагами локальных перегревов и развития пробоя, которые способствует выходу маслонаполненного высоковольтного оборудования из строя. Поэтому с целью обеспечения надежной работы высоковольтного трансформатора существует потребность в разработке способов замедления деструкции парафинового масла ГК, и, как следствие, увеличение эффективности использования данного масла в электрооборудовании.

Масло ТКп содержит порядка 18-21 % ароматических соединений. Проблема трансформаторного масла с высоким содержанием ароматических углеводородов (далее – УВ) состоит в том, что оно подвержено осадкообразованию. Образующиеся осадки в масле постепенно закупоривают охлаждающие каналы и ухудшают отвод тепла от обмоток трансформатора. Кроме того, с 1990 года производство данного ароматического масла прекращено по экологическим соображениям. Это создает еще одну проблему – дефицит для доливки в оборудование. Смешивание данного масла с другими типами масла (парафиновое и/или нефтяное) со временем приводит к образованию коллоидной неустойчивой системы. Поэтому смешивание данного масла, содержащего много аренов и сероорганических соединений, с биоразлагаемыми

синтетическими эфирами следует рассматривать как возможность решения двух проблем – улучшение электроизоляционных свойств и восполнение дефицита при доливке во время проведения ремонтов трансформаторов.

Несомненно, применение эфиромасляных смесей в электротехническом оборудовании требует тщательной проработки многих вопросов: оптимальная пропорция масла и эфира; поведение эфиромасляных смесей во время продолжительного старения в различных условиях; влияние низких отрицательных температур на их электроизоляционные свойства; установление маркеров старения изоляционных смесей, и соответственно, методик их обнаружения, а также способов интерпретации результатов и др. Все вышесказанное и определяет **актуальность исследований**, выполненных диссертантом.

Степень разработанности темы. За 130 - летнюю практику применения минерального масла в высоковольтном оборудовании получено и накоплено много полезной информации. Так, ценные результаты в области фундаментальных исследований (электрического пробоя жидких диэлектриков, возникновение стримеров в пузырьках, разряда в газожидкостных системах и др.) отражены в работах ведущих ученых: В.Я. Ушакова, С.М. Коробейникова, А.Л. Куперштоха, Г.А. Найдиса, Н.Ю. Бабаевой, М.Х. Гаджиева и др. В настоящее время для контроля качества масла применяются различные методики, разработанные ведущими коллективами (ВНИИЭ, ВЭИ, ОРГРЭС и др.), а также ключевыми специалистами (Р.А. Липштейн, Г.С. Кучинский, М.В. Шуварин, Н.И. Калачева, А.Е. Монастырский, В.В. Бузаев, Л.А. Дарьян, И.В. Давиденко, В.Н. Козлов, М.Ш. Гарифуллин, M. Duval, I. Hoehlein, E. Dornenburg, R. Rogers и др.).

Производство и оценка перспективности использования синтетических эфиров в высоковольтном оборудовании начались в 1970-х, а натуральных сложных эфиров на основе растительных масел - в 1990-х годов. К настоящему времени известны некоторые данные о свойствах этих биожидкостей, в том числе растительных маслах. Основные результаты отражены в работах зарубежных и отечественных специалистов: А. Hussain, Н. Borsi, Р. Rozga, С. Perrier, Т. Oommen, М. Martins, L. Loïselle, М.А. Аникеева, М.Ш. Гарифуллин и др.

Исследование смесей масла и других жидкостей берет начало с 2000-го года. Основными специалистами в этой области являются I. Fofana и U. Mohan Rao (Канада), А. Beroual (Франция), Hamdi A. (Алжир), Dombek G. (Польша), Z. Nadolny (Польша), M. Zdanowski (Польша), V. Wasserberg и Н. Borsi (Германия). К сожалению, к настоящему времени полученных результатов явно недостаточно для их практического применения. К тому же, практически все исследования посвящены смесям минерального масла с преимущественным содержанием нефтяных углеводородов. Между тем в России большое количество электротехнического электрооборудования наполнено парафиновыми и ароматическими маслами. В научной и технической литературе существует информационный вакуум по данным о свойствах эфиромасляных смесей, состоящих из парафинового или ароматического масла и биоразлагаемого сложного эфира.

Цель диссертационной работы: повысить эффективность использования трансформаторных масел в высоковольтном маслонаполненном оборудовании, посредством ингибирования, смешивания их с синтетическим эфиром, а также путем расширенного контроля состояния жидкостей новыми новыми инструментальными методами испытаний.

В соответствии с указанной целью были сформулированы следующие **задачи:**

1. С использованием многолетней базы данных по эксплуатируемым высоковольтным трансформаторам определить информативность физико-химических параметров для оценки степени старения и эффективность прогнозирования остаточного ресурса жидкой изоляции высоковольтного оборудования на основе текущих показателей качества.

2. Провести расширенные испытания трансформаторного масла с применением высокоэффективного измерительного оборудования и методик, позволяющие понять глубину деструкции эксплуатационного масла из действующего высоковольтного оборудования.

3. Оценить эффективность способов улучшения электроизоляционных свойств трансформаторного масла путем ингибирования масла, а также смешения его со сложноэфирной диэлектрической жидкостью.

4. Изучить изменение электрофизических свойств эфиромасляных смесей после продолжительного воздействия высокой температуры и электрических разрядов.

5. Исследовать изменение электрической прочности изоляционных смесей масла и эфирной жидкости в процессе охлаждения (от плюс 60 °С до минус 20 °С) и нагревания (от минус 20 °С до плюс 60 °С).

Объекты исследования - нефтяное изоляционное масло, а также смеси на основе масла и синтетического сложного эфира в разных соотношениях.

Предмет исследования - изоляционные свойства нефтяного изоляционного масла, а также смесей масла с содержанием сложноэфирной жидкости от 5 % до 30 %, представляющих альтернативную (более экологически безопасную и огнестойкую) комбинацию диэлектрической и охлаждающей среды для маслонаполненного высоковольтного оборудования.

Научная новизна.

1. Выявлены механизмы влияния ингибиторов окисления на старение трансформаторного масла в условиях эксплуатации высоковольтных трансформаторов, а также в условиях лабораторного моделирования. Установлено, что:

- практически значимой является кинетическая модель «срок службы - ионол», позволяющая с высокой достоверностью определять степень износа изоляции и прогнозировать остаточный срок службы изоляции с зависимостью от вида высоковольтного оборудования, класса напряжения и марки масла,

- причина стабильности изоляционных свойств трансформаторных масел разных марок в процессе их длительной эксплуатации в маслонаполненных силовых и измерительных трансформаторах, заключается в том, что по мере

расходования ингибирующей присадки ионол образуются родственные ему соединения, проявляющие антиокислительные свойства и продолжающие выполнять функции ионола,

- при расходовании присадки ионол в окисляющемся масле из действующих высоковольтных трансформаторов, содержащим высокую концентрацию перекисей, наблюдается отклонение от закона Вант-Гоффа, а именно скорость расходования ингибитора окисления (ионола) увеличивается по экспоненциальной зависимости в диапазоне температур от минус 20 °С до плюс 140 °С. Значение температурного коэффициента скорости расходования присадки (коэффициент Вант-Гоффа) в температурном диапазоне от минус 20 °С до плюс 120 °С составляет менее 2, а выше 120 °С - более 2,

- антиокислительная присадка ионол эффективно защищает трансформаторное масло от дальнейшего окисления при положительных температурах - выше 20 °С. При низких температурах ионол не стабилизирует масло, содержащее большое количество перекисей и гидроперекисей, от дальнейшего окисления,

- положительное влияние ионола и второй присадки при совместном присутствии на усиление антиокислительных свойств изоляционного парафинового масла с высоким содержанием перекисных соединений.

2. Предложены эффективные технические решения по усилению эксплуатационных свойств трансформаторного масла, и, как следствие, улучшению электроизоляционных свойств и увеличению срока службы изоляционных материалов в высоковольтном оборудовании:

- впервые проведено комплексное измерение электрофизических параметров трансформаторного масла и эфиромасляных смесей в процессе продолжительного старения в разных условиях (герметичная и негерметичная система) с целью определения степени изменения электроизоляционных свойств жидкостей.

- установлено, что с увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов снижается на 20 % и более по сравнению с газообразованием в трансформаторном масле.

3. Впервые изучено влияние температуры на электрическую прочность увлажненных изоляционных смесей масла и синтетического эфира в процессе охлаждения в диапазоне от плюс 60 °С до минус 20 °С, а также в процессе нагревания от минус 20 °С до плюс 60 °С. Установлено, что критически низкое значение электрической прочности имеет место при переходе температуры через ноль во время нагревания диэлектрических жидкостей, что характерно при включении трансформатора под нагрузку в холодное время года после длительного простоя в условиях отрицательных температур.

Теоретическая и практическая значимость.

Решена крупная проблема снижения аварийности высоковольтного маслонаполненного электрооборудования путем улучшения эксплуатационных свойств трансформаторного масла, продления ресурса изоляции, а также наиболее

эффективного контроля состояния изоляции в процессе эксплуатации высоковольтных трансформаторов на основе индикации продуктов деструкции изоляционных материалов инструментальными методами. К наиболее важным для практического применения результатам можно отнести следующие:

- выяснено, что скорость изменения значений физико-химических показателей (тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, кислотное число, содержание присадки ионов), характеризующие старение жидкого диэлектрика, в условиях эксплуатации в высоковольтных силовых трансформаторах (СТ) с пленочной защитой в несколько раз ниже, чем в высоковольтных измерительных трансформаторах (ТТ) со «свободным дыханием», несмотря на более высокую среднегодовую температуру масла в СТ (40-50 °С) по сравнению с температурой масла из ТТ (минус 3 °С),

- на основе корреляционно-регрессионного анализа многолетних данных впервые получена кинетическая модель «срок службы - ионол», а также константы скоростей расходования ионола в реальных условиях эксплуатации в высоковольтных трансформаторах напряжением 110-500 кВ, заполненных маслом ТКп и ГК. При использовании аналитического способа, данная модель позволяет получить ценную информацию о степени износа жидкой изоляции в высоковольтных трансформаторах, а также спрогнозировать остаточный срок службы изоляции с высокой точностью,

- разработана новая методика определения ионола и продуктов его разложения (2,6-ди-*трет*-бутилфенол; 2,6-ди-*трет*-бутил-*p*-бензохинон) в эксплуатационном масле из высоковольтного оборудования, которая заключается в извлечении продуктов окисления масла экстрагентом с последующим анализом пробы на хромато-масс спектрометре,

- показано, что воскообразные отложения, образующиеся в результате продолжительного старения трансформаторного масла ТКп и ГК, ухудшают электроизоляционные свойства твердой изоляции высоковольтного оборудования (на 31-62 %),

- предложен способ усиления стабильности изоляционного парафинового масла, содержащее большое количество перекисей, путем одновременного ингибирования его двумя присадками. Обнаружено, что в этом случае проявляется эффект синергизма и индукционный период увеличивается почти в 4 раза по сравнению с периодом индукции масла, ингибированного только ионолом,

- предложено решение по улучшению стабильности склонного к осадкообразованию трансформаторного масла ТКп, путем смешивания его с синтетическим эфиром в определенном соотношении. А именно, при эксплуатации диэлектрической смеси в открытых условиях достаточной является пропорция смешивания ММ:СЭ равной 80 % : 20 % по объему. В герметичных условиях для предотвращения образования осадка масло должно содержать не менее 30 % эфира по объему,

- аналитическим способом на основе эмпирического уравнения Антуана получены значения предельного влагосодержания масла ТКп и его смесей с

разным содержанием сложноэфирной синтетической жидкости Midel 7131 (10 %, 20 и 30 %) в диапазоне температур от плюс 60 °С до минус 20 °С,

- показано, что в процессе нагревания увлажненного масла, а также масла с содержанием эфира меньше 10 % при переходе через ноль между электродами формируется сначала ледяной, а затем водяной мостик, снижающий электрическую прочность изоляции до критических значений. Напротив, образование мостиков из частиц льда или капелек воды не наблюдается при добавлении синтетического эфира к трансформаторному маслу в количестве более 20 % по объему.

Полученные научно-технические результаты расширяют базу знаний о старении диэлектрических жидкостей (минеральное нефтяное масло, сложноэфирная диэлектрическая жидкость, эфиромасляные смеси), уточняют теоретические и прикладные представления о методах контроля их состояния в процессе эксплуатации, создают основу для совершенствования инженерных решений в целях практического применения перспективных биожидкостей и эфиромасляных смесей в высоковольтном оборудовании.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования выполнены с привлечением комплекса современных методов анализа и измерительных приборов. В частности, для исследования свойств диэлектрических жидкостей и идентификации веществ, образующихся в процессе их старения, применялись: стандартные методы измерения физико-химических и электрофизических показателей качества масла, а также адаптированные к анализу эфиромасляных смесей; альтернативные методики анализа; усовершенствованный метод газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором для определения ингибиторов окисления масла (ионол и 2,6-ди-*трет*-бутилфенол) при их совместном присутствии; высокочувствительный гибридный метод, включающий в себя комбинацию двух методов - газовой хроматографии и масс-спектрометрии для определения продуктов старения масла и эфиромасляных смесей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Изменение физико-химических показателей (тангенс угла диэлектрических потерь, кислотное число, ионол) масла разных марок (ТКп и ГК) в процессе эксплуатации в высоковольтных силовых трансформаторах с пленочной защитой описывается уравнением линейной регрессии, а в высоковольтных измерительных трансформаторах со «свободным дыханием» описывается уравнением экспоненциальной регрессии. Кинетическая модель «срок службы ЭО - ионол» позволила получить ценную информацию о степени износа жидкой изоляции, а также спрогнозировать остаточный срок службы изоляции с наиболее высокой достоверностью.

2. В процессе старения трансформаторного масла ТКп в высоковольтных трансформаторах образуются продукты разложения ионола, обладающие антиокислительными свойствами и продолжающие выполнять функции ионола.

3. Старение эксплуатационного масла ГК с традиционной присадкой в присутствии другой присадки, обнаруженной при изучении масла ТКп из баков высоковольтных трансформаторов, замедляется, то есть проявляется эффект синергизма. Индукционный период увеличивается почти в 4 раза.

4. Добавление синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 к трансформаторному маслу ТКп в количестве 10-30 % способствует улучшению электрофизических показателей трансформаторного масла в условиях воздействия высоких температур, а также электрических разрядов.

5. Низкая электрическая прочность масла и эфиромасляных смесей в процессе охлаждения регистрируется в промежутке от плюс 10 °С до минус 10 °С. В случае нагревания электрическая прочность жидкостей имеет низкое значение в области температур от минус 10 °С до плюс 20 °С (для масла) и от минус 10 °С до плюс 10 °С (для смесей масла с эфиром 10-30 %).

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием средств измерения и испытательного оборудования с необходимым метрологическим обеспечением, их регулярной поверкой, аттестацией и калибровкой. Высокая достоверность исследований, также подтверждается удовлетворительной повторяемостью и воспроизводимостью результатов измерений.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений»: п. 2. «Разработка принципов выбора и конструирования изоляции электроустановок высокого напряжения»; п. 6. «Разработка методов и средств диагностики состояния изоляции электроустановок высокого напряжения»; п. 8. «Исследование экологических проблем использования высоких напряжений».

Личный вклад соискателя. Все результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка цели и задач научной работы осуществлена совместно с научным консультантом. Автором лично выбраны методы исследования, проведены эксперименты, проанализированы полученные данные, выполнены аналитические расчеты. Совместно с Вагиным Д.В. (доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета) проведено моделирование. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит идея и проведение экспериментов, анализ и обобщение результатов исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных и научно-технических конференциях: Пятнадцатой ежегодной конференции компании «DIMRUS» «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования», Пермь, 2018 г.; XVIII Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, 2018 г.; Научно-практической конференции «Масла в электроэнергетике: актуальные вопросы применения и контроля качества-2018», Москва, 2018 г.; XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual

problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018), Новосибирск, 2018 г.; V Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" = 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Сочи, 2019 г.; XI Международном симпозиуме по Электрогидродинамике = International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD 2019), Санкт-Петербург, 2019 г.; XII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (СПЭФЭГД 2019), Петергоф, 2019 г.; 48-ая сессия СИГРЭ 2020 (в электронном формате); 92-м заседании международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации», Казань, 2020 г.; 48-ая и 49-ая сессия СИГРЭ 2020 и 2022 (в электронном формате).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 30 работ, в том числе 10 статей в научных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ для докторских диссертаций по специальности 05.14.12, 8 статей - в ведущих научных журналах, входящие в международные базы цитирования SCOPUS и Web of Science, патент РФ на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 10 работ в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (388 наименований, включая публикации автора по теме исследования) и 4 приложений. Общий объем диссертации составляет 331 страницы, она содержит 99 рисунков и 62 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность руководителям ПАО «ФСК ЕЭС» за предоставленную возможность профессионального развития на протяжении многолетней работы в компании.

Особая признательность доктору технических наук Сергею Викторовичу Нехорошему за предоставление современной базы приборов научно-технической лаборатории ООО «НПЦ «БАВ СТ» в пользование автора, а также за неоценимую помощь при выполнении спектральных исследований изоляционных материалов.

Основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы и необходимость проведения исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту научные положения, достоверность и обоснованность результатов, приведены сведения об апробации и публикациях.

Первая глава посвящена истории развития жидких диэлектриков в системе энергетики, рассмотрены расширенные требования к свойствам изоляционных жидкостей. На основе зарубежных и отечественных публикаций проведен сравнительный анализ изоляционных свойств минерального масла,

альтернативных жидких диэлектриков (биоразлагаемые синтетические и натуральные сложные эфиры). Приведены преимущества и недостатки применяемых изоляционных жидкостей, а также способы улучшения их электрофизических и химических свойств, в том числе за счет смешения минеральных масел с альтернативными жидкими диэлектриками. Рассмотрены механизмы старения диэлектрических жидкостей под влиянием различных факторов, существующие на сегодняшний день методы и критерии оценки состояния жидких диэлектриков. Приведен анализ проблем, которые следует решить для успешного применения диэлектрических жидкостей (минеральные масла, сложноэфирные биожидкости, а также эфиромасляные смеси) в высоковольтном оборудовании.

Во второй главе представлены результаты исследования взаимосвязи физико-химических показателей качества масла ($U_{пр}$, W , $T_{всп}$, КПЧ, ТАН, КЧ, И) и сроком службы высоковольтных трансформаторов (силовые трансформаторы - СТ, трансформаторы тока - ТТ). Корреляционно-регрессионный анализ проведен по результатам испытаний 60 СТ напряжением 110-500 кВ (с пленочной защитой) и 187 ТТ со «свободным дыханием» напряжением 110-500 кВ. Массив данных: для СТ - с 1990 по 2021 гг.; для ТТ - с 2006-2021 гг. Средний «возраст» СТ с маслом ГК составляет 22 года, с маслом ТКп – 40 лет. Средний «возраст» ТТ с маслом ГК – 32 года, с маслом ТКп – 40 лет.

По рассчитанным значениям коэффициента корреляции (r_{xy}) существенная связь наблюдается для «ТАН - возраст ЭО» ($r_{xy} = 0,75 \div 0,89$), «КЧ - возраст ЭО» ($r_{xy} = 0,75 \div 0,89$), «И - возраст ЭО» ($r_{xy} = -0,91 \div -0,95$). Поэтому, данные корреляционные зависимости можно использовать для прогнозирования динамики состояния изоляционной системы высоковольтного маслонаполненного оборудования в процессе его эксплуатации.

На основе графически построенных корреляционных зависимостей «ТАН - возраст ЭО», «КЧ - возраст ЭО», «И - возраст ЭО» получены уравнения регрессии. Установлено, что изменение значений ТАН (тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С), КЧ (кислотное число), И (ионол) в масле из СТ в процессе эксплуатации описывается уравнением линейной регрессии 1. Следовательно, изоляционное масло в СТ стареет с постоянной скоростью. Значение ТАН, КЧ, И в масле из ТТ изменяется со временем эксплуатации по экспоненциальной зависимости (уравнение 2), то есть изоляционное масло стареет с неодинаковой скоростью в разные периоды эксплуатации ТТ, а именно в первые 20 лет старение изоляции идет медленно, после 20 лет – деструктивные процессы заметно ускоряются.

$$\PhiХП = b_{\PhiХП(СТ)} \cdot H + a_{\PhiХП(СТ)} \quad (1)$$

$$\PhiХП = a_{\PhiХП(ТТ)} \cdot EXP(b_{\PhiХП(ТТ)} \cdot H) \quad (2)$$

где $\PhiХП = ТАН, КЧ$ или $И$; H - возраст СТ или ТТ; a и b - эмпирические коэффициенты.

С использованием зависимостей «ФХП - возраст ЭО» получены кинетические модели и константы скорости старения трансформаторного масла ТКп и ГК в СТ и ТТ. На основании полученных данных можно произвести расчеты прогнозируемых значений показателей:

$$\Phi ХП_2 = \Phi ХП_1 \pm k_{\Phi ХП(СТ)} \cdot (H_2 - H_1) - \text{для СТ} \quad (3)$$

$$\ln \Phi ХП_2 = \ln \Phi ХП_1 \pm k_{\Phi ХП(ТТ)} \cdot (H_2 - H_1) - \text{для ТТ} \quad (4)$$

где $\Phi ХП_2$ – прогнозируемое значение ФХП в период эксплуатации трансформатора H_2 ; $\Phi ХП_1$ – фактически известное ФХП в период эксплуатации трансформатора H_1 ; $k_{\Phi ХП(СТ)}$ и $k_{\Phi ХП(ТТ)}$ – константа скорости изменения ФХП в процессе старения масла из Таблицы 1 (для СТ) и Таблицы 2 (для ТТ) соответственно. Знак «плюс» ставится в (3) и (4), при расчете прогнозируемого значения ТАН и КЧ, а знак «минус» - по И.

Ошибка расчета прогнозируемого значения ТАН составляет не более 12 %, КЧ – не более 17 %, И – не более 6 %.

Таблица 1 – Константы скоростей $k_{\Phi ХП(СТ)}$ старения трансформаторного масла в СТ напряжением 110-500 кВ

ЭО	Марка масла	Класс напряжения	$k_{ТАН}$ [% в год]	$k_{КЧ}$ [мгКОН/г в год]	$k_{И}$ [% масс. в год]
СТ	ТКп	110 кВ	0,0218	0,0004	0,0050
		220 кВ	0,0148	0,0004	0,0043
		500 кВ	0,0106	0,0002	0,0035
	ГК	220 кВ	0,0136	0,0005	0,0046
		500 кВ	0,0177	0,0002	0,0049

Примечание: константы скоростей старения масла установлены для СТ с пленочной защитой и среднегодовой температуры масла 50 °С, применяются в уравнении 3.

Таблица 2 – Константы скоростей $k_{\Phi ХП(ТТ)}$ старения трансформаторного масла в ТТ напряжением 110-500 кВ

ЭО	Марка масла	Класс напряжения	$k_{ТАН}$ [год ⁻¹]	$k_{КЧ}$ [год ⁻¹]	$k_{И}$ [год ⁻¹]
ТТ	ТКп	110 кВ	0,1078	0,0882	0,0491
		220 кВ	0,1282	0,0792	0,0435
	ГК	110 кВ	0,1133	0,0589	0,0652
		220 кВ	0,0984	0,0961	0,0713
		500 кВ	0,0970	0,0609	0,0750

Примечание: константы скоростей старения масла установлены для ТТ с ВОФ и среднегодовой температуры масла в ТТ минус 3 °С, применяется в уравнении 4.

Кинетические уравнения 3 и 4 являются также инструментом для определения остаточного ресурса изоляционного масла. Во всех кинетических моделях величина H – срок эксплуатации ЭО. Если принять в качестве критерия выработки ресурса масляной изоляции ПДЗ (Таблица 3), как значения $ТАН_2$, $КЧ_2$,

I_2 в выражениях (3 – для СТ и 4 – для ТТ), то можно получить время эксплуатации ЭО, оставшееся до достижения этого критического значения.

Таблица 3 – Предельно-допустимые значения ФХП эксплуатационного масла

ЭО	Класс напряжения	Марка масла	ФХ показатель		
			ТАН [%]	КЧ [мгКОН/г]	И [% масс.]
СТ и ТТ	110 кВ	Все	Не более 15	Не более 0,15	Не менее 0,1
	220 кВ		Не более 10		
	500 кВ		Не более 10		

*СТО 34.01-23.1-001-2017

Общее выражение для расчета остаточного ресурса изоляционного масла имеет вид:

$$\Delta H_{\PhiХП(СТ)} = \pm \frac{\PhiХП_2 - \PhiХП_1}{k_{\PhiХП(СТ)}} - \text{из СТ} \quad (5)$$

$$\Delta H_{\PhiХП(ТТ)} = \pm \frac{\ln \PhiХП_2 - \ln \PhiХП_1}{k_{\PhiХП(ТТ)}} - \text{из ТТ} \quad (6)$$

где $\PhiХП_2$ - критическое значение $ТАН$, $КЧ$ или $И$, а $\PhiХП_1$ - текущее значение $ТАН$, $КЧ$ или $И$; $k_{\PhiХП}$ - константа скорости изменения $ТАН$, $КЧ$ или $И$ (Таблица 1 - для масла из СТ и Таблицы 2 - для масла из ТТ). Знак «плюс» ставится при расчете остаточного ресурса масла по $ТАН$ и $КЧ$, а знак «минус» - по $И$.

Согласно результатам расчета по (3), остаточный ресурс изоляционного масла из СТ по $ТАН$ и $КЧ$ вне зависимости от марки масла и класса напряжения трансформатора составляет более 300 лет. В то время как по расходованию антиокислительной присадки ионол, остаточный ресурс масла ТКп в СТ всех классов напряжений варьируется от 23 до 34 лет, а масла ГК - от 36 до 39 лет. Таким образом, оценка остаточного ресурса масла в СТ по антиокислительной присадке является более реалистичной, поскольку остаточный срок службы по $ТАН$ и $КЧ$ в сотни лет, с практической точки зрения, маловероятен.

Особого внимания по содержанию антиокислительной присадки ионол заслуживает контроль качества масляной изоляции в ТТ. Концентрация ионола в масле ТКп и ГК из многих ТТ 110-500 кВ равно или ниже ПДЗ (менее 0,1 % масс). В ТТ напряжением 110-220 кВ с маслом ТКп доля таких ТТ равна 28 % (13 ед. из 47), а в ТТ 110-220 кВ с маслом ГК – 15 % (21 ед. из 140). Однако уже в среднем через 5 лет ожидается массовый износ жидкой изоляции по ионолу в ТТ всех классов напряжений и вне зависимости от марки масла. Об этом же указывает, рассчитанная по формуле 7, степень износа изоляции.

Общее уравнение для расчета $СИИ_{\PhiХП}$ имеет следующий вид:

$$СИИ_{\PhiХП} = \frac{H_{\PhiХП}}{\Delta H_{\PhiХП} + H_{\PhiХП}} \cdot 100\% \quad (7)$$

то есть $СИИ_{\PhiХП}$ – это отношение текущего «возраста ЭО» (H) на потенциально возможный срок службы ($\Delta H_{\PhiХП} + H_{\PhiХП}$ - остаточный срок + текущий возраст ЭО),

рассчитанного на основании соответствующих кинетических моделей старения (выражения 3 – для СТ; 4 – для ТТ).

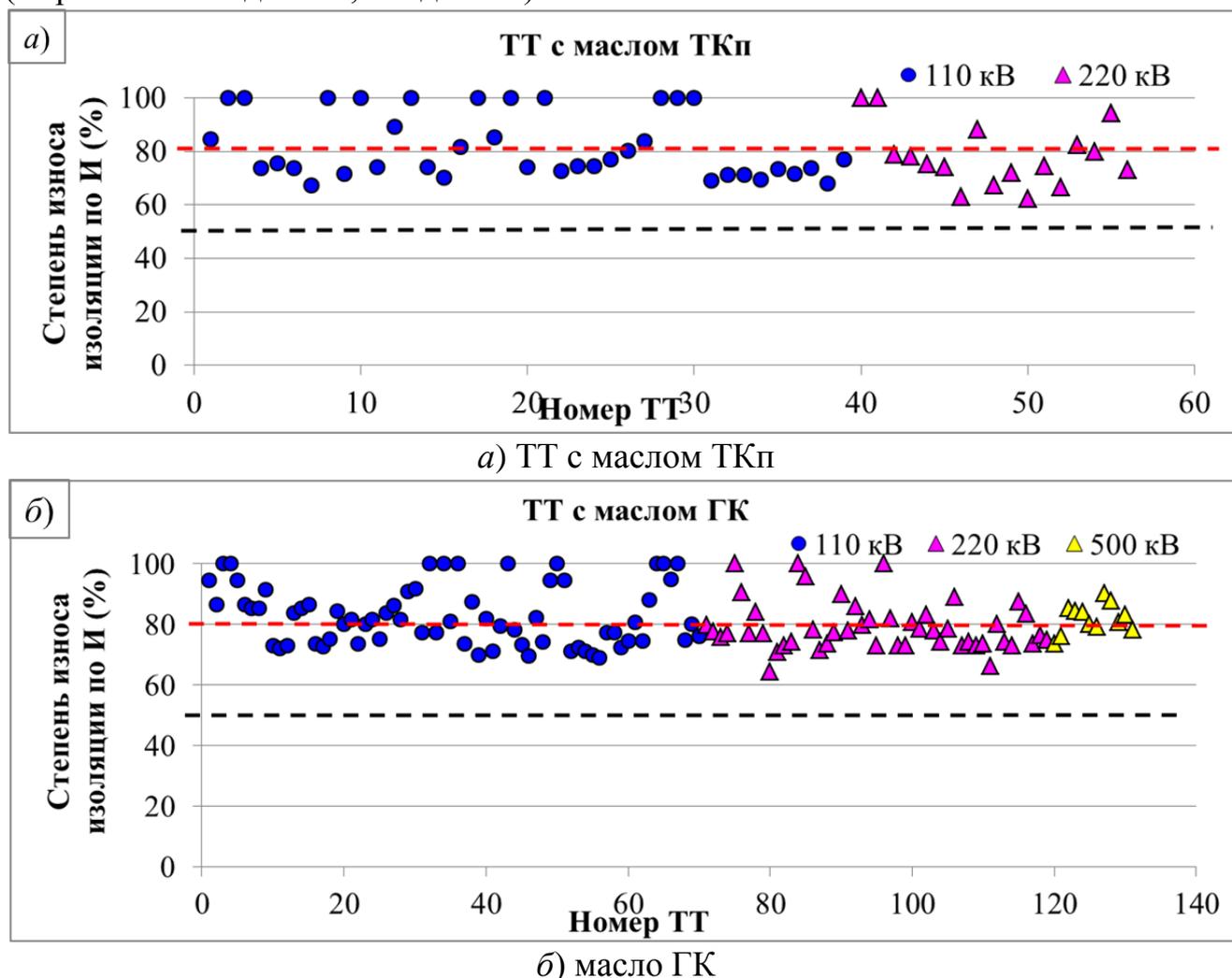


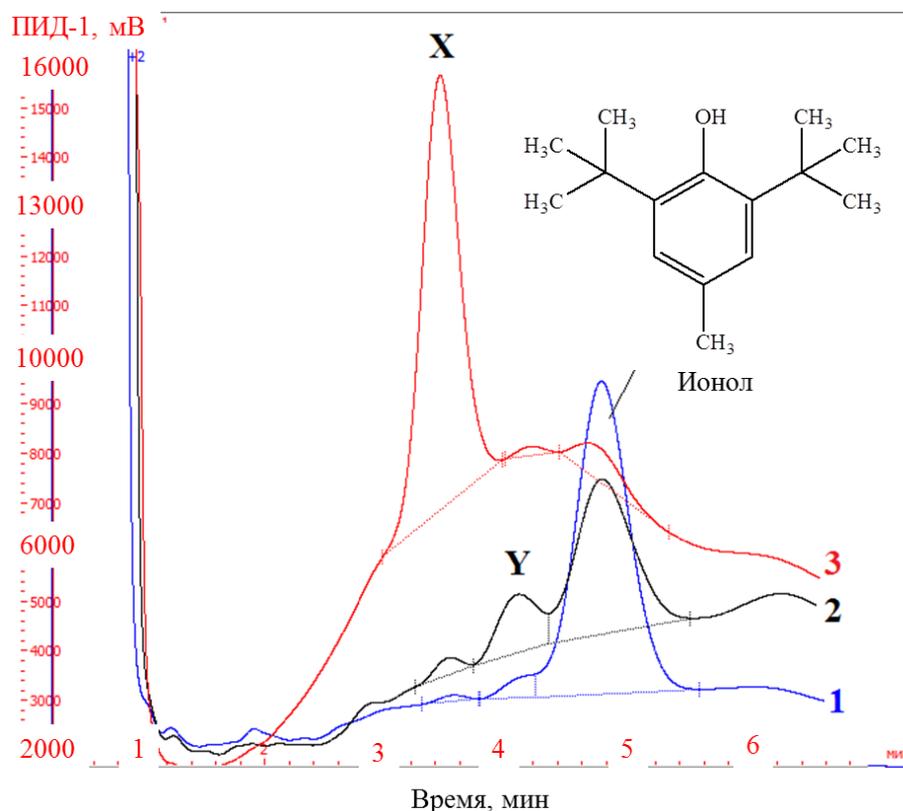
Рисунок 1 - Степень износа изоляционного масла в ТТ по ионулу

Согласно расчетам средняя степень износа изоляции по ионулу для СТ напряжением 110-500 кВ с маслом ТКп составляет 60 %, а для СТ 220-500 кВ с маслом ГК (35 %). *СИИ* по ионулу для большинства ТТ напряжением 110-500 кВ, вне зависимости от марки масла, равно 80-100 % (Рисунок 1). Однако, несмотря на высокий износ, состояние масла по другим *ФХП* оценивается как вполне удовлетворительное. Полученные нами данные противоречат известным выводам других авторов, а именно, при содержании ионула менее 0,1 % масс. должно протекать лавинообразное окисление масла с ухудшением его *ФХ* параметров, в том числе *ТАН* и *КЧ*.

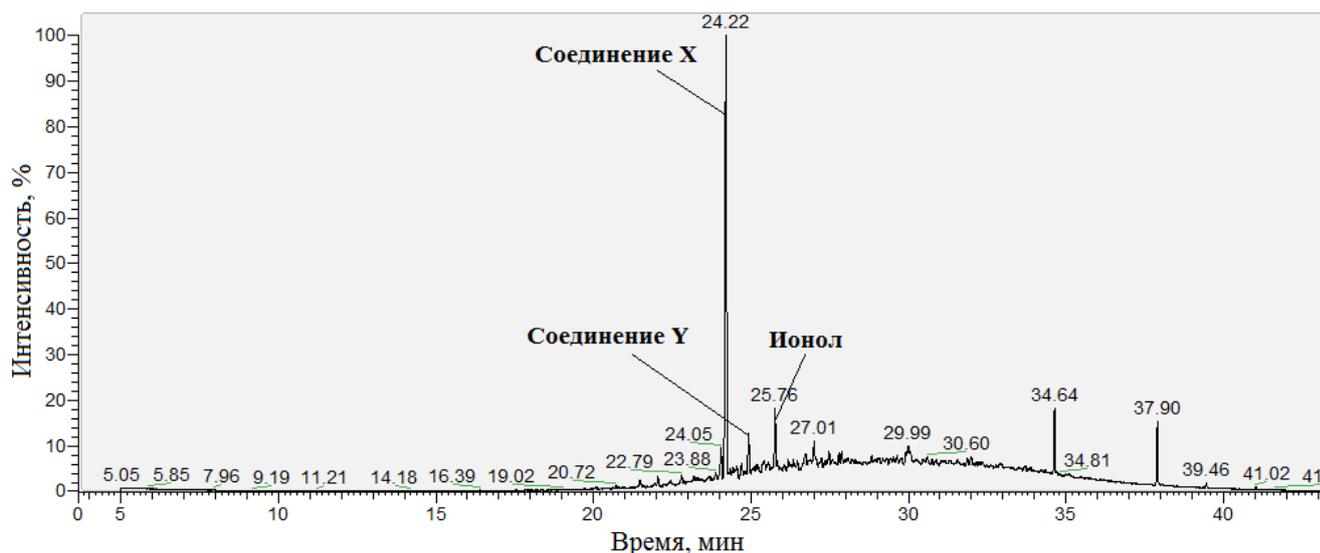
В третьей главе приведены результаты расширенного исследования продуктов старения минерального масла из баков СТ и ТТ с помощью нестандартных физико-химических и инструментальных методов.

Хроматографический анализ по стандартной методике (ГХ с ПИД) более 300 проб масла из высоковольтного маслonaполненного оборудования (СТ и ТТ), наряду с главным анализируемым веществом (ионул), показал наличие соединений неизвестного состава (Рисунок 2, а, пики X и Y). При этом

наблюдалась тенденция: с уменьшением концентрации ионола, содержание других соединений заметно увеличивалось. Такая тенденция в большей степени характерна для масла из ТТ. В качестве примера на рисунке 2, а приведена хроматограмма одного и того же масла, взятого из ТТ-17 в разные периоды его работы, а именно - 20 лет, 25 лет, 30 лет эксплуатации работы аппарата.



а) на газовом хроматографе «Хроматэк Кристалл 5000.2» с ПИД (стандартная методика)



б) на газовом хроматографе с МСД (авторская методика)
Рисунок 2 - Хроматограммы соединений в масле из ТТ-17

Идентифицировать неизвестные соединения (Рисунок 2, а, пики X и Y) методом газо-жидкостной хроматографией с ПИД весьма затруднительно. Поэтому пробы масла, в которых были обнаружены пики не только ионола, анализировались по специально разработанной нами методике. Методика заключается в извлечении продуктов окисления масла экстрагентом при соотношении растворитель к маслу – 1:1 (1 мл масла и 1 мл метанола) с последующим анализом пробы на хромато-масс спектрометре.

На рисунке 2, б представлена масс-хроматограмма масла из ТТ-17. С помощью библиотеки масс-спектров NIST 2017 идентифицировано три главных искомых компонента (Рисунок 3).

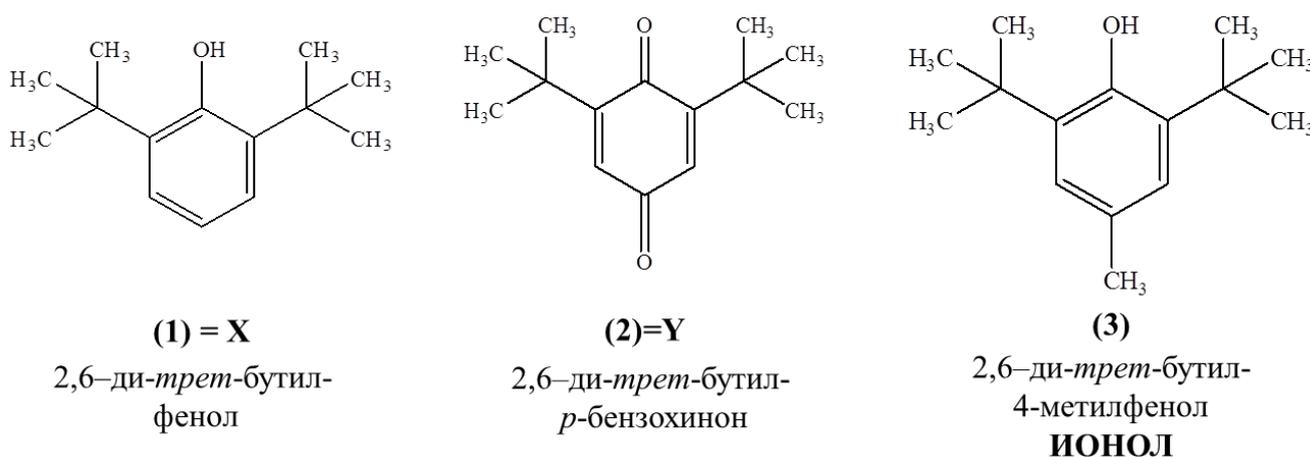


Рисунок 3 – Структуры идентифицированных соединений

Наличие соединений: 2,6-ди-*tert*-бутил-фенола, 2,6-ди-*tert*-бутил-*p*-бензохинон и ионола в старых окисленных маслах было подтверждено дополнительно методом добавок индивидуальных чистых веществ к части пробы масла. Концентрация соединения X в масле из ТТ 110-500 кВ варьируется в широких пределах - от 0,073 до 0,263 % масс для ТКп и от 0,028 до 0,093 % масс для ГК. Соединение Y содержится в количествах на несколько порядков ниже (ТКп - от 0,002 до 0,015 % масс; ГК - от 0,004 до 0,058 % масс). Идентифицированные соединения X и Y относятся к классу пространственно-затрудненных фенолов и обладают антиокислительными свойствами разной силы. Одновременное их присутствие пусть даже в небольшом количестве может быть явной причиной сдерживания лавинообразного процесса окисления масла.

Несмотря на наличие «естественных» ингибиторов окисления в пробах масла из ТТ было проведено измерение перекисного числа (ПЧ). Результаты анализа ПЧ масла графически изображены на рисунках 4 и 5.

Расчет значения коэффициента корреляции Пирсона показал, что между показателями ПЧ и И существует связь средней силы ($r_{xy} = -0,57$). Иными словами, чем меньше содержание присадки в масле из ТТ, тем выше значение ПЧ.

Существенная разница в накоплении перекисных соединений заметна для масла ГК (Рисунок 5) по сравнению с маслом ТКп (Рисунок 4) в ТТ всех классов напряжений. Так значение ПЧ эксплуатационного масла ГК варьируется от 8,33-13,95 ммоль (1/2O)/кг, а масла ТКп почти в 5 раз меньше – от 1,86 до 2,97 ммоль

(1/2O)/кг. В отличие от трансформаторов «со свободным дыханием» в трансформаторах с пленочной защитой значение *ПЧ* масла не превышает 0,3 ммоль активного кислорода (1/2O) на 1 кг масла.

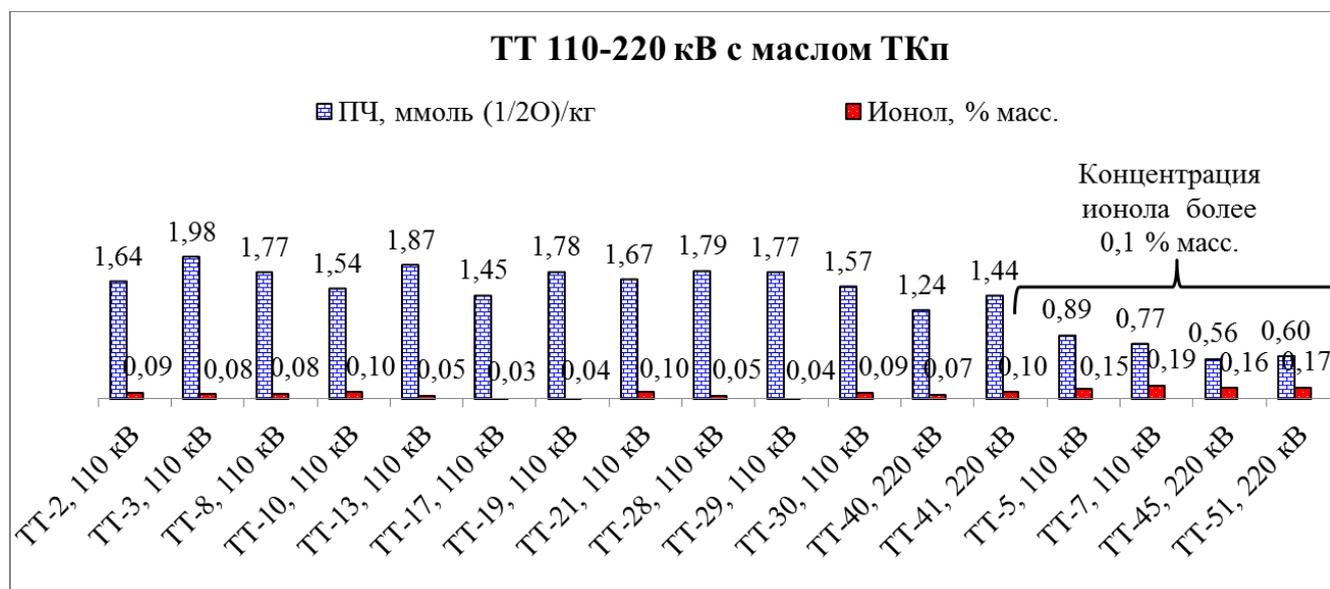


Рисунок 4 – Значения *ПЧ* в масле ТКп из ТТ 110-220 кВ

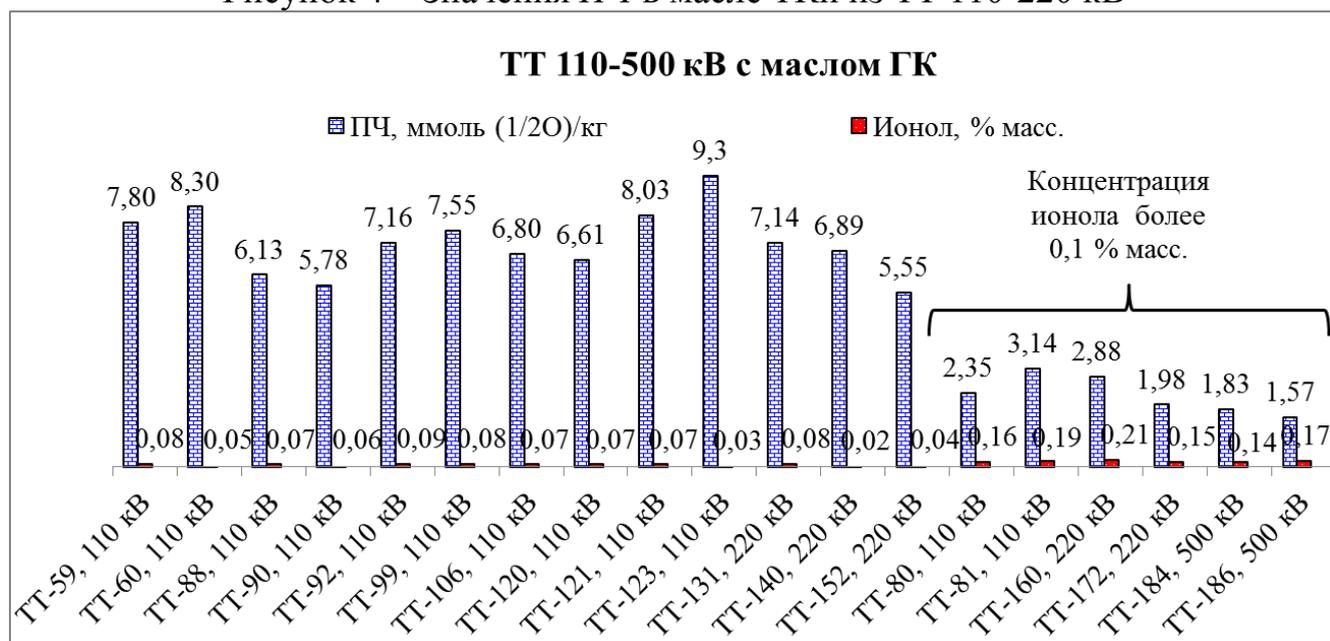


Рисунок 5 – Значения *ПЧ* в масле ГК из ТТ 110-500 кВ

Перекиси снижают сопротивляемость масла противостоять высокой напряженности электрического поля, о чем свидетельствует специально проведенный нами опыт. Так, в окисленном масле с высокой концентрацией воды (48,5 г/т) и перекисных соединений (более 8 ммоль активного кислорода (1/2O) на 1 кг масла) визуально наблюдается очень интенсивная и затяжная дуга в процессе проведения измерения пробивного напряжения (Рисунок 6, б). Электрический пробой масла произошел при 19 кВ. В то время как, в сухом масле ($W = 8,3$ г/т и *ПЧ* = 8,7 ммоль (1/2O)/кг масла) дуга между электродами по продолжительности и интенсивности существенно слабее, а пробивное напряжение масла – 61 кВ

(Рисунок 6, а). Увлажненное масло ($W=47$ г/т) само по себе имеет низкую электрическую прочность масла ($U_{np} = 28$ кВ), но в присутствии относительно небольшого количества перекисей ($ПЧ = 2,4$ ммоль (1/2O)/кг масла) интенсивность дуги между латунными электродами значительно меньше (Рисунок 6, в), чем в случае высокого содержания пероксидированных УВ (Рисунок 6, б). В целом, масло с относительно высоким значением $ПЧ$ и влагосодержанием имеет пробивное напряжение в 1,5 раза ниже, чем масло с высоким содержанием воды.

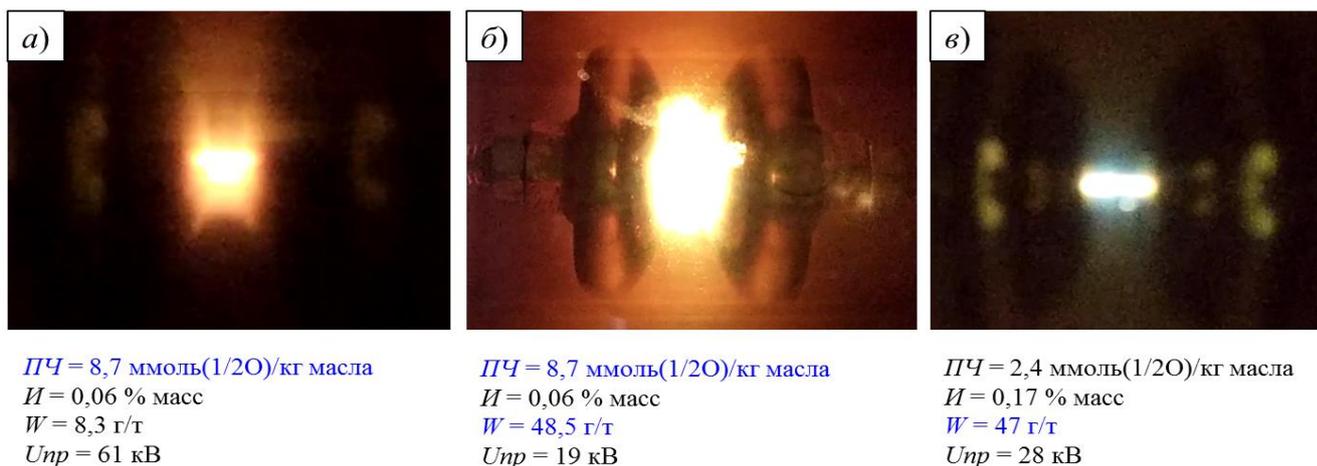


Рисунок 6 – Пробой трансформаторного масла ГК с разными значениями ФХ показателей

Высокое значение $ПЧ$ может также указывать на наличие продуктов полимеризации непредельных УВ масла, так называемые X-воска. Данные воскообразные отложения зачастую обнаруживаются на бумажно-масляном изоляционном остове маслонеполненных высоковольтных вводов. Так нами был проведен анализ воскообразных отложений, взятых при детальном разборе с различных частей высоковольтных вводов с бумажно-масляной изоляцией (БМИ). На рисунке 11 представлены иллюстрации таких отложений. Срок эксплуатации вводов более 30 лет.



Рисунок 7 - Внешний вид отложений на различных частях высоковольтных вводов с БМИ напряжением 110-220 кВ

Таблица 4 – Содержание перекисных соединений в воскообразных отложениях из высоковольтных маслонаполненных вводов напряжением 110-220 кВ

Показатель	Ввод 1, Т-750, 110 кВ	Ввод 2, Т-750, 110 кВ	Ввод 3, ГК, 110 кВ	Ввод 4, ГК, 110 кВ	Ввод 5, ТКп, 220 кВ	Ввод 6, ТКп, 110 кВ
ПЧ [ммоль (1/2 O)/кг]	15,5	11,2	33,8	25,5	11,8	8,9

По адаптированной методике в смывах воскообразных отложений определялось перекисное число. Результаты испытаний представлены в таблице 4. Наибольшее содержание перекисных соединений обнаружено в восковых отложениях из высоковольтных вводов 110-220 кВ, которые продолжительное время эксплуатировались с парафиновым маслом ГК.

С целью оценки влияния состава осадков на электрическую прочность бумажной изоляции был проведен эксперимент: образцы электрокартона марки ЭТМ-1,5 толщиной 1,5 мм с остаточным влагосодержанием 1,0-1,5 % пропитывались смывами воскообразных отложений. Электрическая прочность картона с влагой 1,0-1,5 %, пропитанного сухим трансформаторным маслом составила 28-30 кВ/мм. Картон, пропитанный смесью растворителей и увлажненный картон (с остаточным влагосодержанием от 5,2 до 5,9 %) имели практически одинаковые значения электрической прочности – (23-28) кВ/мм. Существенное снижение электрической прочности электрокартона происходит при его пропитке смывами, содержащими воскообразные отложения - на 31-62 % по сравнению с чистым картоном в сухом масле.

Таким образом, расширенный анализ с применением *ХМС* и адаптированных методов позволил выявить в масле из высоковольтных трансформаторов и вводов не только нейтральные фенольные соединения (продукты распада ионола), но и определить содержание перекисных соединений, негативно влияющих на изоляционные свойства масла и бумажной изоляции.

В четвертой главе предложены способы по улучшению химической стабильности парафинового и ароматического трансформаторного масла, как залог продления работоспособного состояния изоляционной системы любого высоковольтного оборудования. По результатам испытаний в главе 3 выяснено, что парафиновое масло из ТТ в наибольшей степени окислено и гораздо меньше содержит «естественные» ингибиторы окисления, чем масло ТКп. Поэтому требуется усилить стабильность масла ГК против окисления, для чего была проведена серия опытов.

Из действующих высоковольтных трансформаторов были взяты пробы парафинового масла с высоким значением *ПЧ*. Затем проведена оценка антиокислительной активности присадки ионол при разных температурах окисления. Окисление ингибированного масла (ионол 0,2 % масс) при низких температурах (от минус 20 °С до 0 °С) сопровождается ростом значения *ПЧ*. Последнее указывает на низкую эффективность работы антиокислительной присадки при отрицательных температурах. Согласно полученным данным, ионол активно работает лишь при положительных температурах - выше плюс 20 °С. В

этом случае значение $ПЧ$ в процессе термоокислительной деструкции масла либо остается на том же уровне, либо уменьшается (Рисунок 8), а скорость расхода ингибитора увеличивается.

Дальнейший опыт заключался в ингибировании масла с высоким $ПЧ$ сразу двумя присадками - ионол в концентрации 0,2 % масс. и 2,6-ди-*трет*-бутилфенол (соединение X) в количестве 0,2 % масс. После чего, пробы масла подвергались термоокислительному старению при 80 °С со свободным доступом воздуха. Об антиокислительной активности соединений судили по величине периода индукции окисления τ , величину которого определяли графическим способом как точку пересечения двух касательных к кинетической кривой « $ПЧ$ - Продолжительность окисления». Все измерения проводились в 3-4 кратной повторности, ниже представлены усредненные результаты, отклонения от которых не превышали 7 %.

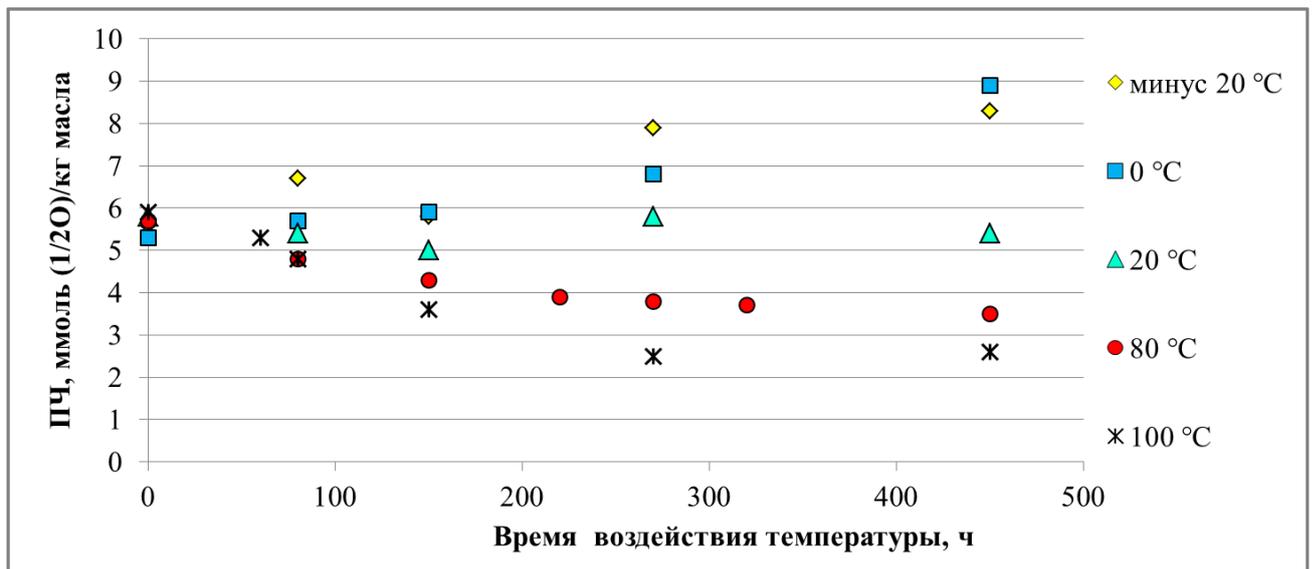


Рисунок 8 - Изменение $ПЧ$ в процессе продолжительного окисления масла ГК при разных температурах

Таблица 5 - Время индукционного периода окисления трансформаторного масла ГК (80 °С, доступ воздуха)

Ингибитор окисления (концентрация, % масс.)	Время индукции, ч	Средняя скорость расхода ионола, % масс/ч
Масло без ингибиторов	28	-
Масло + Ионол (0,2)	380	$18,3 \cdot 10^{-5}$
Масло + Ионол (0,4)	560	$9,6 \cdot 10^{-5}$
Масло + Ионол (0,2) + 2,6-ди- <i>трет</i> -бутилфенол (0,2)	1500	$2,3 \cdot 10^{-5}$

Согласно полученным данным, продолжительность периода индукции окисления парафинового масла ГК в присутствии ионола и соединения X увеличивается неаддитивно изменению их концентрации. Так, время индукции

окисления масла с присадкой ионол составило 380 ч, а для масла, ингибированного двумя антиокислителями (ионол 0,2 % масс и 2,6-ди-*трет*-бутилфенол 0,2 % масс), продолжительность индукции увеличилась до 1500 ч (Таблица 5). При этом средняя скорость расхода ионола в присутствии 2,6-ди-*трет*-бутилфенола снизилась на порядок.

В отличие от парафинового масла ГК, при окислении ароматического масла ТКп характерно повышенное образование продуктов уплотнения, поэтому здесь следует использовать другой подход. В настоящей работе проведены опыты по смешению масла ТКп с диэлектрической жидкостью Midel 7131, как один из способов улучшения изоляционных свойств масла, в том числе его химической стабильности. Основными компонентами синтетического эфира Midel 7131 являются сложные эфиры пентаэритрита и жирных кислот состава C₅-C₂₂.

Таблица 6 – Свойства эфиромасляных смесей

Показатель	ММ	ММ:СЭ 95%:5%	ММ:СЭ 90%:10%	ММ:СЭ 80%:20%	ММ:СЭ 70%:30%	СЭ
Плотность при 20 °С (кг/м ³)	875	879	885	893	905	971
Вязкость кинематическая (мм ² /с)						
при +50 °С	7,6	8,1	8,3	8,8	8,9	14,5
при +40 °С	10,9	11,1	11,3	11,6	12,1	28,9
при -30 °С	992	1025	1057	1123	1188	1445
Температура вспышки (°С)	144	146	154	161	169	260
Класс промышленной чистоты	8	8	8	7	7	5
Поверхностное натяжение на границе фаз масло-вода (мН/м)	43,1	41,1	38,2	29,6	25,6	21,3
Оптическая мутность (м ⁻¹)	22,8	20,8	19,7	16,6	14,5	0,4
Пробивное напряжение (кВ)	63	64	66	67	69	79
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С (%)	0,2	0,3	0,4	0,4	0,7	2,1
Относительная диэлектрическая постоянная	2,13	2,19	2,26	2,41	2,48	3,01
Влагосодержание (г/т)	8,0	9,6	12,3	17,8	20,8	48,2
Кислотное число (мг КОН на 1 г масла)	0,008	0,008	0,009	0,010	0,010	0,012
Содержание антиокислительной присадки (% масс.)	0,24	0,23	0,20	0,18	0,15	не обнаруж.
Стабильность против окисления:						
-общая кислотность (мг КОН на 1 г масла)	0,17	0,09	0,05	0,05	0,04	0,07
-содержание осадка (% массы)	0,11	0,05	0,01	0,002	0,001	<0,001
-тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С	4,50	4,24	2,99	4,65	5,11	14,17
Индукционный период (ч)	16	38	248	>500	>500	>500
Коррозионная сера	присут.	присут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.

Перед проведением испытаний пробы минерального масла ТКп были очищены от различных примесей. Синтетическая сложноэфирная жидкость Midel 7131 поставляется отвакуумированной, поэтому не требует дополнительной очистки от примесей (воды, воздуха). Смеси на основе минерального масла ТКп (далее - ММ) и синтетического эфира Midel 7131 (далее - СЭ) готовились при комнатной температуре с процентом содержания масла и эфира 5, 10, 20, 30 %. После добавления диэлектрической жидкости Midel 7131 к маслу ТКп смесь нагревали до 30-40 °С и хорошо перемешивали. Опыты при разных температурах показали, что хорошо перемешанные смеси не расслаиваются и остаются гомогенными в диапазоне температур от минус 40 °С до плюс 250 °С.

Испытания полученных эфиромасляных смесей на электрофизические и физико-химические показатели проводили в соответствии с требованиями нормативных документов, указанные в СТО 34.01-23.1-001-2017. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

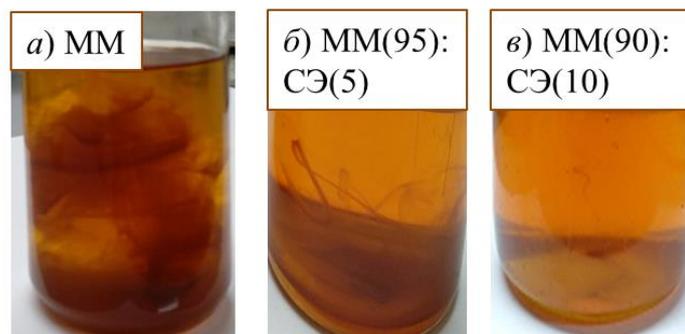
Из представленных результатов видно, что добавление синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 к трансформаторному маслу ТКп в количестве 10-30 % способствует улучшению физико-химических показателей трансформаторного масла (растворимость воды; пробивное напряжение; диэлектрическая проницаемость; температура вспышки; стабильность против окисления; индукционный период; оптическая мутность; класс промышленной чистоты; коррозионная активность). Добавление эфира к маслу в количестве менее 10 % не оказывает существенного положительного эффекта на улучшение показателей масла ТКп. В то же время смесь масла с долей синтетического эфира более 30 % обладает повышенной вязкостью, плотностью, диэлектрическими потерями и понижается поверхностное натяжение на границе вода-жидкость.



Рисунок 9 – Изменение характеристик минерального масла при добавлении синтетического сложного эфира

В пятой главе представлены результаты исследований по изменению эксплуатационных свойств смесей после их продолжительного старения (2000 ч) в негерметичных и герметичных условиях при температуре 100 °С, а также после воздействия разрядных процессов. Внешний вид масла и эфиромасляных смесей показан на рисунке 10. На иллюстрациях (Рисунок 10) заметно, что внешний вид жидкостей, состаренных при различных условиях сильно отличается. В случае термоокислительного старения масла, синтетического эфира и смесей на их основе после 2000 ч воздействия агрессивных факторов (нагревание с доступом воздуха) мелкокристаллический осадок образуется в минеральном масле, а также смесях ММ(95):СЭ(5) и ММ(90):СЭ(10) (Рисунок 10, а, б, в). Смесей масла с долей эфира 20 % и 30 % по мере старения темнеют, но образование осадка не наблюдается. Продолжительное термическое старение исследуемых жидкостей без доступа воздуха при температуре 100 °С (нагревание без доступа воздуха) приводит к формированию хлопьевидного осадка в пробах минерального масла, а также смесях ММ(95):СЭ(5) и ММ(90):СЭ(10) (Рисунок 5.3, а, б, в, г). В смеси масла с долей эфира 20 % образуются твердые мелкодисперсные включения (Рисунок 5.3, в). При добавлении эфира в количестве 30 % смесь ММ(70):СЭ(30) темнеет, без формирования осадка (Рисунок 5.2, в).

В открытых сосудах (термоокислительное старение)



В герметичных сосудах (термическое старение)

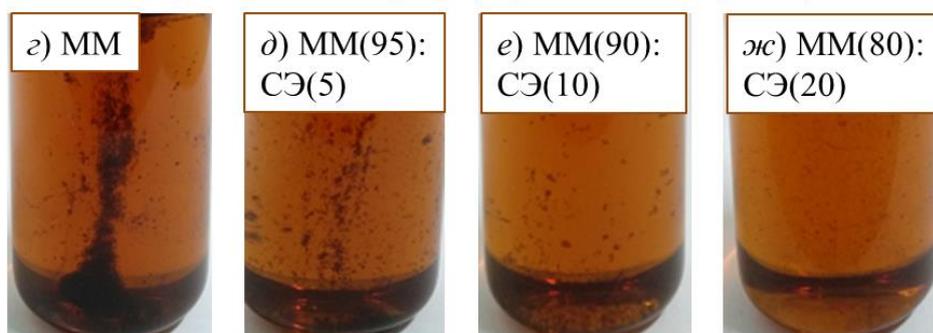


Рисунок 10 - Внешний вид масла и эфиромасляных смесей после продолжительного температурного воздействия

Таблица 7 - Изменения значений показателей качества диэлектрических жидкостей при продолжительном старении в разных условиях

Параметр	Условия старения	Изоляционная жидкость					
		ММ	ММ(95): СЭ(5)	ММ(90): СЭ(10)	ММ(80): СЭ(20)	ММ(70): СЭ(30)	СЭ
Оптическая мутность, m^{-1}	с доступом воздуха	$\frac{42}{135}$	$\frac{40}{124}$	$\frac{38}{111}$	$\frac{34}{84}$	$\frac{31}{64,0}$	$\frac{1}{9}$
	без доступа воздуха	$\frac{42}{478}$	$\frac{40}{389}$	$\frac{38}{205}$	$\frac{34}{113}$	$\frac{31}{78}$	$\frac{1}{4}$
Количество частиц размером 5-10 мкм в 100 мл жидкости	с доступом воздуха	$\frac{899}{44849}$	$\frac{756}{10789}$	$\frac{685}{9796}$	$\frac{546}{773}$	$\frac{430}{664}$	$\frac{365}{545}$
	без доступа воздуха	$\frac{899}{65789}$	$\frac{756}{14568}$	$\frac{685}{10796}$	$\frac{546}{7569}$	$\frac{430}{1992}$	$\frac{365}{569}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, %	с доступом воздуха	$\frac{0,2}{3,6}$	$\frac{0,3}{3,9}$	$\frac{0,4}{3,7}$	$\frac{0,4}{4,8}$	$\frac{0,7}{5,5}$	$\frac{2,1}{8,9}$
	без доступа воздуха	$\frac{0,2}{5,9}$	$\frac{0,3}{4,8}$	$\frac{0,4}{4,4}$	$\frac{0,4}{3,8}$	$\frac{0,7}{3,5}$	$\frac{2,1}{3,2}$
Эфирное число, мгКОН/г	с доступом воздуха	$\frac{2,2}{3,4}$	$\frac{16,7}{10,5}$	$\frac{38,5}{23,8}$	$\frac{62,4}{58,2}$	$\frac{95,3}{91,1}$	$\frac{293,5}{270}$
	без доступа воздуха	$\frac{2,2}{2,3}$	$\frac{16,7}{13,5}$	$\frac{38,5}{34,8}$	$\frac{62,4}{59,2}$	$\frac{95,3}{93,1}$	$\frac{293,5}{287,9}$
Поверхностное натяжение на границе «жидкость-вода», мН/м	с доступом воздуха	$\frac{43}{21}$	$\frac{39}{21}$	$\frac{25}{21}$	$\frac{26}{22}$	$\frac{26}{22}$	$\frac{21}{19}$
	без доступа воздуха	$\frac{43}{34}$	$\frac{39}{31}$	$\frac{25}{22}$	$\frac{26}{24}$	$\frac{26}{24}$	$\frac{21}{21}$
Содержание воды, г/г	с доступом воздуха	$\frac{8}{23}$	$\frac{10}{28}$	$\frac{12}{28}$	$\frac{18}{34}$	$\frac{21}{45}$	$\frac{37}{66}$
	без доступа воздуха	$\frac{8}{9}$	$\frac{10}{11}$	$\frac{12}{14}$	$\frac{18}{19}$	$\frac{21}{22}$	$\frac{37}{38}$
Пробивное напряжение, кВ	с доступом воздуха	$\frac{63}{17}$	$\frac{64}{13}$	$\frac{66}{38}$	$\frac{67}{49}$	$\frac{69}{54}$	$\frac{79}{70}$
	без доступа воздуха	$\frac{63}{45}$	$\frac{64}{56}$	$\frac{66}{61}$	$\frac{67}{63}$	$\frac{69}{66}$	$\frac{79}{77}$
Температура вспышки, °С	с доступом воздуха	$\frac{144}{144}$	$\frac{146}{145}$	$\frac{154}{155}$	$\frac{161}{162}$	$\frac{169}{169}$	$\frac{260}{260}$
	без доступа воздуха	$\frac{144}{144}$	$\frac{146}{146}$	$\frac{154}{154}$	$\frac{161}{162}$	$\frac{169}{170}$	$\frac{260}{260}$

Примечание: в числителе - значение показателя в абсолютной величине до старения; в знаменателе – значение показателя в абсолютной величине после 2000 ч старения.

В целом существенные ухудшения показателей качества происходят при продолжительном нагревании (вне зависимости от условий - с доступом воздуха или без доступа воздуха) минерального масла, а также смесей с содержанием синтетического эфира 5 % и 10 %. Сравнивая изменения показателей качества (MUT , $СЧ(5-10)$, $ТАН$, $ЭЧ$, $ПН$, W , U_{np}), жидкостей, измеренные при продолжительном воздействии высокой температуры в герметичных условиях и в открытых сосудах можно отметить, что старение смесей масла с долей эфира 20 % и 30 % протекает гораздо медленнее.

Воздействие электрических разрядов на изоляционные жидкости приводит к образованию следующих газов: водорода H_2 (Рисунок 11); суммы углеводородных газов (метан CH_4 , этан C_2H_6 , этилен C_2H_4 , ацетилен C_2H_2 , пропан C_3H_8 , пропилен C_3H_6 , метилацетилен C_3H_4 , бутан C_4H_{10} , бутен C_4H_8) (Рисунок 12); оксида углерода CO (Рисунок 13); диоксида углерода CO_2 (Рисунок 14).

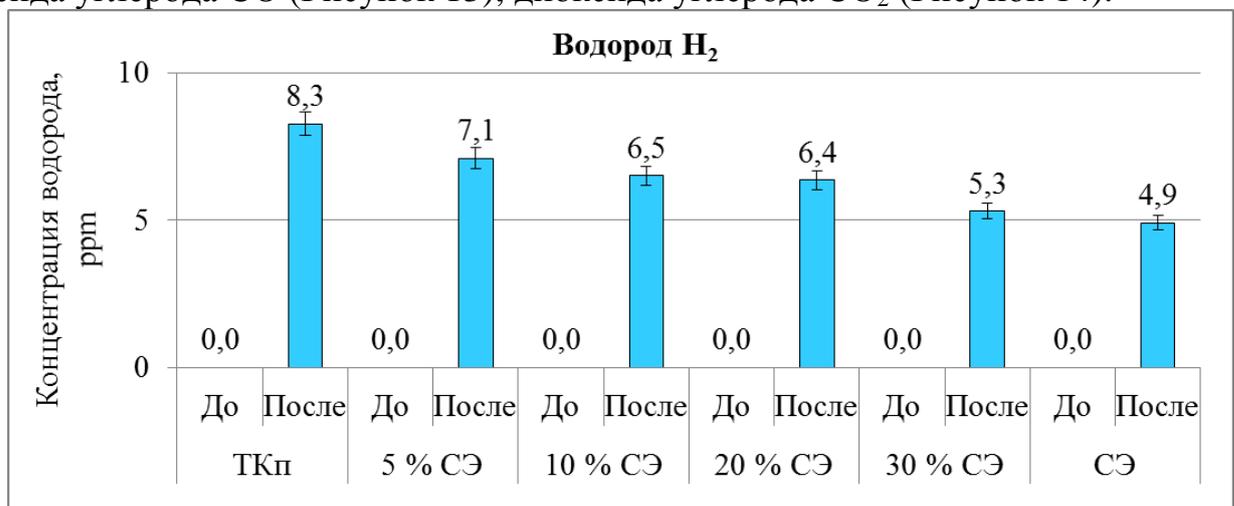


Рисунок 11 - Образование водорода (H_2) в жидкостях после разрядных процессов

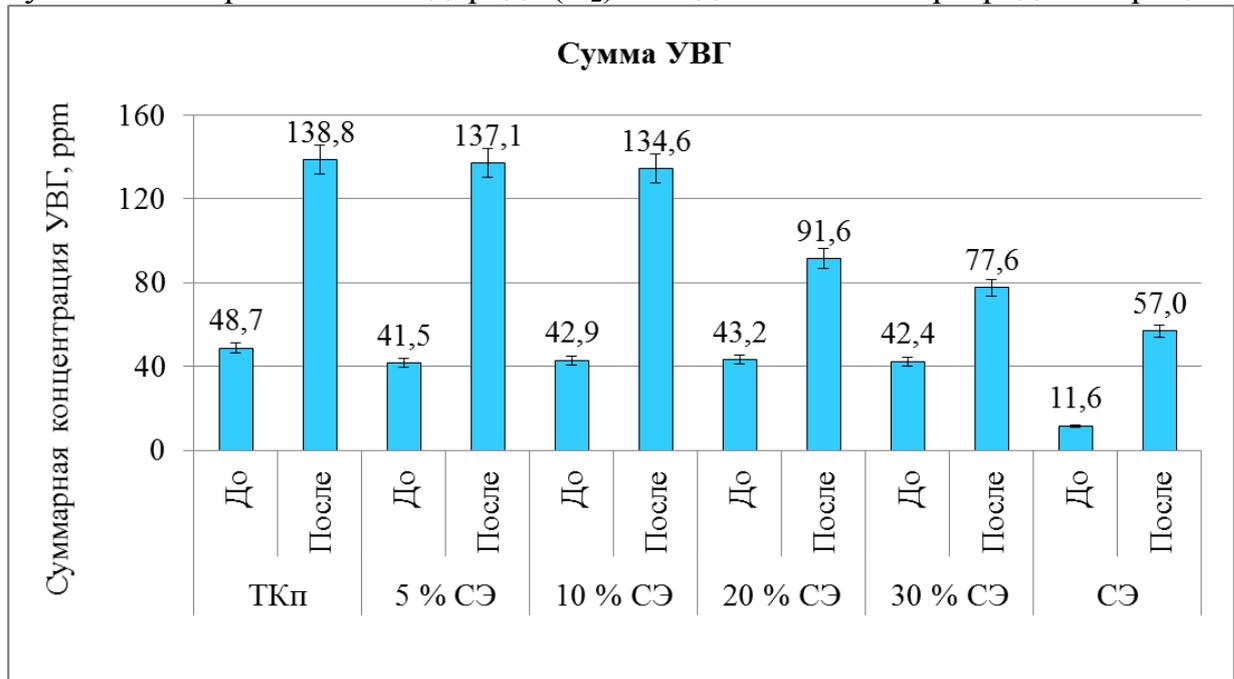


Рисунок 12 - Образование углеводородных газов (УВГ) в жидкостях после разрядных процессов

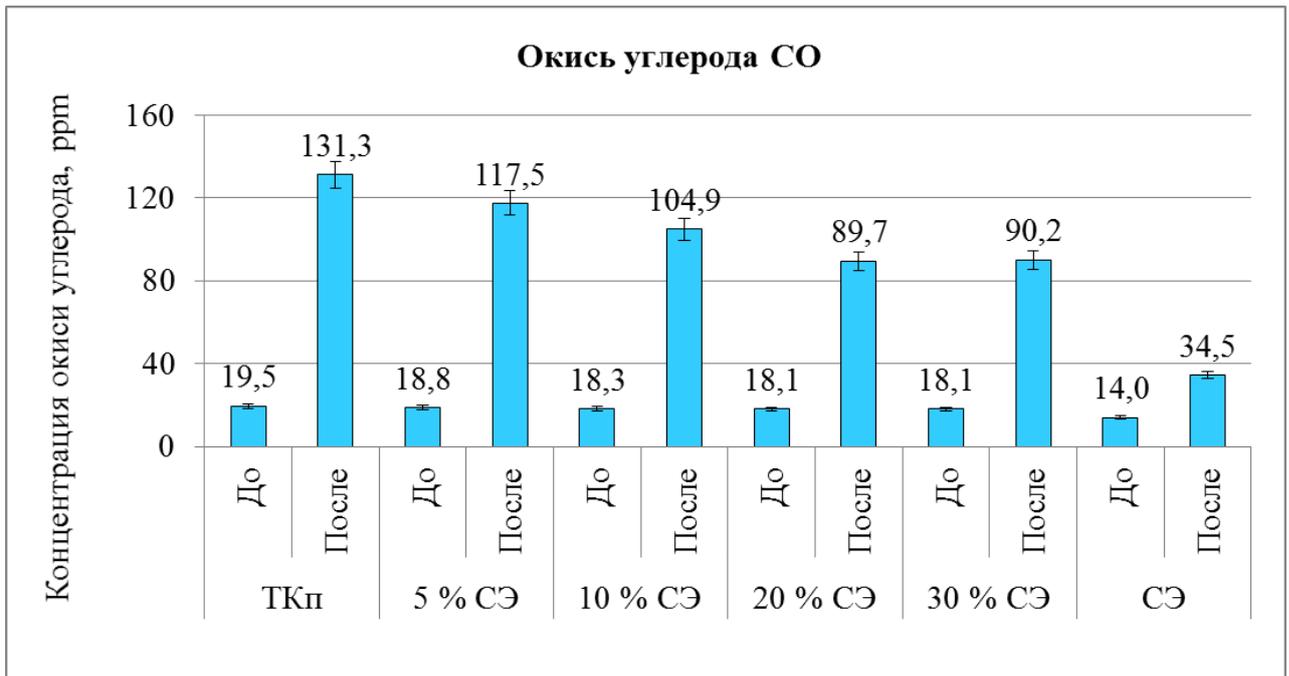


Рисунок 13 - Образование оксида углерода (CO) в жидкостях после разрядных процессов

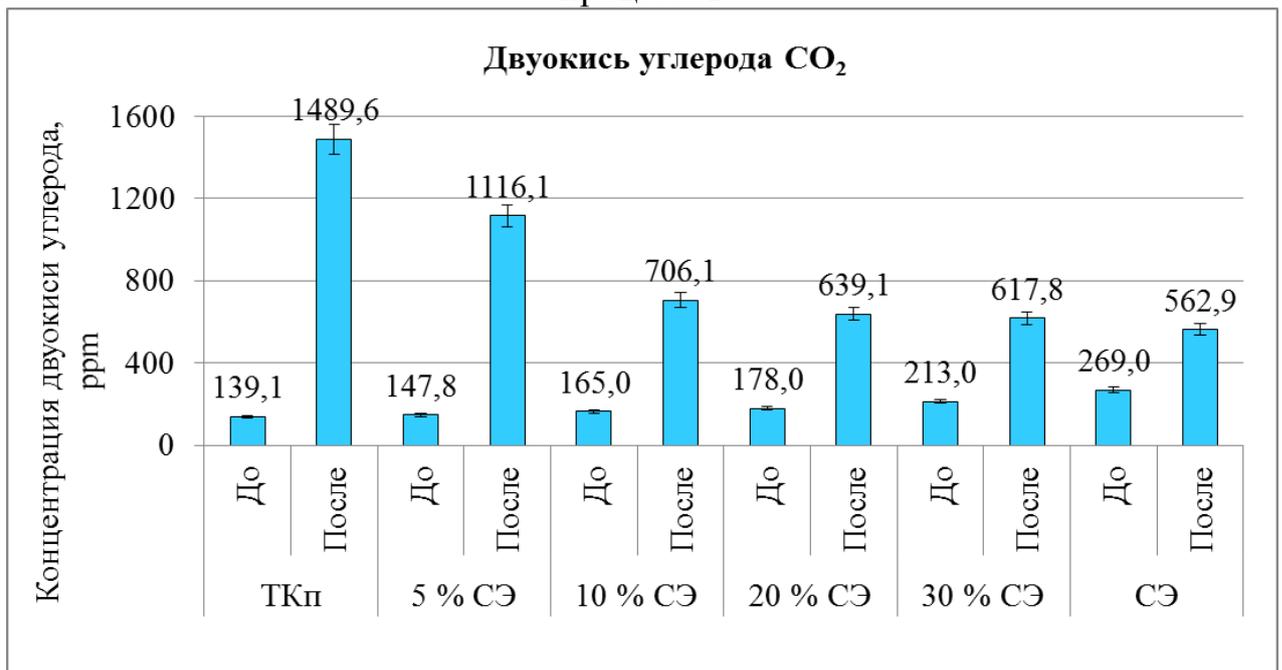


Рисунок 14 - Образование диоксида углерода (CO₂) в жидкостях после разрядных процессов

Воздействие разрядных процессов на масло, эфиромасляные смеси и сам синтетический эфир приводит к образованию небольшого количества водорода (от 4,9 до 8,3 ppm). Напомним, что 1 ppm = 10⁻⁴ % об. В наибольшем количестве генерируются углеводородные газы (от 57 до 139 ppm). В трансформаторном масле во время разрядных процессов в больших количествах синтезируется оксид (131 ppm) и диоксид углерода (1490 ppm). В целом тенденция газообразования, следующая: с увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов

заметно снижается. Так, общее содержание газов (водорода H_2 , метан CH_4 , этан C_2H_6 , этилен C_2H_4 , ацетилен C_2H_2 , пропан C_3H_8 , пропилен C_3H_6 , метилацетилен C_3H_4 , бутан C_4H_{10} , бутен C_4H_8 , оксида углерода CO , диоксида углерода CO_2) в трансформаторном масле после воздействия разрядов составила 1768 ppm. В смесях с объемной долей эфира 20 % (827 ppm) и 30 % (791 ppm) количество газов под влиянием разрядов образуется почти на 50 % меньше, чем в масле.

В шестой главе изучено поведение эфиромасляных смесей с разным влагосодержанием при переходе через ноль в процессе их охлаждения и нагревания. Охлаждение образцов масла проводилось в диапазоне от плюс 60 °С до минус 20 °С, а нагревание от минус 20 °С до плюс 60 °С. В процессе охлаждения и нагревания проб жидкостей проводили измерение электрической прочности.

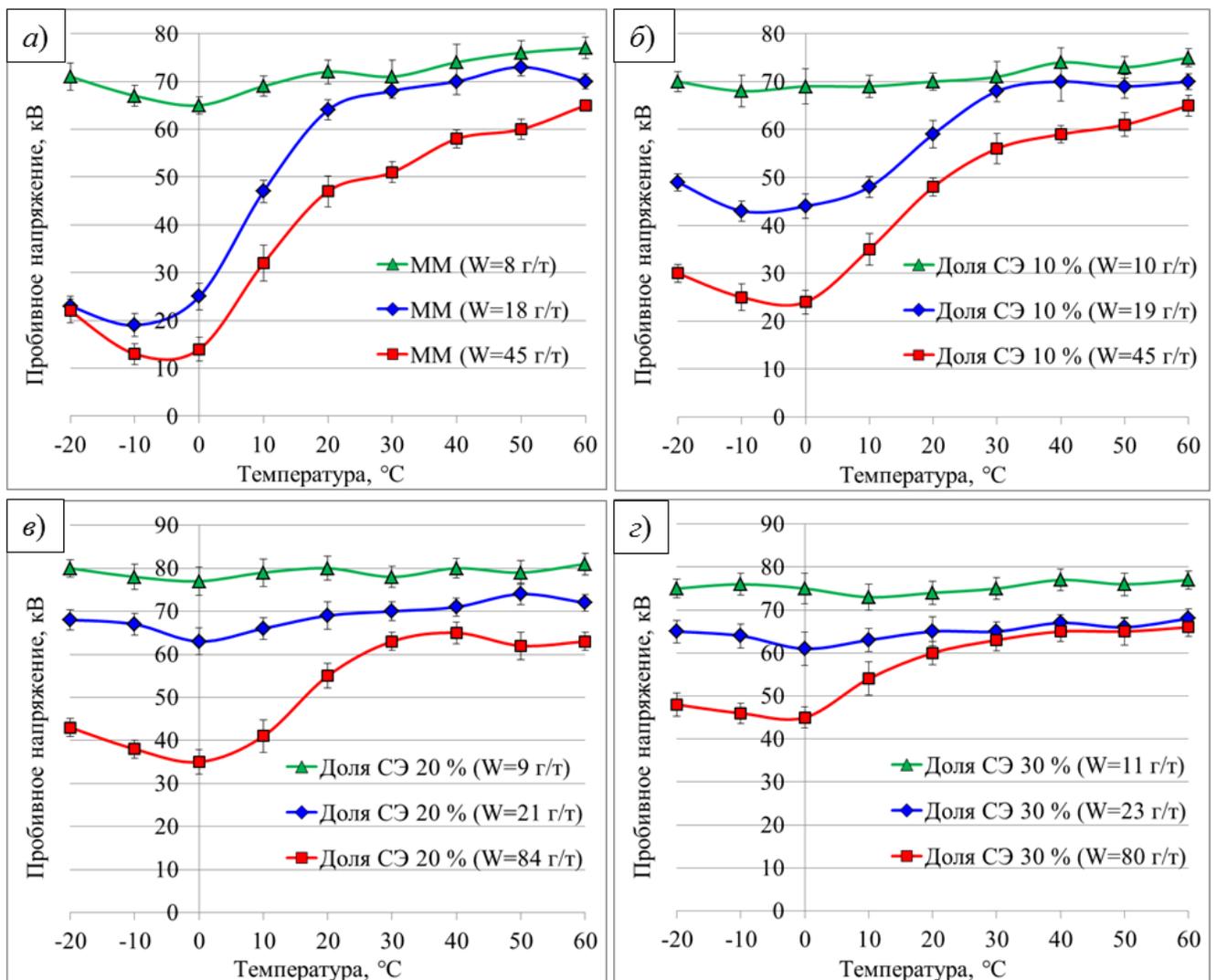


Рисунок 15 – Зависимость U_{np} жидкостей с разным содержанием воды от температуры в процессе охлаждения от плюс 60 °С до минус 20 °С

На рисунке 15 графически показаны зависимости пробивного напряжения жидкостей с разным влагосодержанием в процессе их охлаждения от плюс 60 °С до минус 20 °С. Как видно из рисунка, на характер зависимости $U_{np} = f(T)$

существенное влияние оказывает содержание воды в диэлектрике. Наиболее критическое снижение в области низких температур (от плюс 10 °С до минус 10 °С) происходит в масле и смеси ММ(90):СЭ(10) с высоким содержанием влаги.

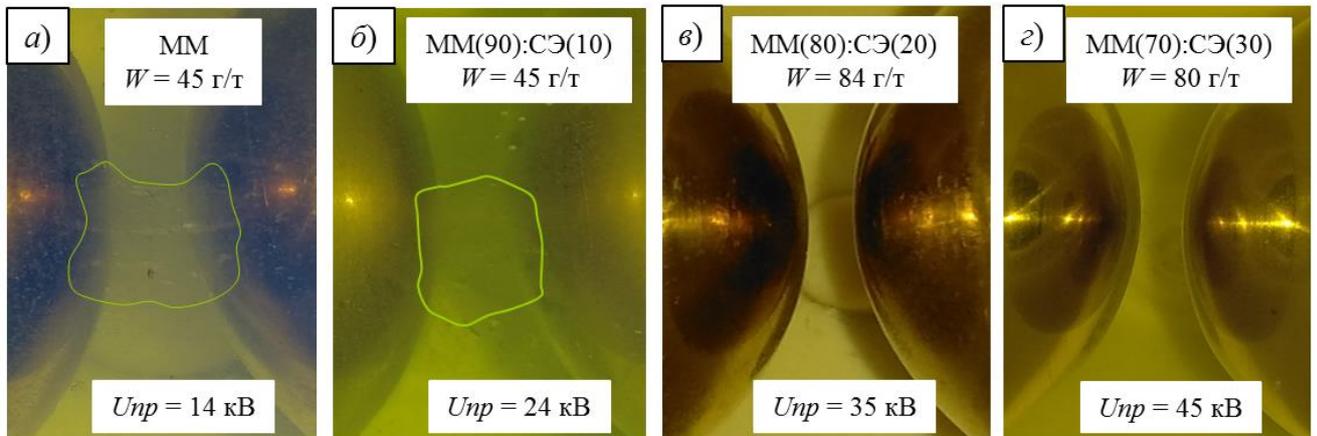


Рисунок 16 – Состояние изоляционных жидкостей при переходе через 0 °С в процессе охлаждения от плюс 60 °С до минус 20 °С

Визуальные наблюдения показывают, что при переходе через 0 °С в процессе охлаждения жидкостей (от +60 °С до -20 °С) в области межэлектродного пространства для масла с концентрацией воды 45 г/т (Рисунок 16, а) и смеси масла с долей эфира 10 %, в котором содержится 45 г/т воды (Рисунок 16, б), наблюдается формирование «ледяного облака». Подобного эффекта в образцах смесей масла с 20 % и 30 % содержанием сложноэфирной жидкости, несмотря на большую концентрацию воды (84 г/т и 80 г/т соответственно) не было зафиксировано.

Такое критическое понижение пробивного напряжения жидкостей при переходе через ноль связано с переходом воды из растворенного состояния в эмульсионное. Как известно, с понижением температуры предельная растворимость воды в диэлектрических жидкостях значительно снижается. Значения, полученные расчетным путем с использованием уравнений 8-12, подтверждают данный факт (Таблица 8).

$$\text{ММ} \quad \lg C_{H_2O} = 7,6080 - 1603 / (T + 233,856) \quad (8)$$

$$90 \% \text{ ММ} + 10 \% \text{ СЭ} \quad \lg C_{H_2O} = 6,5489 - 1212,12 / (T + 233,856) \quad (9)$$

$$80 \% \text{ ММ} + 20 \% \text{ СЭ} \quad \lg C_{H_2O} = 5,3654 - 773,98 / (T + 233,856) \quad (10)$$

$$70 \% \text{ ММ} + 30 \% \text{ СЭ} \quad \lg C_{H_2O} = 5,2661 - 678,51 / (T + 233,856) \quad (11)$$

$$\text{СЭ} \quad \lg C_{H_2O} = 5,4986 - 589,15 / (T + 233,856) \quad (12)$$

Таблица 8 – Предельная растворимость воды в жидкостях (уравнения 8-12)

Изоляционная жидкость	Температура Т (°С)									
	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	
ММ	142,2	91,4	56,8	34,1	19,7	10,8	5,7	2,8	1,3	
ММ(90):СЭ(10)	265,5	190,0	132,7	90,2	59,4	37,9	23,2	13,6	7,6	
ММ(80):СЭ(20)	538,9	435,3	346,1	270,4	207,3	155,4	113,7	80,9	55,8	
ММ(70):СЭ(30)	905,8	751,1	614,4	494,9	391,9	304,5	231,5	171,8	124,0	
СЭ	3116,8	2649,0	2224,8	1844,0	1505,9	1209,6	953,5	735,8	554,3	

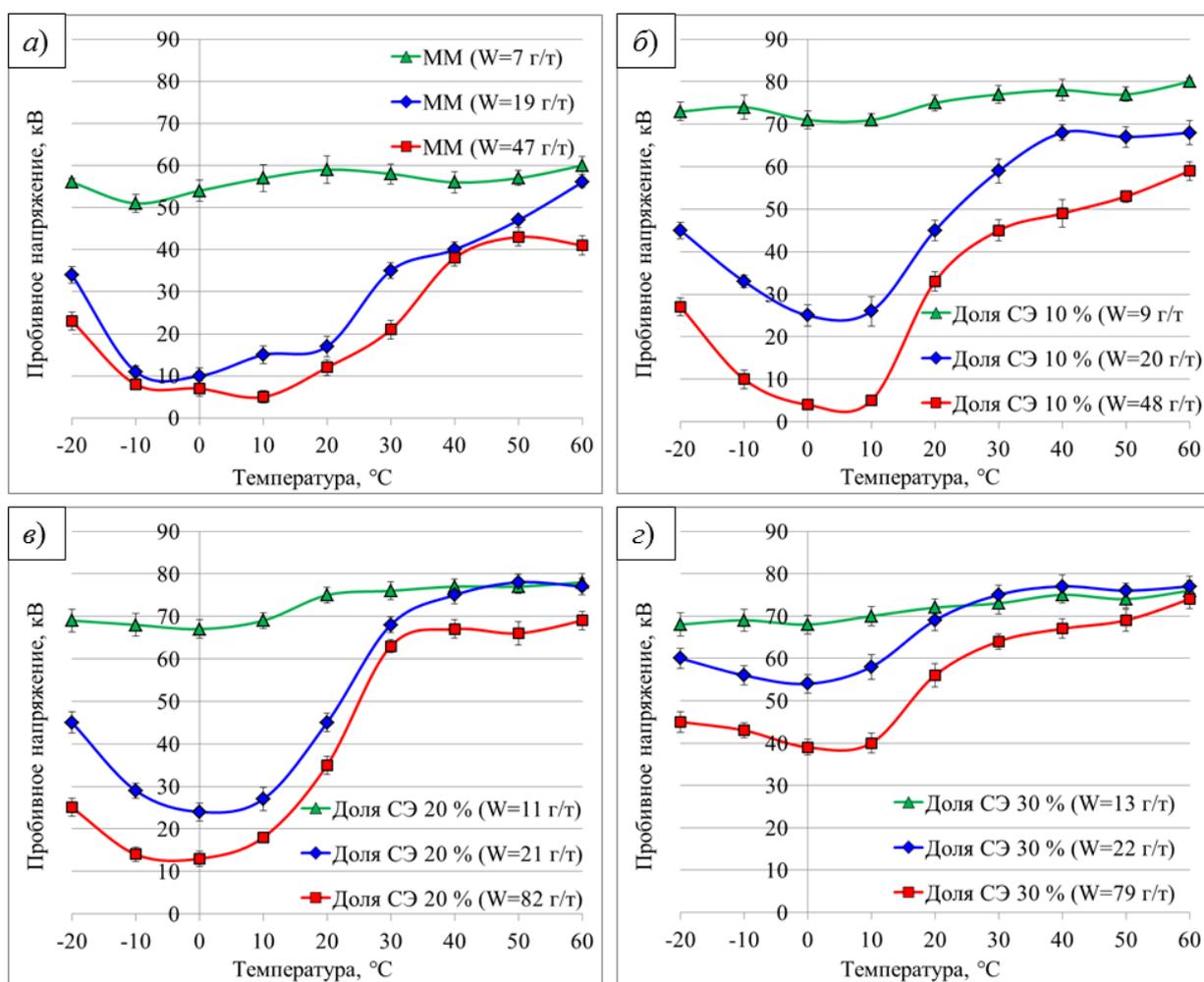
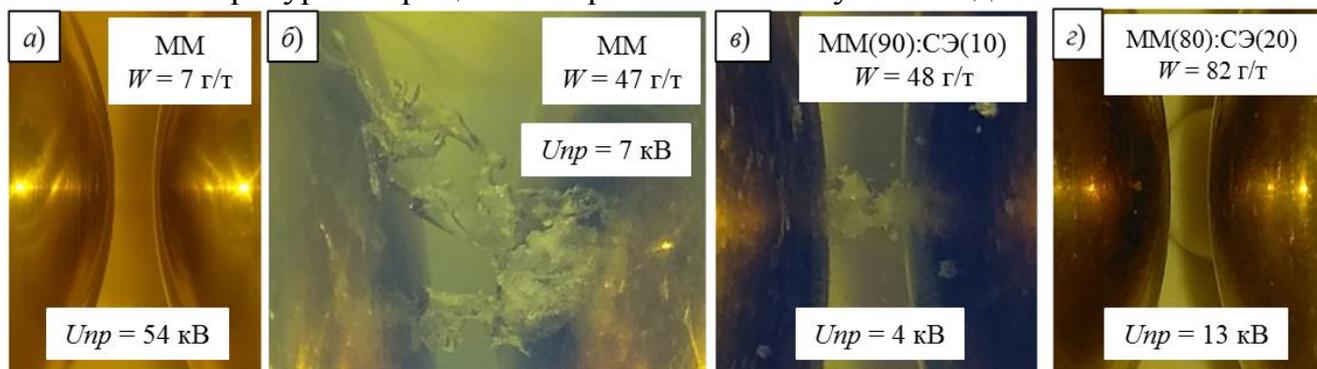
Рисунок 17 – Зависимость $U_{пр}$ жидкостей с разным содержанием воды от температуры в процессе нагревания от минус 20 °С до плюс 60 °С

Рисунок 18 – Состояние изоляционных жидкостей при переходе через 0 °С в процессе нагревания от минус 20 °С до плюс 60 °С

При переходе через 0 °С в процессе нагревания сильно увлажненного масла ($W=47$ г/т) и смеси ММ(90):СЭ(10) с $W=48$ г/т в диапазоне температур от минус 10 °С до 0 °С между электродами в ячейке пробойника образуется ледяной мостик (Рисунок 18, б и в). При дальнейшем нагревании жидкостей происходит постепенное плавление ледяного мостика и формируется мостик из воды, также соединяющий два латунных электрода между собой (Рисунок 19, а). В данном промежутке температур (от -10 °С до +20 °С) пробивное напряжение сильно увлажненных жидкостей имеет критическое значение (5-12 кВ и 4-33 кВ). После нескольких серий пробоев при температуре от плюс 20 °С водяной мостик разрушается. В относительно сухой смеси масла и эфира (10 %) с содержанием влаги 9 г/т и 20 г/т частицы льда не зафиксированы. В пробах масла с долей эфира 20 % и 30 % (Рисунок 18, з), включая смеси с высоким влагосодержанием (82 и 79 г/т соответственно), образование ледяных включений не происходит.

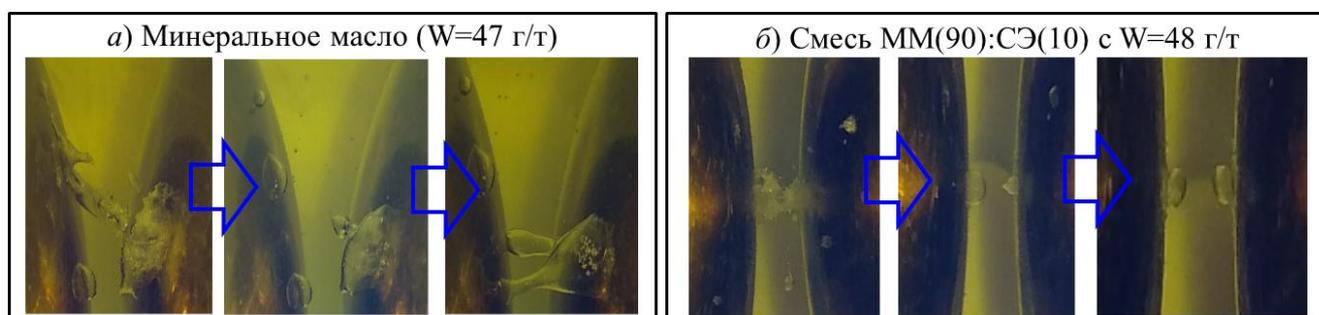


Рисунок 19 - Этапы разрушения ледяного мостика в процессе нагревания от минус 10 °С до плюс 20 °С под влиянием переменного напряжения

Таким образом, добавление синтетического эфира в количестве 20-30 % по объему к неполярному трансформаторному маслу значительно увеличивают растворимость воды и, как следствие, снижает вероятность образования ледяных или водяных мостиков в изоляционных промежутках и предотвращает падение $U_{пр}$ изоляции до критических значений.

Основные результаты работы и выводы

Итогом проведенных исследований являются следующие основные результаты:

1. На основе базы данных осуществлен корреляционно-регрессионный анализ результатов испытаний масла по традиционным физико-химическим показателям за многолетний период работы высоковольтных трансформаторов (1990-2021 гг.) в зависимости от вида высоковольтного электрооборудования, класса напряжения, марки масла. Выявлено, что изменение физико-химических показателей (ТАН, КЧ, И) масла разных марок (ТКп и ГК) в процессе эксплуатации в силовых трансформаторах с пленочной защитой описывается уравнением линейной регрессии, а в измерительных трансформаторах со «свободным дыханием» - уравнением экспоненциальной регрессии. Последнее обуславливает возможность применения этих показателей для определения

скорости старения и прогнозирования состояния изоляционного масла высоковольтного маслонаполненного оборудования в процессе его эксплуатации.

2. Предложен алгоритм получения кинетических кривых «ФХ параметр - срок эксплуатации ЭО». При этом выявлена наиболее практически значимая кинетическая модель «содержание ионола - срок эксплуатации», позволяющая с высокой достоверностью определять степень износа (старения) изоляции и прогнозировать остаточный срок службы изоляции в зависимости от вида электрооборудования, класса напряжения, марки масла.

3. С помощью разработанных диссертантом методик проведен расширенный анализ продуктов старения трансформаторного масла из баков силовых трансформаторов и измерительных трансформаторов тока. Применение высокоселективного метода хромато-масс спектрометрии позволило установить наличие в эксплуатационном масле продуктов окислительного разложения ингибитора окисления – ионола, а именно 2,6-ди-трет-бутилфенол; 2,6-ди-трет-бутил-р-бензохинон, обладающих антиокислительными свойствами и продолжающие выполнять функции ионола. При этом наибольшее их количество содержится в ароматическом масле ТКп.

4. По адаптированной методике определено перекисное число в рабочих пробах масла ТКп и ГК из баков силовых и измерительных трансформаторов тока. Анализ полученных результатов выявил, что значение ПЧ в пробах масла с низким содержанием ионола (менее 0,1 % масс.) в 2-4 раза выше, чем в масле с концентрацией присадки более 0,1 % масс. При этом наибольшее количество перекисных соединений обнаружено в масле ГК (в 3-4 раза больше, чем в масле ТКп). Экспериментально показано негативное влияние перекисных соединений на электрическую прочность трансформаторного масла, а именно, на масло с относительно высоким ПЧ (более 8 ммоль(1/2O/кг масла) и влагосодержанием (более 40 г/т), которое имеет пробивное напряжение в 1,5 раза ниже, чем только увлажненное масло. Кроме того, в увлажненном масле с высоким ПЧ при подаче высокого переменного напряжения между электродами фиксируется очень интенсивная и затяжная дуга.

5. Проведено исследование восковых отложений, взятых из разных частей демонтированных высоковольтных вводов. По адаптированной методике в осадках определено перекисное число. Специальный эксперимент показал, что электрическая прочность электрокартона с воскообразными отложениями снижается на 31-62 % по сравнению с чистым электрокартоном.

6. Предложены эффективные способы усиления химической стабильности трансформаторного масла в эксплуатации, и, как следствие, улучшению электроизоляционных свойств и увеличению срока службы изоляционных материалов в высоковольтном оборудовании. В частности, химическую стабильность изоляционного парафинового масла, содержащее пероксидированные углеводороды, предложено усилить путем одновременного ингибирования его двумя присадками - ионолом (концентрация 0,2 % масс) и 2,6-ди-трет-бутилфенолом (концентрация 0,2 % масс). В этом случае проявляется

эффект синергизма и индукционный период увеличивается почти в 4 раза по сравнению с периодом окисления масла, ингибированного только ионолом.

7. С целью поиска оптимального способа усиления химической стабильности трансформаторного масла ТКп, характеризующегося повышенным осадкообразованием, проведены опыты по смешению масла с синтетической сложноэфирной жидкостью Midel 7131. Показано, что добавление синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 к трансформаторному маслу ТКп в количестве 10-30 % способствует улучшению ряда физико-химических показателей трансформаторного масла (растворимость воды; пробивное напряжение; диэлектрическая проницаемость; температура вспышки; стабильность против окисления, оптическая мутность, класс промышленной чистоты; коррозионная активность).

8. В опытах по продолжительному старению эфиромасляных смесей выяснено, что химическая стабильность склонного в высокой степени к осадкообразованию трансформаторного масла ТКп, заметно улучшается при смешении его с синтетическим эфиром в соотношении ММ : СЭ равном 80 % : 20 % по объему (в открытых системах) и 70 % : 30 % по объему (в герметичных условиях).

9. С увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов снижается более чем на 20 % по сравнению с газообразованием в трансформаторном масле.

10. Изучено влияние температуры на пробивное напряжение увлажненных изоляционных смесей масла и синтетического эфира в процессе охлаждения в диапазоне температур от плюс 60 °С до минус 20 °С, а также в процессе нагревания от минус 20 °С до плюс 60 °С. Установлено, что низкая электрическая прочность масла и эфиромасляных смесей в процессе охлаждения регистрируется в промежутке от плюс 10 °С до минус 10 °С. В случае нагревания электрическая прочность жидкостей имеет минимальное значение в области температур от минус 10 °С до плюс 20 °С (для масла) и от минус 10 °С до плюс 10 °С (для смесей масла с эфиром 10-30 %).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ для докторских диссертаций

1. Лютикова М.Н., Коробейников С.М. Методы контроля влагосодержания жидких диэлектриков. Состояние и проблемы // ИВУЗ. Проблемы энергетики. - 2017. - № 9-10. - С. 32-49.
2. Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Сотников С.И., Коновалов А.А. Обзор устройств для отбора проб газа из газового реле силовых трансформаторов. Испытание пробоотборника EL-PACK G с модифицированным клапаном // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. – 2018. – № 10. – С. 52–62.

3. Лютикова М.Н., Нехорошев С.В., Кульков М.Г. Диагностирование состояния внутренней изоляции высоковольтного оборудования методом хромато-масс спектрометрии // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2018. - Т. 24. - № 4. - С. 118-131.
4. Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Ридель А.В. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и влияние на пробивную прочность жидкого диэлектрика // Промышленная энергетика. - 2020. - № 5. - С. 18-24.
5. Лютикова М.Н., Нехорошев С.В., Куклина В.М., Кульков М.Г. Идентификация примесей неизвестного состава в изоляционном масле методом хромато-масс-спектрометрии // Электрические станции. - 2020. - № 6 (1067). - С. 47-53. (Версия на английском языке опубликована в журнале Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54 (4). – P. 594-599).
6. Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Коновалов А.А. Внедрение спектральных методов в диагностику маслonaполненного высоковольтного оборудования // Надежность и безопасность энергетики. - 2020. - Т.13. - № 2. - С. 110-118.
7. Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Ридель А.В. Состояние изоляционного масла при его охлаждении // Энергетик. - 2020. - № 10. - С. 16-20.
8. Лютикова М.Н. Выяснение причины стабильности электрофизических показателей трансформаторного масла из баков измерительных трансформаторов тока // Промышленная энергетика. - 2020. - № 11. - С. 2-9.
9. Лютикова М.Н., Коновалов А.А., Коробейников С.М. Новые изоляционные жидкости и методы диагностики оборудования с бумажно-масляной изоляцией // Электрические станции. - 2020. - № 11 (1072). - С. 35-42. (Power Technology and Engineering. –2021. – Vol. 55. – P. 136-142).
10. Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Коновалов А.А. Электрофизические свойства смесей минерального масла и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости // Надежность и безопасность энергетики. - 2021. - Т.14. - № 2. - С. 132-141.

Статьи в журналах, индексируемые в международных базах цитирования Scopus и Web of Science

1. Лютикова М.Н., Коробейников С.М. Исследование технологических операций, влияющих на определение концентрации присадки Ионол в изоляционном масле высоковольтного оборудования // Проблемы региональной энергетики = Problems of regional energy. - 2018. - № 1 (36). - С. 96-105.
2. Lyutikova M.N., Korobeinikov S.M., Konovalov A.A., Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Control of the Antioxidant Additive (Ionol) Content in Liquid Insulation of High-Voltage Equipment in Electric Grid Companies Using Modern Instrumental Methods // Power Technology and Engineering. - 2019. - Vol. 53 (1). - P. 118–125 (Q3). (Версия на русском языке опубликована в журнале Электрические станции. - 2018. - № 12. - С. 43-51).

3. Korobeynikov S., Ovsyannikov A., Ridel A., Karpov D., Lyutikova M.N., Kuznetsova Y., Yassinskiy V. Study of partial discharges in liquids // Journal of Electrostatics. - 2020. - Vol. 103. - Art. 103412. - [10 p.] (Q2).
4. Lyutikova M.N., Korobeinikov S.M., Buzaev V.V. Determination of water content in liquid insulation of high-voltage equipment by different methods // Power Technology and Engineering. – 2020. - Vol. 53 (5). - P. 623-630 (Q3). (Версия на русском языке опубликована в журнале Электрические станции. - 2019. - № 6. - С. 45-53).
5. Lyutikova M.N. An Improved Electrochemical Method for Moisture Determination in Mineral Oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2020. - Vol. 27 (6). - P. 2172-2178 (Q1).
6. Korobeynikov S., Ridel A., Lyutikova M. Water droplet behavior at alternating electric field action // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. - 2021. - Vol. 9 (2). - P. 73-81 (Q3).
7. Lyutikova M., Korobeinikov S., Konovalov A. Evaluation of the Properties of Mixture of Aromatic Mineral Oil and Synthetic Ester for High-Voltage Equipment // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2021. - Vol. 28 (4). - P. 1282-1290 (Q1).
8. Lyutikova M., Korobeinikov S., Mohan Rao U., Fofana I. Mixed Insulating Liquids with Mineral Oil for High Voltage Transformer Applications: A Review // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2022. - Vol. 29 (2). - P. 1-10. - Paper number TDEI-9938-2022 (Q1).

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2020613716. Программа для моделирования импульсной электрической прочности жидкостей / Коробейников С.М., Лютикова М.Н., Ридель А.В. // Заявка № 2020613716 от 16.03.2020. Опубликовано 23.03.2020 Бюл. № 4.
2. Патент РФ № RU2751460C1. Способ хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле / Коробейников С.М., Лютикова М.Н., Ридель А.В. // Заявка № 2020140031 от 07.12.2020. Опубликовано 14.07.2021 Бюл. № 20.

Материалы конференций

1. Лютикова М.Н. Примесные соединения в масле – индикаторы состояния внутренней изоляции высоковольтного аппарата // XVIII Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». - 2018. - С. 328-332.
2. Лютикова М.Н. Показатели, характеризующие состояние процесса «старения» жидкого диэлектрика // Научно-практическая конференция «Масла в электроэнергетике: актуальные вопросы применения и контроля качества-2018». - 2018.
3. Korobeinikov S.M., Lyutikova M.N., Konovalov A.A. High-voltage equipment insulation oils moisture content evaluation using the method of gas chromatography under various temperature conditions // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument

engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. - 2018. – Т. 1. - Ч. 5. – С.168-172.

4. Lyutikova M.N., Korobeinikov S.M. Improvement of the procedure for determining the antioxidant additive (ionol) in insulating oils // Lecture Notes in Mechanical Engineering. - 2020. - Vol. 1: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). - С. 963-971.

5. Korobeinikov S.M., Lyutikova M.N. Influence of water on liquid insulation electrical strength of large power transformers // XI International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD 2019). - 2019. - P. 248-253.

6. Лютикова М.Н., Коробейников С.М. О проблемах смешения разных марок минеральных изоляционных масел // Сборник докладов XII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (СПЭФЭГД 2019). - 2019. - С. 100-103.

7. Korobeinikov S., Lyutikova M., Konovalov A. Spectral measurement of the precipitations composition in OIP insulation of the high-voltage bushings // 48th session CIGRE. - 2020. - Paper D1-110.

8. Гарифуллин М.Ш., Лютикова М.Н., Бикзинуров А.Р., Слободина Ю.Н., Кучкарова А.Р. Использование ИК спектроскопии для контроля концентрации ингибитора окисления (ионола) в минеральных трансформаторных маслах // 92-е заседание международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации». - 2020. - С. 409-418.

9. Korobeinikov S., Ridel A., Lyutikova M. Experimental studies of partial discharges in bubbles exposed to X-ray radiation // «IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM 2021 – Proceedings». - 2021. - P. 251-254.

10. Lyutikova M., Konovalov A., Korobeinikov S. Changing of the insulating characteristics of mixtures (mineral oil and synthetic ester) during prolonged exposure of elevated temperature // 49th session CIGRE. - 2022. - Paper D1-110.