

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт энергетики

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

На правах рукописи

ЛИТВИНОВ Данила Васильевич

**Совершенствование эксплуатационных свойств смесей минеральных трансформаторных масел с синтетическими жидкими диэлектриками**

**Научный доклад**

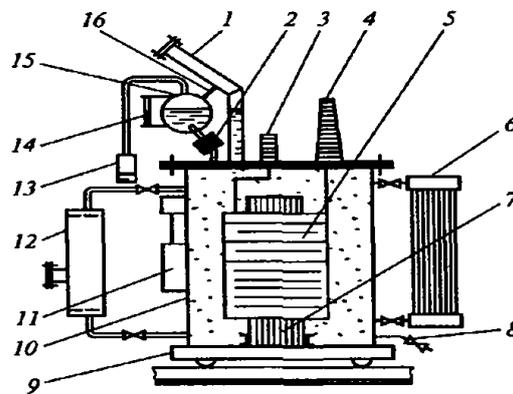
Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент, профессор ВШВЭ, Кизеветтер Дмитрий Владимирович

Санкт-Петербург – 2021

# ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Изоляция силовых трансформаторов

Силовые трансформаторы можно описать конструктивно как многокомпонентную систему (Рисунок 1) [2], одним из главных элементов которой является электрическая изоляция [2]. В роли изоляции обычно используется целлюлозная бумага, пропитанная изоляционной диэлектрической жидкостью.



**Рисунок 1 Конструктивная схема трансформатора с бумажно-масляной изоляцией [2]:** 1 – труба для отвода газов; 2 – газовое реле (реле Бухгольца); 3 – ввод низкой стороны; 4 – ввод высокой стороны (высоковольтный); 5 – обмотки ВН и НН; 6 – навесной радиатор охлаждения; 7 – магнитопровод; 8 – сливное отверстие; 9 – постамент на роликах для передвижения; 10 – корпус; 11 – цифровой регулятор; 12 – термосифонный фильтр; 13 – воздухоосушитель; 14 – датчик уровня масла; 15 – расширительный бак; 16 – соединительные магистрали.

Также существуют и сухие трансформаторы, характеризующиеся высокой экологичностью, устойчивостью к воздействию влаги, способностью к работе в разных условиях окружающей среды [1]. Однако стоимость данных трансформаторов в разы превосходит стоимость традиционных силовых масляных трансформаторов, в основном, по причине сложностей с теплоотведением. По этой причине данный вид трансформаторов имеет низкую

распространённость в энергосистеме. Их использование оправдано в основном в областях, которые характеризуются очень неблагоприятными климатическими условиями или резким ростом нагрузок.

Также существуют «гибридные» трансформаторы, особенность которых заключается в том, что в наиболее высокотемпературных и высоконагруженных частях обмоток вместо целлюлозного диэлектрика используется другой нагревостойкий материал, к примеру, арамид.

Применение данного вида изоляции позволяет намного замедлить процесс старения изоляции, а также повысить нагрузочную способность трансформатора. [3]. Но, из-за высокой стоимости трансформаторов с данным видом изоляции, по большей части в энергосистеме на данный момент в эксплуатации находятся трансформаторы с бумажно-масляной изоляцией.

## 1.2 Основные причины выхода из строя силовых трансформаторов

Увеличение количества потребляемой энергии влечёт за собой не только требования к росту мощности производимой электроэнергии, но и повышает требования к работоспособности и надёжности электротехнического оборудования [1]. Соответственно, срок эксплуатации и длительность бесперебойной работы силовых трансформаторов прямо пропорциональны уровню электрофизических свойств изоляции, в частности, бумажно-пропитанной изоляции (Таблица 1 [4]).

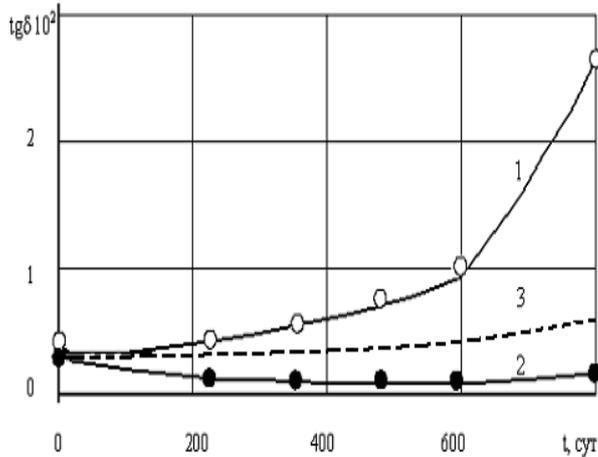
Причины выхода из строя трансформаторов	Доля отказов, %
Ухудшение свойств материалов (старение)	21,6;
Дефекты в конструкции и в процессе изготовления	19,4;
Несоответствие условий эксплуатации паспортным значениям	16,8;

Сторонние воздействия	10,3;
Нерасчётные режимы сети	5,8;
Дефекты при в результате выполнения ремонтных работ	4,2;
Климатические, а также иные внешние воздействия	3,5

**Таблица 1 Основные причины выхода из строя трансформаторов [4]**

В случае необходимости возможна замена трансформаторного масла, однако, целлюлозный компонент замене не подлежит. В целлюлозной бумаге при эксплуатации происходят молекулярные изменения структуры материала, что приводит к разрушению надмолекулярной структуры, снижению степени полимеризации, а также ухудшению механической прочности материала, что может вывести из строя изоляцию трансформатора в случае возникновения короткого замыкания.

Воздействие на целлюлозную бумагу высоких температур не приводит к изменению тангенса угла диэлектрических потерь, относительной диэлектрической проницаемости [5], удельного объемного и поверхностного сопротивления [6]. Рисунок 2 [5] указывает на то, что рост диэлектрических потерь в бумажно-пропитанной изоляции в процессе термостарения является следствием разрушения масла, а не целлюлозы. В случае последующего удаления жидкого диэлектрика из изоляции, значение тангенса угла диэлектрических потерь либо не изменяется, либо направлено в сторону уменьшения [5].



**Рисунок 2** Зависимость значений тангенса угла диэлектрических потерь образцов бумажно-пропитанной изоляции от времени термического воздействия при температуре 150 °С [5]: 1 – образец пропитанной бумаги; 2 – тот же образец бумаги после удаления нефтяного масла; 3 – образец бумаги без пропитки (сухой).

В то же время, в процессе эксплуатации трансформаторного масла, меняется его состав, а также снижается электрическая прочность, повышается тангенс угла диэлектрических потерь. Происходит это вследствие возникновения в жидком диэлектрике механических частиц, развития термоокислительных процессов, электрического старения, а также изменения химического состава трансформаторного масла [5].

Как следствие, деструкция трансформаторного масла является причиной увеличения диэлектрических потерь бумажно-пропитанной изоляции в целом, а также дальнейшего развития процессов разрушения ее составляющих. В результате данных процессов происходит дальнейшее ухудшение электроизоляционных характеристик трансформаторного масла, химических и механических свойств целлюлозной бумаги, а также снижение срока службы трансформатора. Из этого следует то, что наиболее уязвимым компонентом бумажно-пропитанной изоляции является жидкий диэлектрик.

### 1.3 Виды изоляционных жидкостей в трансформаторе

#### *Изоляционные жидкости на нефтяной основе.*

Масла на нефтяной основе представляют собой многокомпонентные углеводородные смеси с определенным интервалом кипения. Они используются в качестве жидких диэлектриков в электрооборудовании уже более ста лет. Масло, используемое для изоляции трансформаторов, получают путем переработки сырой нефти. Переработка включает два основных направления; процессы разделения и конверсионные процессы. Переработчику доступно множество процессов, и выбор конечных процессов зависит от требуемых продуктов (как количества, так и качества) и доступной сырой нефти. Со временем изменения требований к продукту или доступной сырой нефти могут привести к изменениям в процессах переработки, необходимых на нефтеперерабатывающем заводе. Есть много видов сырой нефти, которые поступают из разных источников по всему миру. Выбор сырой нефти - ключевая часть процесса переработки. Выбор источника обработки зависит от многих факторов, включая: качество, доступность, объем, политические требования и цена. Первый этап переработки нефти - перегонка. Этот процесс происходит в колонне, известной как дистилляционная колонна. В процессе перегонки сырая нефть (смесь углеводородов) кипятится и повторно конденсируется для разделения сырой нефти на компоненты в зависимости от диапазонов температур кипения. Тяжелые и легкие для кипячения компоненты будут собираться в нижней части колонны. Более легкие компоненты имеют более низкие точки кипения, поэтому их можно собирать в более высоких частях колонны. В верхнюю часть колонны поступает поток газов, известных как LPG (сжиженный нефтяной газ). Некоторые компоненты не подвергаются дальнейшей обработке, например гидрообработке. Целью процесса является удаление серы. Для этого используется водород. Завершающей фазой процесса рафинирования является смешивание. Это важный этап, на котором различные углеводородные компоненты, производимые на

нефтеперерабатывающем заводе, смешиваются вместе, чтобы получить продукт с необходимыми свойствами - трансформаторное масло. Иногда вещества, полученные с помощью этого процесса, даже считаются синтетическими, но все же на основе нефти. Несмотря на доступность разнообразных синтетических масел и прогресс в исследованиях природных сложных эфиров, масла на нефтяной основе сохранили свое преимущество благодаря своей доступности, экономичности и удовлетворительным диэлектрическим свойствам.

#### *Синтетические масла.*

Аналогичные структуры, как и масла на основе нефти, имеют синтетические эфиры полифункциональных спиртов. Сложные эфиры часто целенаправленно не ректифицируют после синтеза, чтобы сохранить разнообразие продуктов. Технические требования, предъявляемые к этим маслам, должны учитывать различия в их химическом составе. Сложный эфир с аналогичными электроизоляционными свойствами отличается другими характеристиками [7]. Синтетическое эфирное масло представляет собой смесь химических соединений, которые изначально не присутствуют в сырой нефти. Есть больше возможностей для получения синтетического эфира. Один из них использует процесс Фишера-Тропша, который преобразует диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), монооксид углерода ( $\text{CO}$ ) и метан ( $\text{CH}_4$ ) в жидкие углеводороды различных форм. Этот процесс был разработан и широко использовался во время Второй мировой войны. Другой метод синтеза сложного эфира основан на удалении высоковязкого битума из нефтеносных песков и использовании различных процессов гидрогенизации для превращения его в высококачественную синтетическую сырую нефть. Этот процесс используется в Альберте, Канада.

Недостатком многих синтетических масел является первоначальная стоимость, обычно в два-четыре раза превышающая стоимость масел на нефтяной основе. Другие проблемы связаны с их потенциальным разложением в определенных химических средах. Будущее синтетических эфиров с точки зрения

возобновляемых технологий может быть в новых подходах к синтезу сложных эфиров. Согласно исследованиям [8] синтетический сложный эфир также может быть получен из растительного масла с помощью двухстадийной переэтерификации.

*Масла на натуральной основе.*

Натуральные масла - это заметно более простая группа веществ с похожим химическим составом и высокой температурой кипения. По химическому составу синтетические и натуральные сложноэфирные масла производятся путем сочетания органических кислот и спиртов. Они могут содержать триглицерид (образованный из одной молекулы глицерина в сочетании с тремя жирными кислотами на каждой из групп ОН), состоящий из смеси насыщенных и ненасыщенных жирных кислот. Насыщенные жирные кислоты не содержат двойных связей между атомами углерода цепи жирной кислоты. Таким образом, они насыщены атомами водорода. Жирная кислота - это карбоновая кислота, которая может быть насыщенной или ненасыщенной. Большая часть жирных кислот относится к ненасыщенным, что обуславливает их низкую вязкость и лучшие низкотемпературные свойства.

Мнения об использовании натурального эфира в силовых трансформаторах расходятся. Многие производители трансформаторов отказываются от любых попыток замены минерального или синтетического масла, а некоторые выступают против. Некоторые противоположные мнения встречаются в литературе: «Животные масла и растительные масла не используются для образования жирных кислот при нагревании, которые вызывают коррозию целлюлозной бумаги, используемой в изоляции» [9].

Тем не менее, в некоторых статьях приводятся результаты успешных испытаний природных сложных эфиров в трансформаторах средней мощности: «Жидкости на основе натуральных сложных эфиров могут применяться в трансформаторах средней мощности с использованием систем изоляции,

разработанных для обычного минерального масла». [10]. Как было сказано ранее, растительное масло в основном представляет собой смесь эфиров триглицеридов и жирных кислот, нескольких липоидов и свободных жирных кислот.

Неочищенные растительные масла, извлеченные из масличных семян, имеют темный цвет и содержат твердые компоненты, такие как белки и волокна.

Например, рапсовое масло содержит первичные жирные кислоты (олеиновая  $C_{18}H_{34}O_2$  и линолевая  $C_{18}H_{32}O_2$ ). Чтобы использовать этот тип натурального масла в трансформаторе, необходимо снизить кислотное число путем очистки. В [11] была использована трехступенчатая процедура улучшения свойств масла: щелочная очистка, отбеливание и декомпрессионная перегонка.

#### **1.4 Современные тенденции по совершенствованию технологии производства масел**

В последнее время для улучшения условий по охлаждению трансформаторов преследуется тенденция использования в них масла с низкой вязкостью. Это достигается сужением фракционного состава.

Особый момент, который очень важен при производстве и эксплуатации - совершенствование изоляционных свойств масла: понижение тангенса угла диэлектрических потерь, гигроскопичности, а также увеличение газостойкости жидких диэлектриков в случае коронного разряда.

Снижение тангенса угла диэлектрических потерь достигают путём адсорбционной доочистки, которая является обязательной заключительной операцией.

Снижение гигроскопичности масла достигают путём уменьшения содержания ароматических углеводородов и полярных примесей, но первые дают маслам повышенную газостойкость.

Главным показателем для введения в эксплуатацию трансформаторного масла считают химическую стабильность. В данном отношении слишком большое содержание ароматических углеводородов и смолистых веществ

нежелательно, потому что при работе такого масла в трансформаторе будет образовываться осадок.

Также есть вопрос о допустимом содержании серы в трансформаторных маслах. Концентрат сернистых соединений, в котором содержатся сульфиды, замедляет окислительные реакции в масле, но фракции, которые не содержат сульфиды, ингибиторами не являются.

В процессе выборочной (селективной) очистки дистиллята сернистой нефти наряду с устранением ароматических углеводородов и смолистых веществ, происходит получение сернистых соединений. По этой причине глубину очистки масла всегда можно увидеть по содержанию в нём серы. Чем более глубокой является очистка трансформаторного масла, тем восприимчивее оно становится к добавляемым в него антиокислителям.

Масло, выходящее после процесса фенольной очистки, в котором содержится 1% серы, нестабильно. Хорошим считается масло, которое содержит 0,4 - 0,6% серы, а ингибированное 0,2 - 0,3% ионола.

При гидроочистке содержание серы не допускается более, чем 0,2%.

### **1.5 Смешивание трансформаторных масел разных марок**

В общем случае рекомендована эксплуатация масел различных марок, без их смешивания. В случае необходимости допустимо смешивание минеральных масел, но прежде проводятся тестовые испытания на совместимость, которые состоят из:

- изготовления смеси масел в соответствии с плановой пропорцией доливки, если мы её не знаем, то соотношение частей берётся, как 1:1;
- определения тангенса угла диэлектрических потерь смеси и исходных масел при температуре, равной 90 °С;
- создания условий для старения исходных жидкостей и смеси, выдерживая температурный режим  $95\pm 2$  °С в течении 72 часов;

- измерения тангенса угла диэлектрических потерь исходных жидкостей и их смеси после проведения процесса старения при тех же условиях.

Смесь масел считается пригодной к заливке в трансформатор в том случае, если измеренное после процесса старения значение тангенса угла диэлектрических потерь смеси не выше того же параметра после процесса старения для масла, которое находится в работающем оборудовании.

При использовании свежих и регенерированных масел, смесь считают пригодной к эксплуатации, если её показатели оказались не хуже, чем показатели каждого отдельно взятого компонента.

Недопустимо смешивание масел, которые предназначены для выключателей, с маслами для трансформаторов в том случае, когда смесь будет использоваться в трансформаторах.

В случае, если тангенс угла диэлектрических потерь у смеси, измеряемый при температуре 90 °С превосходит данный показатель жидкости из смеси с наибольшими диэлектрическими потерями, то она может быть использована только для эксплуатации в масляных выключателях.

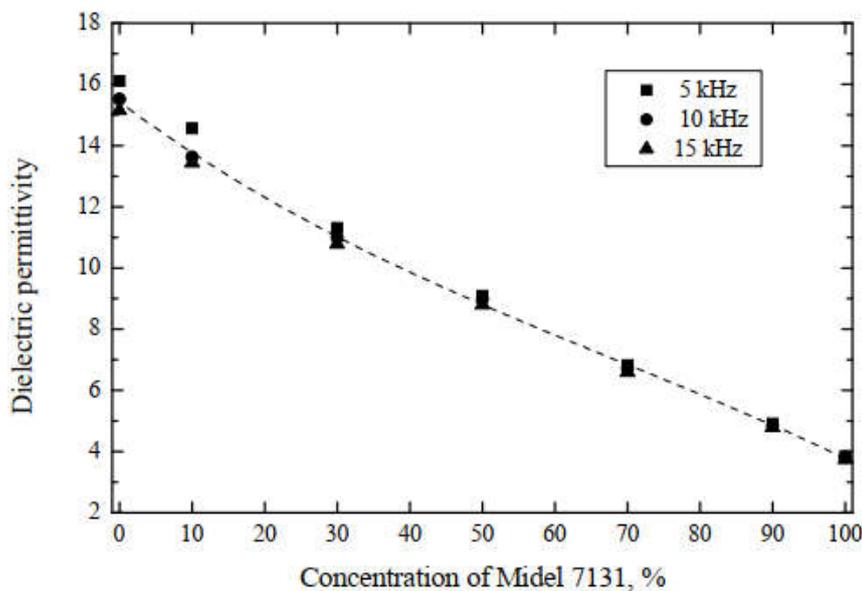
Далее будет приведён ряд исследований по смешиванию различных диэлектрических жидкостей и оценке различных параметров смесей.

### **1.5.1 Смесь MIDEL 7131 и THESO**

Исследования диэлектрических свойств чистых изоляционных жидкостей Midel 7131 и THESO проводились ранее и описаны в [12]. Было показано, что эфирная жидкость Midel 7131 имеет низкочастотную диэлектрическую проницаемость  $\sim 3,8$ , а масло THESO имеет более высокую низкочастотную диэлектрическую проницаемость  $\sim 15$  (измеренная при 20 кГц).

Электропроводность на постоянном токе эфирной жидкости Midel 7131 ( $\sim 6,56 \times 10^{-12}$  См / м) ниже, чем проводимость постоянного тока масла THESO,  $\sim 5 \times 10^{-7}$  См / м. Однако эта измеренная проводимость показывает, что масло THESO почти в 10 раз менее проводимо, чем сверхчистая вода [13]. Как

переменное, так и импульсное напряжение пробоя жидкости Midel 7131 выше, чем у масла THESO. Было высказано предположение, что если стабильные смеси могут быть сформированы путем смешивания масла THESO с высокой диэлектрической проницаемостью с жидкостью на основе сложного эфира Midel 7131 с более низкой диэлектрической проницаемостью, то могут быть получены изолирующие жидкости с диапазоном статических проницаемостей, лежащих между значениями составляющих масел. Чтобы определить, являются ли изолирующие жидкости Midel 7131 и THESO смешиваемыми, были смешаны и исследованы образцы различных концентраций (Рисунок 3).

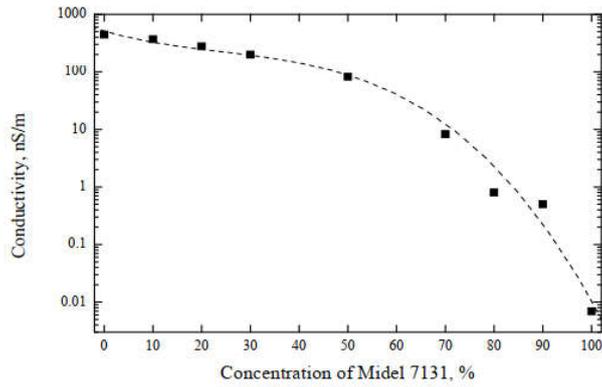


**Рисунок 3 Данные по диэлектрической проницаемости смеси диэлектрических жидкостей**

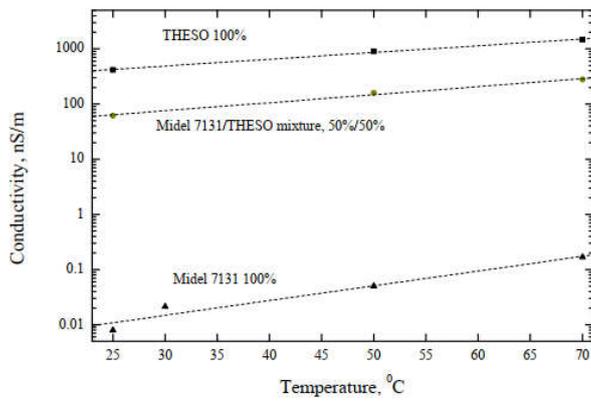
По полученным данным была выведена аппроксимирующая кривая в виде полинома третьего порядка. [14]

$$\varepsilon_{mix} = 15.42 - 0.177 \cdot M + 1.19 \times 10^{-3} \cdot M^2 - 5.77 \times 10^{-6} \cdot M^3$$

Также была измерена и построена зависимость электрической проводимости смесей при комнатной, а также более высоких температурах (Рисунок 4,5).

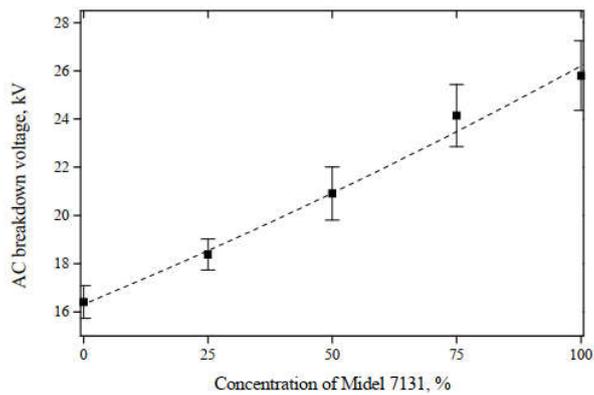


**Рисунок 4** Зависимость при комнатной температуре [14]



**Рисунок 5** Зависимость при более высоких температурах [14]

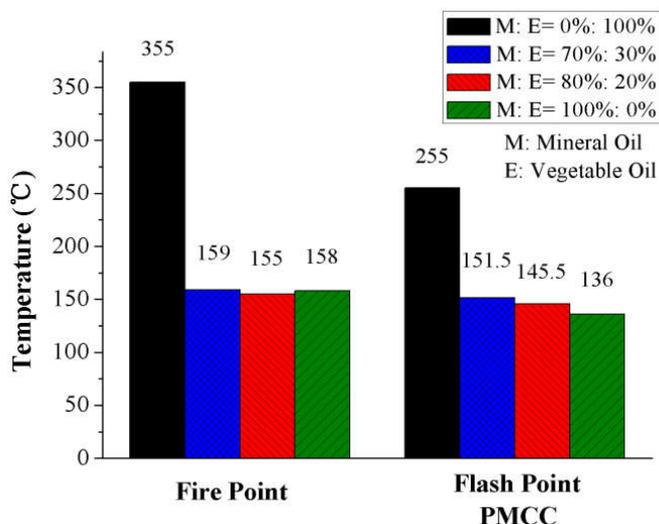
Также получена следующая зависимость (Рисунок 6):



**Рисунок 6** Зависимость пробивного напряжения от концентрации жидкости MIDEL 7131 в смеси [14]

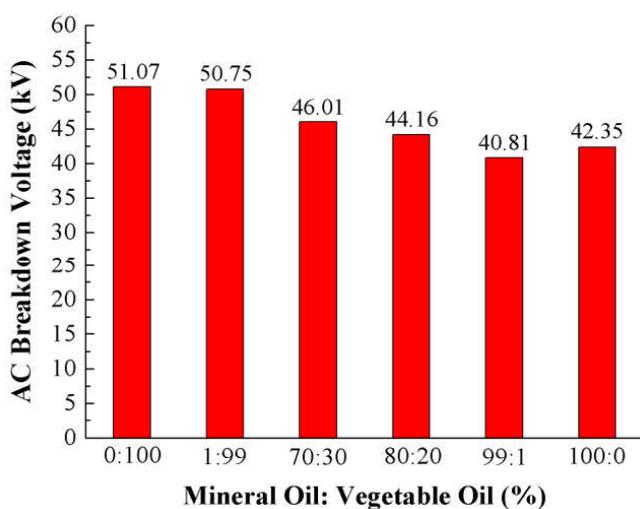
### 1.5.2 Смесь минерального масла Envirotemp FR3 и растительного масла Karamay No.25

Были исследованы смеси диэлектрических жидкостей в различных концентрациях (Рисунок 7).



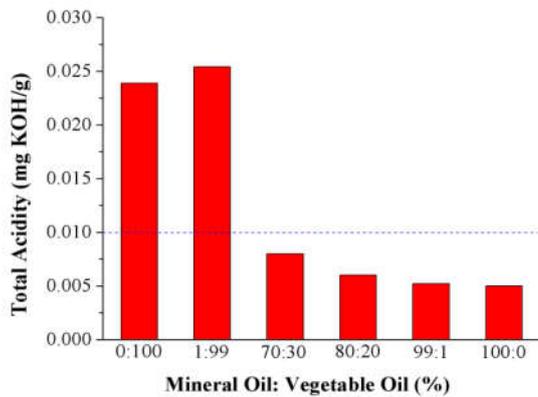
**Рисунок 7 Температура вспышки для смеси жидкостей в различных концентрациях**

Насколько мы можем увидеть, при добавлении растительного масла к минеральному увеличивается температура вспышки, что может стать решающим пунктом в трансформаторах с высокой термической нагрузкой.[15]

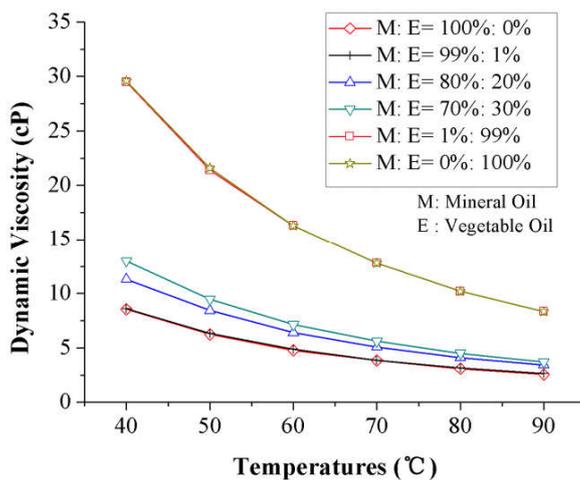


**Рисунок 8 Зависимость величины пробивного напряжения от концентрации минерального масла в смеси**

Также, как выяснилось, при добавлении растительного масла увеличивается величина пробивного напряжения (Рисунок 8).[15]



**Рисунок 9** Зависимость величины кислотного числа от концентрации минерального масла в смеси



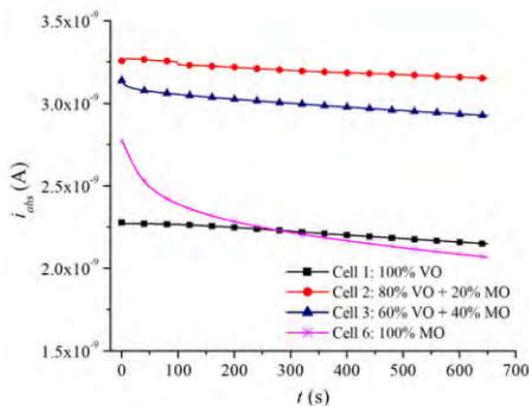
**Рисунок 10** Зависимость величины динамической вязкости от концентрации минерального масла в смеси

Однако, наряду с этим, добавление растительного масла влечёт за собой увеличение кислотного числа, а также вязкости смеси масел, и изменение каждого из параметров должно быть выявлено и учтено (Рисунок 9,10).[15]

### 1.5.3 Смеси растительного и минерального масла [16]

В данном исследовании образцы растительного и минерального масла и смесей этих масел были приготовлены в шести специальных герметичных ячейках. В каждую ячейку были введены равные количества целлюлозной бумаги

и алюминиевого проводника для имитации условий силового трансформатора. Используя образцы масла, взятые из ячеек 1-6, измеряли токи поглощения и резорбции (Рисунок 11-14) и рассчитывали удельное электрическое сопротивление (Рисунок 15). Также были определены действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь (Рисунок 16-18). Образцы были подвергнуты ускоренному термическому старению при  $T = 155 \text{ } ^\circ\text{C}$  в течение 1650 часов, и все эти количества были определены при различной продолжительности старения.



**Рисунок 11** Изменение тока поглощения в зависимости от времени, измеренное для кондиционированных образцов растительного масла (VO) (ячейка 1), минерального масла (МО) (ячейка 6) и смесей ячеек 2 и 3 ( $U_0 = 100 \text{ В}$ ). [16]

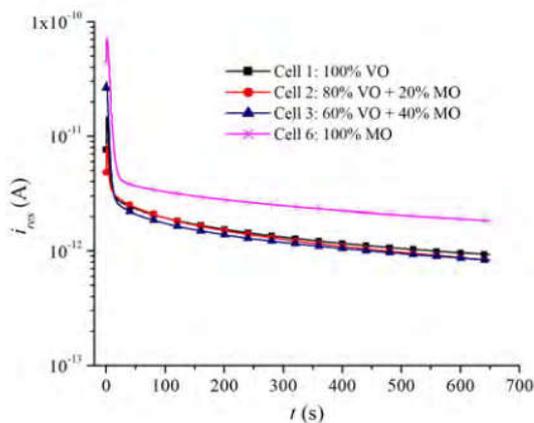


Рисунок 12 Изменение тока резорбции как функция времени, измеренное для кондиционированных образцов VO (ячейка 1), MO (ячейка б) и смесей ячеек 2 и 3 ( $U_0 = 100$  В). [16]

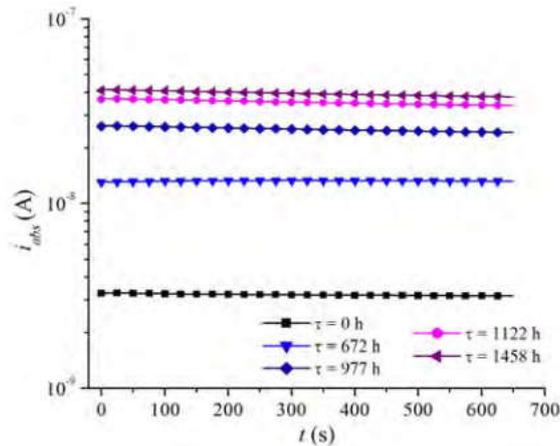


Рисунок 13 Изменение тока поглощения в зависимости от времени, измеренное на образцах из ячейки 2, подвергнутых термическому старению при  $T = 155$  °С для различных периодов старения ( $U_0 = 100$  В). [16]

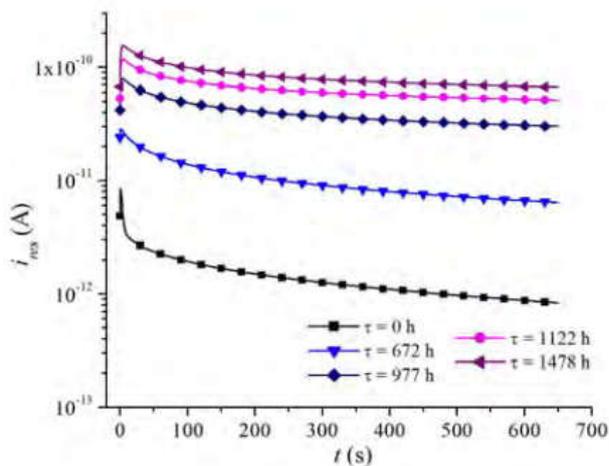
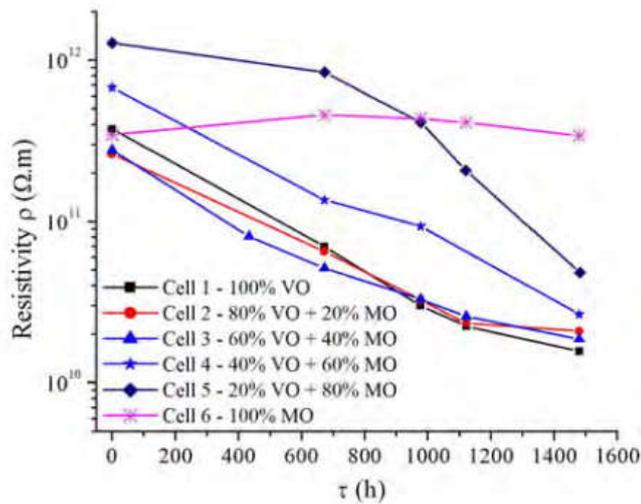
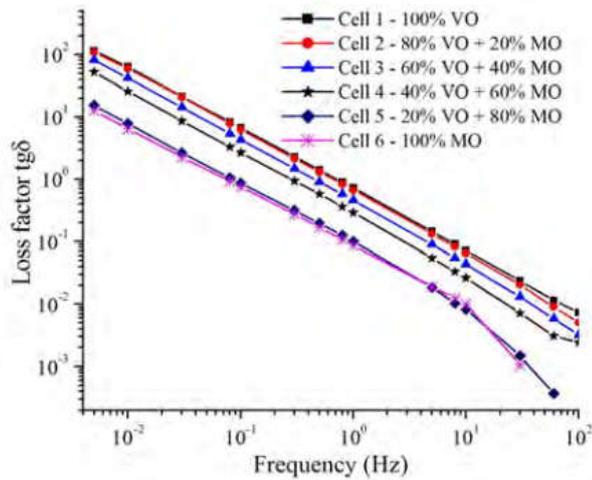


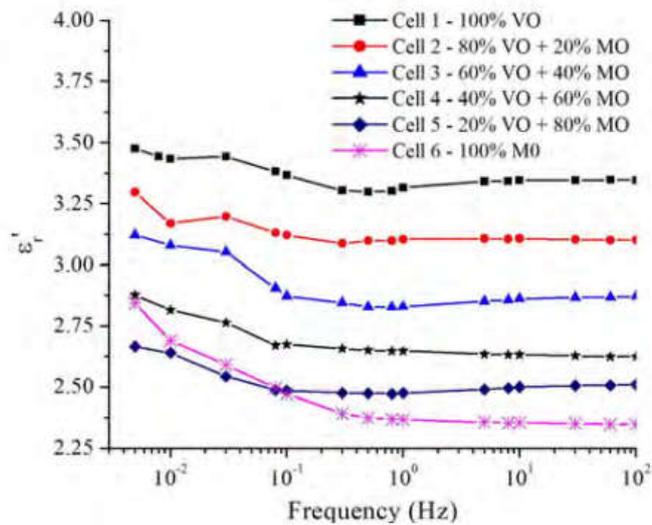
Рисунок 14 Изменение тока резорбции как функция времени, измеренное на образцах из ячейки 2, подвергнутых термическому старению при  $T = 1550$  °С [16]



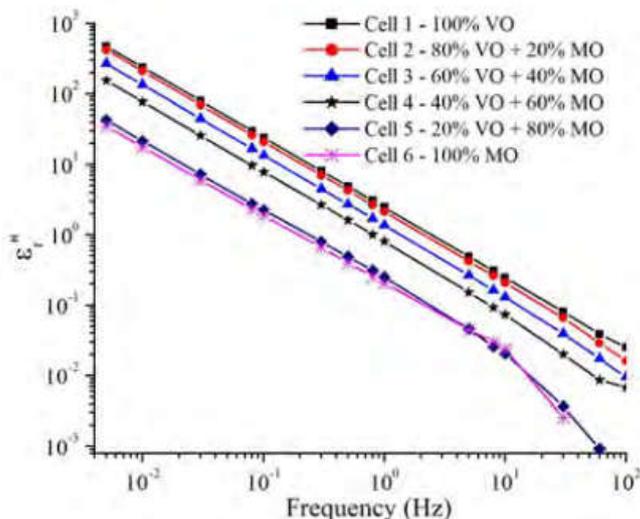
**Рисунок 15** Изменение удельного сопротивления термически состаренных образцов VO, MO и смесей масел (ячейки 1-6) в зависимости от времени старения ( $U_0 = 100$  В). [16]



**Рисунок 16** Изменение коэффициента диэлектрических потерь tgδ в зависимости от частоты для термически состаренных образцов ячеек 1-6 (= 433 ч при  $T = 155$  ° C). [16]



**Рисунок 17** Изменение действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  в зависимости от частоты для кондиционированных (несостаренных) образцов ячеек 1-6. [16]



**Рисунок 18** Изменение мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$  в зависимости от частоты для термически состаренных образцов ячеек 1-6 (= 433 ч при  $T = 155^\circ \text{C}$ ). [16]

Полученные результаты свидетельствуют о том, что смеси растительных и минеральных масел имеют основные диэлектрические свойства, близкие к свойствам чистых масел. Более того, поведение этих смесей при термическом старении аналогично тому, что наблюдается для чистых масел. Таким образом, как для заправки старых трансформаторов, так и для заправки новых,

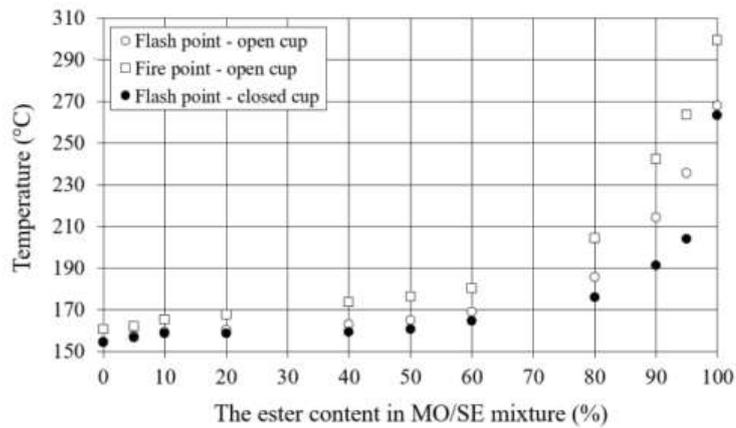
использование смесей минеральных и растительных масел представляется жизнеспособным решением, по крайней мере, с точки зрения диэлектрических свойств.

#### 1.5.4 Вопрос пожароопасности смесей минерального масла и синтетической эфирной жидкости [17]

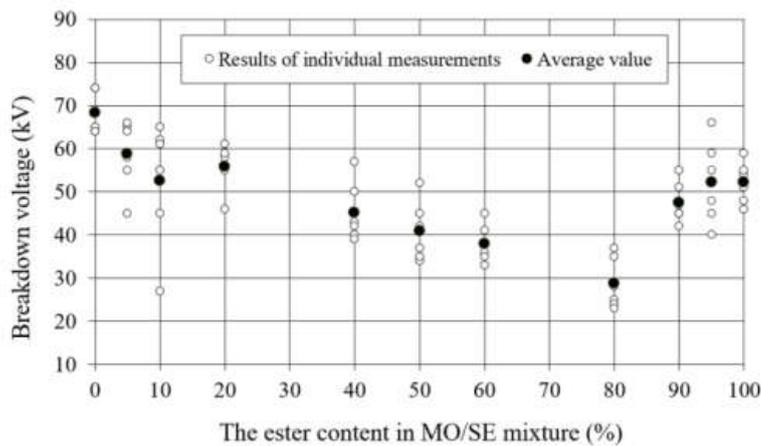
Получены следующие результаты (Таблица 2):

Proportion of mineral oil and synthetic ester		Flash point (closed cup)	Flash point (open cup)	Fire point (open cup)	Net calorific value
O	SE	°C	°C	°C	MJ·kg <sup>-1</sup>
100%	0%	154.5±1	154.7±1	160.6±1	42.2±0.6
95%	5%	156.7±1	157.3±1	162.0±2	40.9±0.7
90%	10%	158.7±1	159.2±1	165.2±1	40.6±0.2
80%	20%	158.7±1	160.3±1	167.7±2	39.3±0.7
60%	40%	159.4±1	163.0±1	173.7±2	37.0±0.2
50%	50%	160.7±2	165.0±1	176.3±1	36.0±0.2
40%	60%	164.7±1	169.0±1	180.3±2	35.0±0.5
20%	80%	176.1±2	185.6±2	204.2±2	33.3±0.6
10%	90%	191.4±1	214.2±2	242.2±2	31.9±0.2
5%	95%	204.1±2	235.6±1	263.6±1	31.3±0.1
0%	100%	263.2±2	268.1±2	299.1±1	31.0±0.4

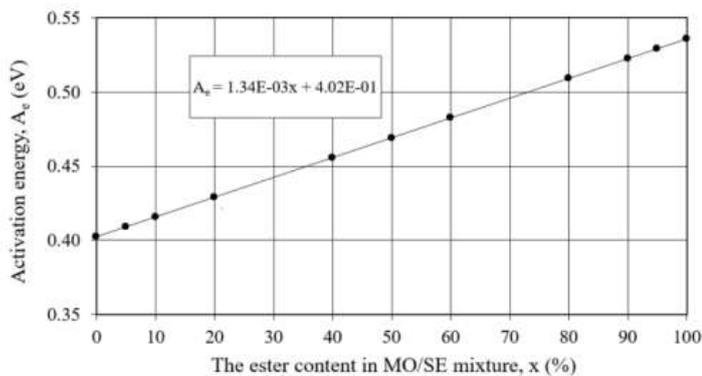
**Таблица 2 Результаты точки вспышки, точки пожара и нетто калорифического значения смесей минерального масла (mo) и синтетического эфира (se) [17]**



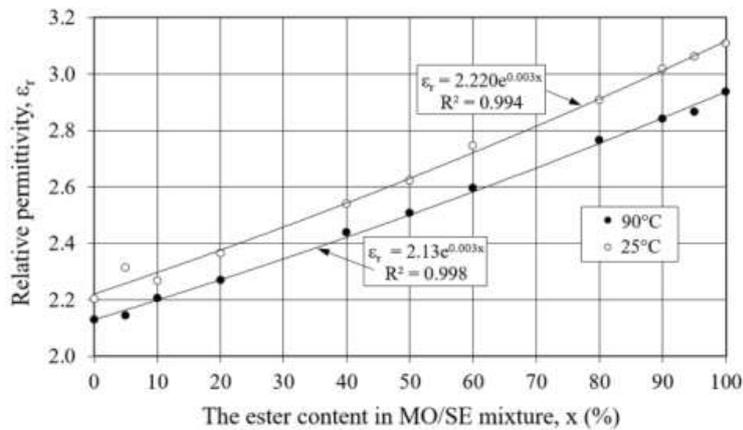
**Рисунок 19** Температура вспышки и точка воспламенения смесей минеральное масло / синтетический эфир в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]



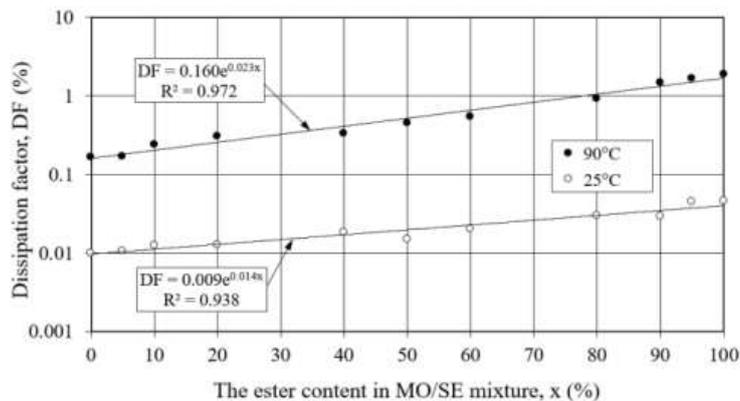
**Рисунок 20** Напряжение пробоя смесей минеральное масло / синтетический эфир в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]



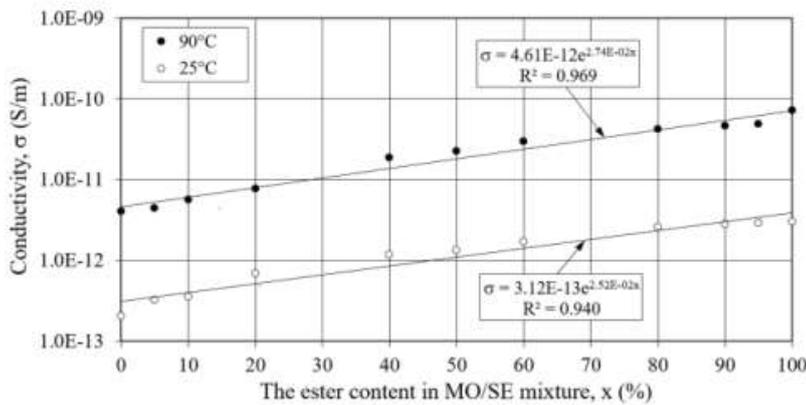
**Рисунок 21 Энергия активации определяется на основе коэффициента рассеяния в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]**



**Рисунок 22 Относительная диэлектрическая проницаемость смесей минеральное масло / синтетический эфир в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]**



**Рисунок 23 Коэффициент рассеяния смесей минеральное масло / синтетический эфир в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]**



**Рисунок 24 Электропроводность смесей минеральное масло / синтетический эфир в зависимости от содержания сложного эфира в смеси. [17]**

На основе измерений было обнаружено, что может наблюдаться значительное увеличение температуры вспышки и точки воспламенения смесей минеральное масло / синтетический сложный эфир (Рисунок 19), для которых процентное содержание синтетического сложного эфира больше или равно 80%. Кроме того, с увеличением содержания сложного эфира в смесях минерального масла / синтетического эфира температуры вспышки и воспламенения повышаются. С увеличением содержания сложного эфира в смесях минеральное масло / синтетический сложный эфир разница между температурой вспышки, определенной методом закрытого и открытого тигля, увеличивается. Было показано, что с увеличением содержания сложного эфира в смеси масло / сложный эфир низшая теплотворная способность уменьшается линейно. Напряжение пробоя смеси масло / сложный эфир сначала снижается с увеличением содержания сложного эфира примерно до 80% (Рисунок 20). Когда это значение превышает, напряжение пробоя смеси быстро увеличивается. Зависимость между электрическими свойствами (коэффициентом рассеяния, относительной диэлектрической проницаемостью и проводимостью) и содержанием сложного эфира в смеси является экспоненциальной (Рисунок 22-24). Энергия активации, рассчитанная на основе приближенных зависимостей DF

и от содержания сложного эфира в смеси, в обоих случаях является линейной и варьируется от энергии активации минерального масла до энергии активации сложного эфира (Рисунок 21).

### 1.5.5 Характеристики смесей минерального масла Shell Diala B и сложного эфира – пальмового масла [18]

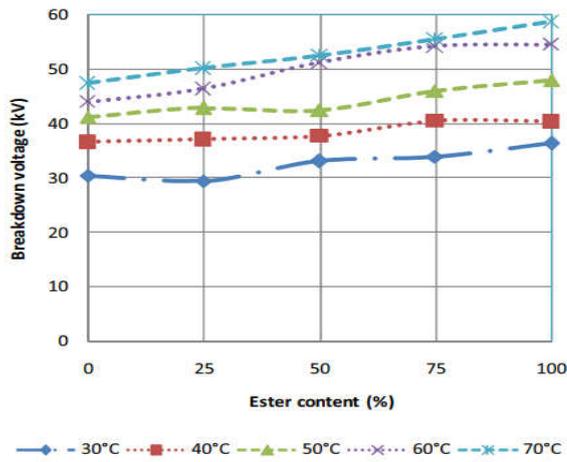


Рисунок 25 Зависимость напряжения пробоя от содержания эфира [18]

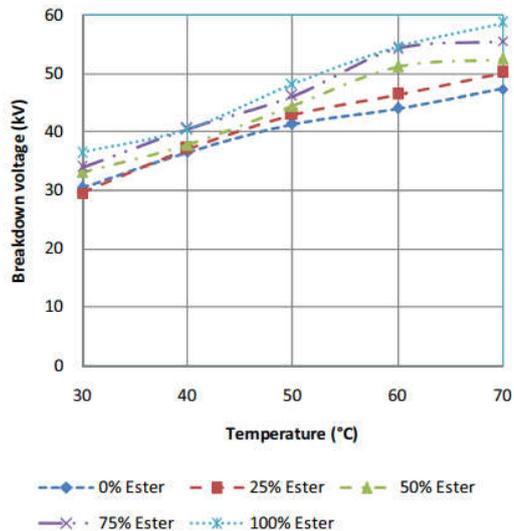
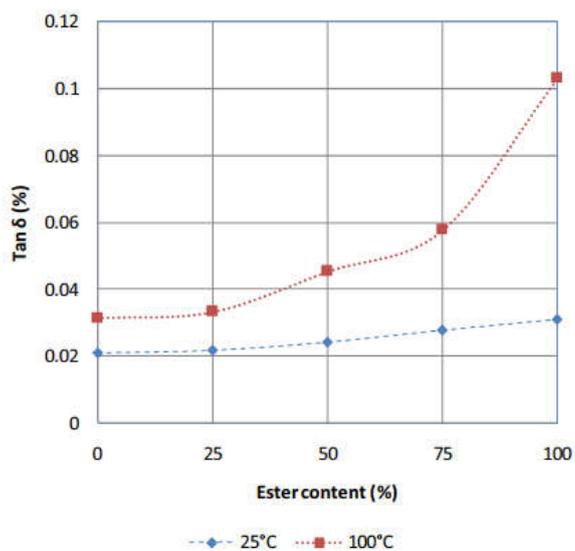
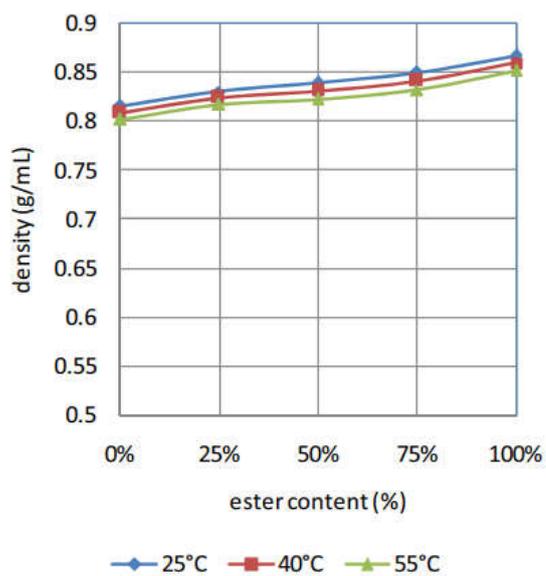


Рисунок 26 Зависимость напряжения пробоя от температуры [18]



**Рисунок 27** Зависимость коэффициента диэлектрических потерь ( $\tan\delta$ ) от содержания сложного эфира [18]



**Рисунок 28** Зависимость плотности масляной смеси от содержания эфиров [18]

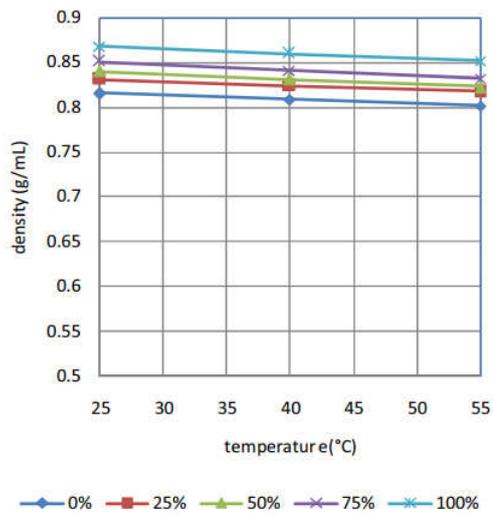


Рисунок 29 Зависимость плотности масляной смеси от температуры [18]

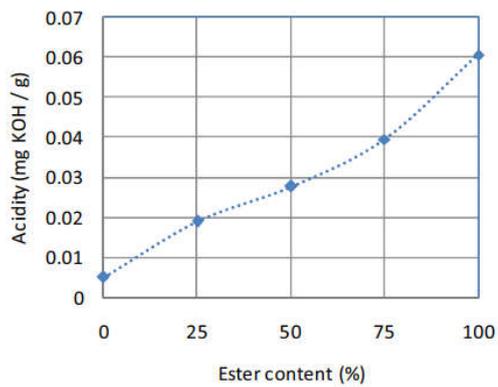
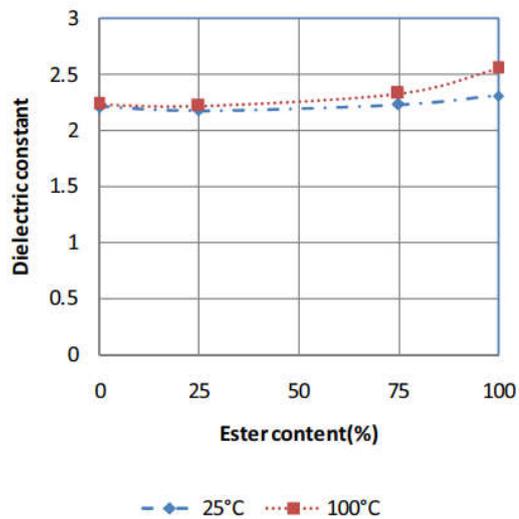


Рисунок 30 Кислотность как функция содержания эфира [18]

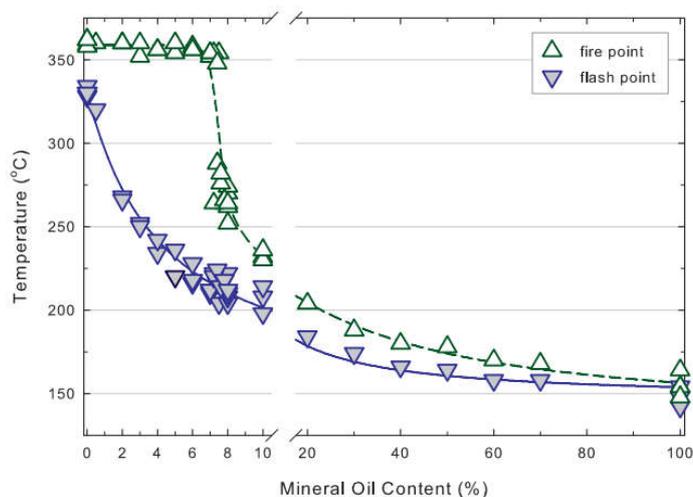


### Рисунок 31 диэлектрическая проницаемость как функция содержания эфира [18]

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. Свойства смеси минерального масла и натурального эфира пальмового масла в целом сильно зависят от содержания сложного эфира. Увеличение содержания эфира значительно усиливает пробой диэлектрика (Рисунок 25,26). Увеличение содержания эфира также приводит к увеличению коэффициента потерь, особенно при температуре 100 °С (Рисунок 27,31). Вязкость и плотность смеси немного увеличиваются с увеличением содержания эфира, но значительно уменьшаются с увеличением температуры (Рисунок 28,29). Кислотность масляных смесей практически линейно возрастает с увеличением содержания эфиров (Рисунок 30). Принимая во внимание требования стандарта, смесь натурального эфира пальмового масла и минерального масла с содержанием эфира 50% считается достаточно хорошей для использования в качестве изоляционной жидкости высокого напряжения.

#### 1.5.6 Характеристики образцов смесей минерального масла и сложного эфира Envirotemp FR3

Ниже дана зависимость температур возгорания и вспышки от процентного содержания диэлектрических жидкостей в смеси.[19]



**Рисунок 32 Изменение температуры воспламенения и температуры воспламенения жидкости Envirotemp™ FR3™ при обычном содержании трансформаторного масла. [19]**

Из зависимости, указанной на Рисунке 32 можно сделать вывод о том, что температура воспламенения и вспышки смеси значительно увеличиваются с ростом концентрации сложного эфира.

**1.5.7 Исследование термического старения бумажно-масляной изоляции (минеральное масло, а также смесь с натуральным эфиром) [20]**

Цвет масла - важная качественная характеристика самого масла. В некоторых случаях цвет масла может указывать на степень его порчи. На Рисунке 33 показаны фотографии образца бумажной изоляции из минерального масла и смешанной масляно-бумажной изоляции, выдержанных при 110°C в течение разного времени. Новое минеральное масло было ярким и прозрачным. Новое смешанное изоляционное масло имеет желтый цвет из-за цвета натурального эфира (оливкового масла). Минеральное масло сначала стало коричневым, затем коричнево-красным, а смешанное изоляционное масло стало зеленым. Изменение скорости цвета масла может отражать скорость старения масла. Скорость изменения цвета минерального масла значительно выше, чем у смешанного изоляционного масла в процессе термического старения. Кроме того, при отборе проб через 174 и 264 дня на внешней поверхности изоляционной бумаги и стенках колбы с образцом изоляции из минерального масла и бумаги были видны отложения. В то время как в образце смешанной бумажно-масляной изоляции при любых интервалах отбора проб осадок не образуется.



(a) Mineral oil

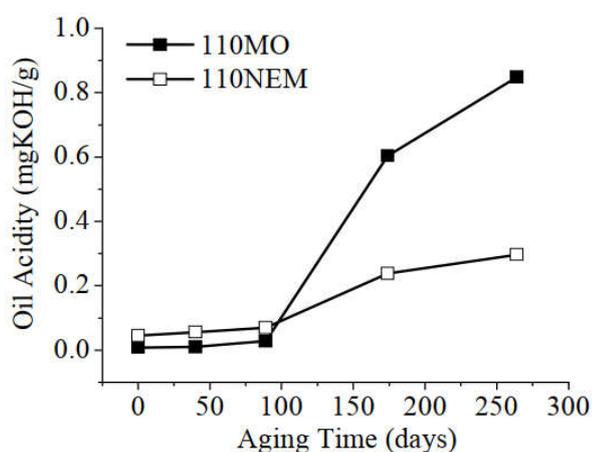


(b) Mixed insulating oil

**Рисунок 33 Цвета минерального масла (а) и смеси масел (б) при термическом старении 110 °С (слева направо - старение 0, 40, 89, 174, 264 дня) [20]**

Кислотность масла. В качестве прямого параметра, отражающего степень старения изоляционного масла, была измерена кислотность смешанного изоляционного масла и минерального масла в процессе старения. На Рисунке 34 показана зависимость кислотности смешанного изоляционного масла и минерального масла от времени старения. В нормальных условиях кислотность натурального эфира выше, чем у минерального масла [21]. Смешанное изоляционное масло состоит из 20% натурального эфира и 80% минерального масла. Следовательно, кислотность нового смешанного изоляционного масла немного выше, чем кислотность нового минерального масла. Неудивительно, что кислотность смешанного изоляционного масла и минерального масла повышается с увеличением времени выдержки. Однако на начальном этапе эксперимента по старению смешанное изоляционное масло и минеральное масло старели очень

медленно. Кислотность двух масел лишь немного увеличилась по величине. После выдержки в течение некоторого времени два масла состарились еще больше, кислотность смешанного изоляционного масла и минерального масла быстро увеличилась. Однако стоит отметить, что кислотность смешанного изоляционного масла значительно ниже, чем у минерального масла после выдержки в течение 89 дней. Это указывает на то, что смешанное изоляционное масло имеет лучшую антиокислительную способность, чем минеральное масло, в течение длительного периода старения, что приводит к более медленной скорости старения смешанного изоляционного масла и более низкой кислотности масла.

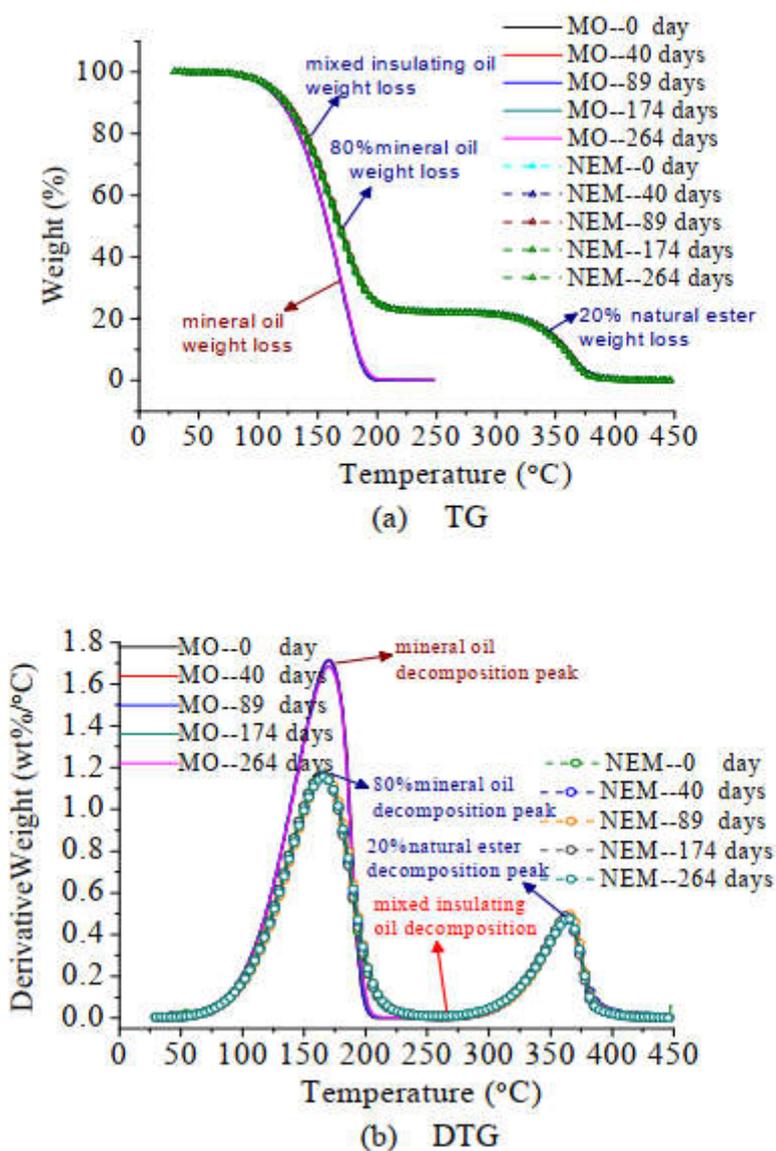


**Рисунок 34 Кислотность масла в процессе термического старения при 110 ° С [20]**

На Рисунке 35 показаны кривые ТГ (термогравиметрия) и ДТГ (дифференциальная термогравиметрия) смешанного изоляционного масла и минерального масла в образцах масляно-бумажной изоляции, состаренных в разное время. Реакция разложения минерального масла в основном одностадийная, тогда как смешанное изоляционное масло в основном состоит из двух стадий. Это связано с смешанным изоляционным маслом, состоящим из минерального масла и натурального эфира. Как показано на Рисунке 35, разложение минерального масла в основном происходит при температуре от 100 ° С до 200 ° С. В смешанном изоляционном масле от 30 ° С до 250 ° С наблюдается

разложение только минерального масла, а его масса снижается со 100% до 20%. Затем при температуре от 250 ° C до 450 ° C компоненты природного сложного эфира в смешанном изоляционном масле теряют массу. Из этого можно сделать вывод, что термостойкость натурального эфира намного лучше, чем у минерального масла. В таблице 2 показаны данные TG / DTG смешанного изоляционного масла и минерального масла в масляно-бумажных изоляционных системах, выдержанных в течение разного времени при скорости нагрева 3 ° C / мин. Начальная температура разложения (IDT) всех образцов минерального масла колебалась в пределах 1 ° C. Начальная температура разложения (IDT) компонента минерального масла в смешанных образцах изоляционного масла также колебалась в пределах 1 ° C, а начальная температура разложения (IDT) компонент природного сложного эфира в смешанных образцах изоляционного масла колебался в пределах 1,5 ° C. Однако начальная температура разложения натурального эфира примерно в 2,5 раза выше, чем у минеральных масел в любое время отбора проб. Контраст между тепловым поведением этих двух групп масел более заметен на кривых DTG, как показано на Рисунке 35 (b). Температура при максимальной скорости разложения (TMDS) всех образцов минерального масла, а также минерального масла и компонента природного сложного эфира в смешанных образцах изоляционного масла очень незначительно изменяется в процессе старения. Но температура при максимальной скорости разложения натурального эфира более чем в два раза выше, чем у минеральных масел. Кроме того, максимальная скорость разложения (MDS) всех образцов минерального масла и компонента минерального масла в смешанных образцах изоляционного масла немного уменьшается с увеличением времени старения, в то время как MDS компонента природного сложного эфира в смешанных образцах изоляционного масла почти не снижается. изменится при увеличении времени старения. Из Рисунка 35 видно, что IDT и TMDS природного сложного эфира намного выше, чем у минерального масла в любое время отбора проб.

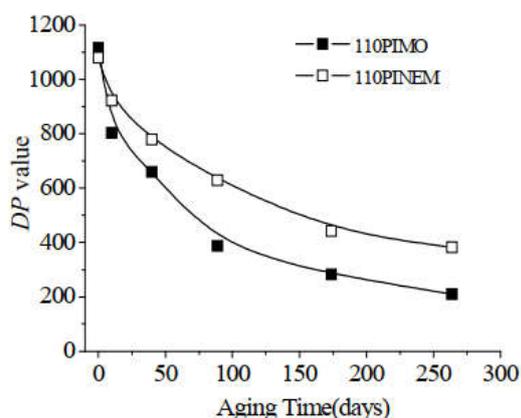
Термическая стабильность натурального эфира в процессе старения выше, чем у минерального масла. Смешанное изоляционное масло состоит из натурального сложного эфира и минерального масла, отличная термическая стабильность натурального сложного эфира может помочь улучшить термическую стабильность смешанного изоляционного масла.



**Рисунок 35** ТГ и ДТГ (при скорости нагрева 3 °С / мин) масла в процессе термического старения при 110 °С

Степень полимеризации (DP) бумажной изоляционной бумаги в основном состоит из целлюлозы. Целлюлоза состоит из линейных полимерных цепей

циклических звеньев  $\beta$ -D-глюкопиранозы. Количество таких звеньев в цепи называется DP [22, 23], что используется для обозначения состояния старения целлюлозной бумаги. Новая бумага имеет DP около 1200. Принято считать, что когда DP упал примерно до 200, прочность на разрыв бумаги упала до 20% от его первоначального значения, силы между волокнами уменьшились и целлюлоза в трансформаторе бумага подошла к концу [23]. На Рисунке 36 показано значение DP бумаги, выдержанной в смешанном изоляционном масле и минеральном масле при 110 °C в течение 264 дней. Можно видеть, что значение DP бумаги, выдержанной в смешанном изоляционном масле, очевидно выше, чем у бумаги, выдержанной в минеральном масле, особенно после 40 дней старения. Это означает, что смешанное изоляционное масло может эффективно сдерживать разрушение изоляционной бумаги.



**Рисунок 36 DP крафт-бумаги в процессе термического старения при 110 °C**

Начальная температура разложения (IDT) бумаги, выдержанной в минеральном масле и смешанном изоляционном масле, увеличивается со временем старения вначале, а затем падает. Примечательно, что после выдержки в течение 174 дней IDT PINEM выше, чем PIMO. В течение всего процесса ускоренного старения при 110 °C DP состаренной бумаги в смешанном изоляционном масле выше, чем выдержка в минеральном масле. Температура при максимальной скорости разложения (TMDS) PIMEM почти выше, чем для PIMO

после старения в одно и то же время, а максимальная скорость разложения (MSD) PINEM также почти меньше, чем для PIMO после старения в то же время (только PINEM после 174 дней старения, его MSD немного выше, чем PIMO после 174 дней старения). Из всего вышесказанного следует, что термические свойства бумаги, выдержанной в смешанном изоляционном масле, лучше, чем у минерального масла.

Результаты показывают, что смешанное изоляционное масло может улучшить антивозрастные свойства бумажно-масляной изоляционной системы. Смешанное изоляционное масло может ограничить разрушение изоляционной бумаги. Термическая стабильность бумажно-масляной изоляционной системы также может быть улучшена за счет использования смешанного изоляционного масла.

В работе [24] также показано, что улучшение характеристик силовых трансформаторов может быть достигнуто за счет улучшения характеристик изоляционной жидкости. В этом смысле кажется, что смесь минерального масла / 20% синтетического эфирного масла является хорошим компромиссом для получения жидкости, которая работает лучше, чем одно минеральное масло. Действительно, эта смесь дает небольшое изменение вязкости, более высокий BDV и лучшую стабильность к старению, чем одно минеральное масло, а также умеренное усиление эффекта ЕСТ. Таким образом, можно либо повысить надежность существующих силовых трансформаторов, либо уменьшить размер (и цену) новых силовых трансформаторов за счет использования меньших изоляционных промежутков. В этом документе также подчеркивается, что: (i) «закон смеси» не применим для оценки свойств «смеси» из-за химических взаимодействий или таких параметров, как содержание воды для BDV; (ii) каждая жидкость имеет одно преимущество по сравнению с другими, то есть минеральное масло является наиболее эффективным для передачи тепла,

синтетическое эфирное масло имеет хороший BDV, а силиконовое масло окисляется медленнее. [24]

### **1.5.8 Исследование влияния типа диэлектрической жидкости на скорость старения бумаги**

Данный процесс был исследован в [25]. Результат показывает, что целлюлозная бумага, пропитанная жидкостью РКОАЕ, демонстрирует более медленную скорость термического разложения по сравнению с целлюлозной бумагой, пропитанной минеральным маслом при аналогичных условиях старения. Жидкая бумага на основе сложного эфира РКОАЕ также стареет медленнее, чем бумага на основе сложного эфира FR3. Ограниченные двойные связи в структуре жидкости на основе сложного эфира РКОАЕ могли повлиять на механизм старения жидкости и крафт-бумаги. Скорость снижения прочности на разрыв жидкой бумаги на основе сложного эфира РКОАЕ в условиях старения значительно ниже. Крафт-бумага, пропитанная флюидом на основе сложного эфира РКОАЕ, имеет более высокую характеристическую прочность на разрыв, и, по-видимому, не произошло значительного изменения значения прочности на разрушение образцов состаренной бумаги в течение изученного времени старения. Использование недавно разработанной жидкости на основе сложного эфира РКОАЕ в качестве альтернативной изолирующей жидкости в силовом трансформаторе продлит срок службы целлюлозной изоляции оборудования и тем самым продлит срок службы изоляции оборудования [25].

### **1.6 Сравнительные характеристики трансформаторных масел, применяемых в исследованиях**

Масло ГК считается высококачественным трансформаторным маслом с длительным сроком службы, а также данное масло является самым распространённым в части применения в энергетике Российской Федерации. Главная особенность масла ГК - хорошая восприимчивость масла к воздействию

антиокислительной присадки АГИДОЛ-1 (ионол), при уменьшении содержания данной присадки происходит стремительное ухудшение эксплуатационных характеристик. Эта особенность повышает актуальность мероприятий по улучшению эксплуатационных качеств масел марки ГК путём добавления присадки АГИДОЛ-1, в особенности, при длительном сроке службы. Обычно масло ГК используется в чистом виде без смешивания с другими видами масел. По некоторым данным, смешивание масла ГК с жидкостями худшего качества даже в небольших пропорциях способно значительно снизить его качество. Масло ГК можно смешивать с другими маслами, если они отличаются высокой стабильностью к окислению.

Наиболее рациональная эксплуатация масла ГК получается при смешивании с маслами марок ТКп, ВГ, Т-750, Т-1500, и Nuro. Однако, с другой стороны, благодаря высокой термоокислительной устойчивости и хорошим эксплуатационным характеристикам масла ГК, широко практикуется доливка его в масла других марок, с худшими свойствами.

К примеру, если в высоковольтных вводах трансформатора использовалось масло марки Т-750, то добавление масла марки ГК допустимо, но не более, чем на 20% от сего объёма. При превышении данного процента, допустимость добавления масла ГК определяется по итогам результатов теста на совместимость.

Далее будут приведены характеристики диэлектрических жидкостей, используемых нами в исследованиях:

- 1) Масло ГК

Масло ГК [26]

---

Кинематическая вязкость, мм<sup>2</sup>/с

50°С

9

---

$40^{\circ}\text{C}$	12
$-30^{\circ}\text{C}$	1200
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, $^{\circ}\text{C}$	135 $^{\circ}\text{C}$
Температура текучести, $^{\circ}\text{C}$	не выше -45
Кислотное число, мг КОН/г масла	не более 0,01 мг КОН/г масла
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 $^{\circ}\text{C}$ , %	не более 0,5
Напряжение пробоя после подготовки пробы, кВ	не менее 70 кВ
Стабильность против окисления (155 $^{\circ}\text{C}$ , 14ч, 50 мл/мин),  <i>летучие низкомолекулярные кислоты, мг КОН/г масла</i>	не более 0,04
<i>массовая доля осадка, %</i>	не более 0,015
<i>кислотное число окисленного масла, мг КОН/г масла</i>	не более 0,1

## 2) Масло Т1500У

Т-1500у [26]

Кинематическая вязкость, мм<sup>2</sup>/с

<i>40°C,</i>	11
<i>-30°C,</i>	1300
Температура застывания, °С не выше	- 45
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,01
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90°C, не более	0,5
Стабильность против окисления (155°C, 14ч, 50 мл/мин), <i>летучие низкомолекулярные кислоты, мг КОН/г</i>	не более 0,07
<i>массовая доля осадка, %</i>	0,015
<i>кислотное число окисленного масла, мг КОН/г</i>	0,15

## 3) Диэлектрическая жидкость Midel 7131 [26]

Наименование параметра	Значение
Марка масла	MIDEL 7131
Плотность при 20°C	0,97
Кинематическая вязкость при - 20°C	1400
Кинематическая вязкость при 40°C	28
Температура вспышки	260
Температура воспламенения	316

Кристаллизация	Кристаллы отсутствуют
Температура застывания	-60
4) Диэлектрическая жидкость Midel eN [26]	
Наименование параметра	Значение
Марка масла	MIDEL eN
Плотность при 20°C	0,92
Кинематическая вязкость при 0°C	232
Кинематическая вязкость при 40°C	37
Кинематическая вязкость при 100°C	9,3
Температура вспышки	327
Температура воспламенения	360
Температура застывания	-31
5) Диэлектрическая жидкость Софэксил ТСЖ [26]	
Наименование параметра	Значение
Марка масла	Жидкость для трансформаторов «Софэксил-ТСЖ»
Плотность при 25°C	0,962

Кинематическая вязкость при $-50^{\circ}\text{C}$ , не выше	480
Кинематическая вязкость при $25^{\circ}\text{C}$ , не выше	54
Кинематическая вязкость при $100^{\circ}\text{C}$ , не ниже	12
Температура вспышки, не менее	300
Тангенс угла диэлектрических потерь, при $25^{\circ}\text{C}$ , 50 Гц, не более	0,0001
Электрическая прочность (пробивное напряжение) при частоте 50Гц, зазор 2,5 мм, кВ, не менее	35
Температура застывания, не выше	-60

Задача смешивания трансформаторных масел достаточно сложна и не имеет однозначной схемы. Однако, проведение измерений и исследований может однозначно утвердить или опровергнуть рациональность изготовления той или иной смеси. В ряде случаев, при смешивании масел достигаются лучшие результаты эксплуатационных характеристик, чем у каждого отдельно взятого компонента.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Синтетические диэлектрические жидкости являются является многообещающей альтернативой минеральным трансформаторным маслам, позволяющей существенно повысить пожаробезопасность оборудования, а также обеспечить защиту окружающей среды. По сравнению с минеральными маслами синтетические диэлектрические жидкости, в частности, полиметилсилоксановая (силиконовая) трансформаторная жидкость (ПМС), широко используемые в настоящее время в разных странах мира, имеет более высокую температуру воспламенения, взрывобезопасны, нетоксичны и не представляют опасности для окружающей среды.

Известно, что синтетический эфир MIDEЛ 7131 или натуральный эфир MIDELeN могут растворять некоторое количество влаги с образованием истинного раствора, практически не ухудшающего диэлектрических свойств жидкостей. Поэтому добавка указанных диэлектрических жидкостей в минеральное масло, залитое в силовой трансформатор, может улучшить диэлектрические свойства возникающей смеси за счет растворения эмульгированной в минеральном масле влаги, а также снизить концентрацию влаги в бумажной обмотке трансформатора. Однако сведения о экспериментальных исследованиях старения таких смесей совместно с электроизоляционной бумагой в литературе практически отсутствуют. Поэтому известные оптимальные значения относительной концентрации диэлектриков в смеси, а также практическая целесообразность их применения при длительной эксплуатации трансформатора остаются экспериментально не подтвержденными.

Совместимость минеральных трансформаторных масел с силиконовыми жидкостями практически не изучена и в литературных источниках характеризуется как «сомнительная». Отсутствие сведений о электрических параметрах таких смесей не позволяет предсказать технические характеристики силового трансформатора после замены минерального масла на силиконовую

жидкость в трансформаторе, ранее находившимся в эксплуатации. Так как оставшееся в трансформаторе после слива и промывки минеральное масло может существенно повлиять на параметры силиконовой жидкости. Поэтому изучение характеристик смесей минеральных масел с силиконовыми жидкостями является актуальным направлением исследований.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время не существует единого чёткого набора испытаний для достаточной оценки диэлектрических жидкостей в электрических трансформаторах. Также с учётом постепенного замещения минеральных жидкостей синтетическими, необходимо изучение взаимодействия и совместимости данных масел друг с другом. Несмотря на то, что на данный момент уже существуют документы, подтверждающие совместимость одних жидкостей с другими, иногда эти документы являются не совсем точными, так как учтены не все аспекты и условия взаимодействия данных жидкостей. Данное исследование является актуальным, так как при замене минерального трансформаторного масла на синтетическую жидкость, после проведения слива минерального масла из трансформатора, в изоляции и обмотках ещё остаётся количество использованной жидкости, достаточное для оказания влияния на качество работы трансформатора с новой силиконовой жидкостью.

**Цель работы:** совершенствование эксплуатационных свойств смесей минеральных трансформаторных масел с синтетическими жидкими диэлектриками – увеличение пробивного напряжения, повышение удельного электрического сопротивления, снижение тангенса угла диэлектрических потерь и увеличение срока службы жидкого диэлектрика посредством оптимизации концентрации составляющих смеси для различного типа трансформаторной бумаги, а также выработка рекомендаций по восстановлению эксплуатационных свойств диэлектрика после смешивания минерального масла с полиметилсилоксановой трансформаторной жидкостью, ухудшающихся вследствие влияния возникающих коллоидных образований.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Измерить пробивное напряжение, удельное электрическое сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь различных типов минеральных масел, синтетических диэлектрических жидкостей и их смесей с различной концентрацией составляющих.
2. Сопоставить экспериментально полученные зависимости электрического сопротивления смесей диэлектрических жидкостей от относительной концентрации составляющих с существующими теоретическими представлениями, в частности, с формулой ван Беека.
3. Оценить изменение сорбционной способности трансформаторной бумаги при ее искусственном старении в смеси различных жидких диэлектриков в зависимости от относительной концентрации составляющих.
4. Измерить параметры флуоресценции используемых диэлектрических жидкостей в отдельности, а также в виде смеси с различными концентрациями и оценить возможность применения методов флуоресцентной спектроскопии для определения относительной концентрации исследуемых жидкостей в смеси.
5. Сопоставить изменение электрических и оптических свойств смесей, в частности, для смесей ПМС жидкостей и минеральных масел исследовать изменение указанных выше свойств во времени, а также после нагрева смеси.
6. Выявить характерные особенности свойств смесей диэлектрических жидкостей, определить оптимальные концентрации составляющих смесей для достижения наилучших эксплуатационных характеристик при их использовании в силовых трансформаторах, а также найти способы минимизации или устранения вредного влияния возникающих коллоидных формирований на электроизоляционные свойства смесей минеральных масел с силиконовыми трансформаторными жидкостями.

## Глава 2. Методика измерений

Были проведены измерения основных электрических и оптических параметров диэлектрических жидкостей: удельного электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, пробивного напряжения, оптического затухания, прозрачности и спектра флуоресценции образцов. Также описана методика подготовки образцов, состоящих из смесей диэлектрических жидкостей в различной концентрации.

Исследования были выполнены на различных типах трансформаторных минеральных масел – ГК, Т1500, ТКп различных производителей, синтетическом эфире MIDEL 7131, натуральном эфире MIDELeN, силиконовых трансформаторных жидкостях «Софэксил-ТСЖ» и ПМС-50 различных производителей, а также их смесях.

Измерение пробивного напряжения диэлектрических жидкостей производилось на установке АИМ-80, используя стандартную испытательную ячейку 6ДЕ.539.000 в соответствии со стандартами ГОСТ Р МЭК 60156 – 2013 и ГОСТ 6581-75. Очистка испытательной ячейки и подготовка испытуемой жидкости к измерениям выполнялась в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60156 – 2013.

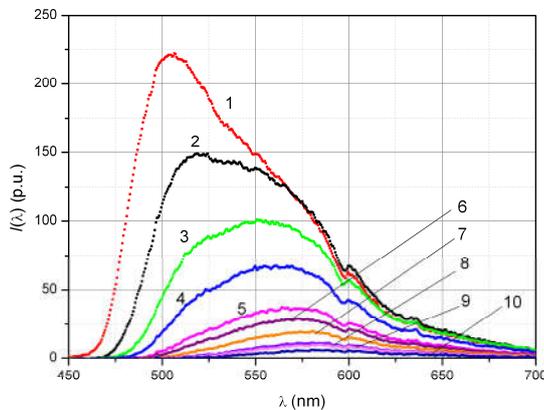
Измерения тангенса угла диэлектрических потерь были выполнены с использованием двухэлектродной ячейки по ГОСТ 6581-75 и прибора МЕР-5СА, который работает на принципе моста Шеринга на частоте 50 Гц. Измерения электрического сопротивления и токов, протекающих через диэлектрическую жидкость в измерительной ячейке, проводились с помощью указанной выше двухэлектродной ячейки, а также измерительного прибора TeraOhm 10 kV MI 3200. Для минимизации токов абсорбции, измерение проводилось через 1 минуту после приложения напряжения. Для смесей минеральных масел с силиконовыми трансформаторными жидкостями измерения сопротивления производились многократно до достижения стационарного значения – в течение 10-60 минут после смешивания жидкостей.

Спектральные характеристики исследуемых диэлектрических жидкостей были получены с использованием спектрофотометра Avaspec-2048: спектры флуоресценции – при боковом освещении кварцевой кюветы с исследуемой жидкостью излучением полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм, спектры поглощения и пропускания оптического излучения – при сквозном прохождении белого света через кювету с жидкостью, а при малом коэффициенте поглощения – с использованием бокового возбуждения флуоресценции исследуемых жидкостей в кварцевой трубке. Визуальная оценка прозрачности образцов проводилась по ГОСТ 982-80 в стеклянной пробирке диаметром 30 – 40 мм.

### Глава 3.

Данная глава содержит результаты проведённых исследований смесей масла ГК и диэлектрической жидкости MIDEЛ 7131. Были измерены спектры флуоресценции, а также электрическое сопротивление как отдельных жидкостей, так и их смесей в присутствии электроизоляционной бумаги и медного катализатора.

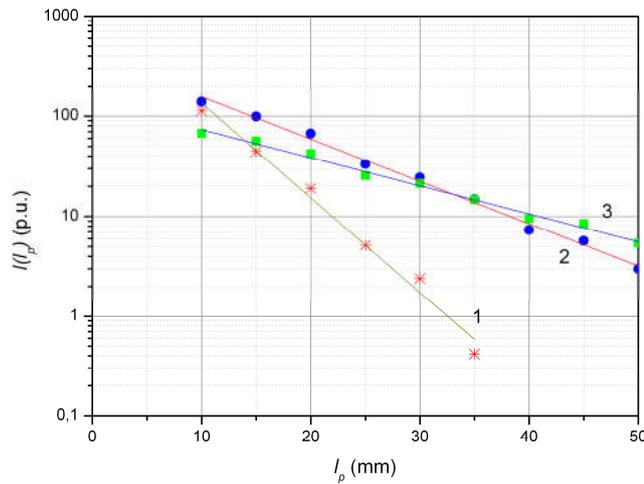
Зависимость 37 соответствует флуоресцентному излучению старого трансформаторного масла, прошедшего в трубке на различное расстояние  $l_p$ . Зависимости для всех исследованных диэлектрических жидкостей имеют одинаковый характер: чем больше излучение прошло расстояние  $l_p$ , тем меньше максимальное значение интенсивности в спектре и меньше полная мощность (что очевидно); чем больше расстояние  $l_p$ , тем больше максимум и энергетический центр спектра смещаются в длинноволновую область видимого света.



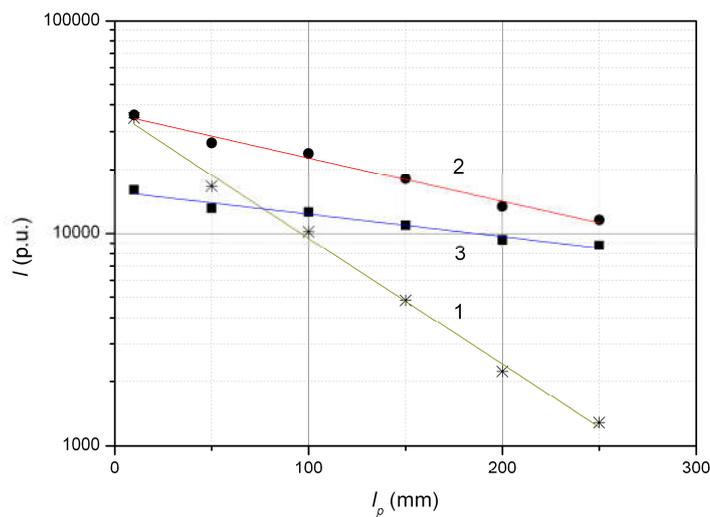
**Рисунок 37** Спектры флуоресценции отработанного масла (марка ГК); пройденное расстояние (в мм): 1 - 5, 2 - 10, 3 - 15, 4 - 20, 5 - 25, 6 - 30, 7 - 35, 8 - 40, 9 - 45, 10 - 50.

Пример полученных зависимостей интенсивности  $I$  от  $l_p$  для отработанного и нового масла приведен на Рисунках 38 и 39. Как видно из графиков, интенсивность флуоресценции нового масла более чем в 100 раз выше, чем

старого. Графики различаются также масштабом по оси абсцисс, поэтому оптическое затухание в двух исследованных образцах масла также имеет существенные различия.

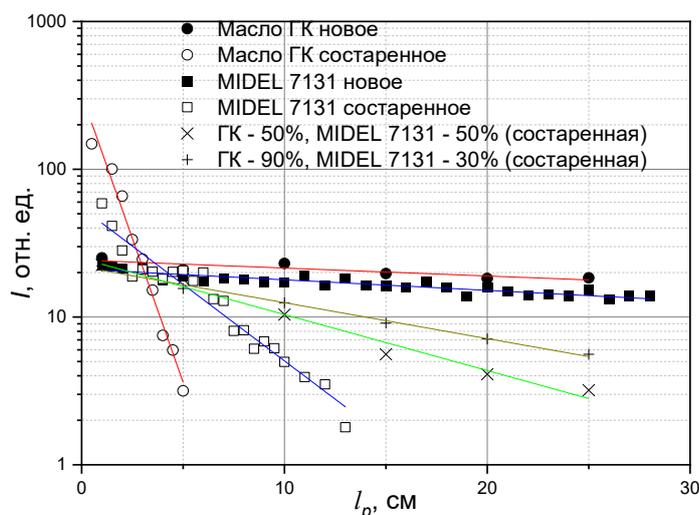


**Рисунок 38 - Логарифмический график зависимости интенсивности от пройденного расстояния на разных длинах волн (отработанное масло): 1 - 500 нм, 2 - 550 нм, 3 - 600 нм.**



**Рисунок 39 - Логарифмический график зависимости интенсивности от пройденного расстояния на разных длинах волн (новое масло): 1 - 400 нм, 2 - 450 нм, 3 - 500 нм.**

Вопрос улучшения характеристик масел путём их смешивания касается в том числе распространённого в России масла ГК, которое в данный момент находится в большей части маслonaполненного оборудования энергосистемы.



**Рисунок 40 - График зависимости интенсивности флуоресценции от пройденного расстояния на разных длинах волн (Масло ГК, жидкость MIDEЛ 7131, а также их смеси)**

По Рисунку 40 можно сделать следующий вывод: смесь ГК90% и MIDEЛ10% имеет большую стойкость к старению (в присутствии катализатора и электроизоляционной бумаги), чем чистое масло ГК без MIDEЛ7131). В связи с этим возникает вопрос о целесообразности добавления жидкости MIDEЛ 7131 в маслonaполненное оборудование для улучшения его свойств и эксплуатационных характеристик.

Интенсивность излучения, прошедшего через рассеивающую и поглощающую среду, с хорошей точностью описывается законом Ламберта-Бугера:

$$I(l_p) = I_0 \exp(-\alpha l_p),$$

где  $I_0$  - интенсивность на входе (в данном случае - когда  $I_p = 0$ ),  $\alpha$  - коэффициент ослабления ( $1 / \text{мм}$  или  $1 / \text{см}$ ). Экспериментально получены следующие значения коэффициента  $\alpha$ : для нового масла - на длине волны 400 нм  $\alpha = 0,137 \pm 0,004 \text{ см}^{-1}$ , 450 нм -  $0,047 \pm 0,003 \text{ см}^{-1}$ , 500 нм -  $0,024 \pm 0,002 \text{ см}^{-1}$ ; для выдержанного масла - при 500 нм  $\alpha = 0,94 \pm 0,06 \text{ см}^{-1}$ , 550 нм -  $0,42 \pm 0,01 \text{ см}^{-1}$ , 600 нм -  $0,28 \pm 0,01 \text{ см}^{-1}$ ; для нового MIDEL7131 при 550 нм -  $\alpha = 0,016 \text{ см}^{-1}$ , для MIDEL, выдержанного в течение 12 ч с катализатором при  $140^\circ\text{C}$  -  $\alpha = 0,23 \text{ см}^{-1}$ . Изменение оптического пропускания диэлектрической жидкости MIDEL7131 на начальных этапах старения невозможно измерить с помощью микрокалориметра МКМФ-1 и большинства спектрометров со стандартными кюветами из-за малой длины оптического пути.

Пусть  $I(\lambda)$  – спектральная плотность мощности излучения флуоресценции, измеряемая спектрометром. Величина  $I(\lambda)$  имеет размерность Вт/м, удобнее использовать единицы измерения мВт/нм. Однако в данной работе измерения были выполнены в произвольных единицах, вследствие того, что нас интересовали относительные изменения спектров. Введем обозначения:  $I_{\text{ГК}}(\lambda)$  и  $I_{\text{MID}}(\lambda)$  – спектральные плотности флуоресценции масла марки ГК ТЦ и натурального эфира MIDEL eN. Тогда, теоретически, предполагая отсутствие взаимного влияния диэлектрических жидкостей на их оптические характеристики, спектр смеси  $I_{\text{mix}}(\lambda)$  должен описываться выражением:

$$I_{\text{mix}}(\lambda) = k_{\text{ГК}} \cdot I_{\text{ГК}}(\lambda) + k_{\text{MID}} \cdot I_{\text{MID}}(\lambda) \quad (1)$$

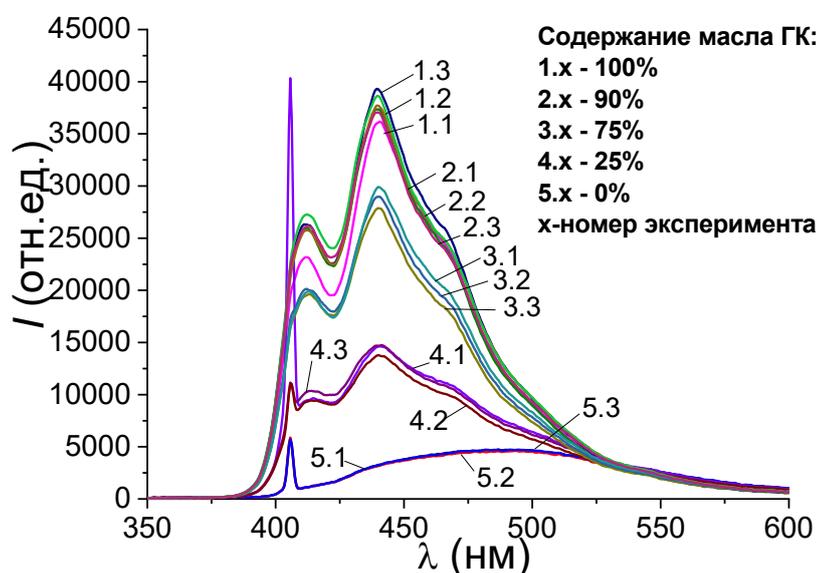
где  $k_{\text{ГК}}$  и  $k_{\text{MID}}$  – коэффициенты, соответствующие относительному содержанию соответствующей жидкости в смеси ( $k_{\text{ГК}} + k_{\text{MID}} = 1$ ).

Однако, как следует из полученных данных (Рисунок 37), выражение (1) дает недостаточно точное описание спектров флуоресценции смесей, вследствие указанного выше эффекта поглощения излучения накачки в измерительной кювете. Введем корректирующие коэффициенты  $a_{\text{ГК}}$  и  $a_{\text{MID}}$  следующим образом:

$$I_{\text{mix}}(\lambda) = k_{\text{ГК}} \cdot a_{\text{ГК}} \cdot I_{\text{ГК}}(\lambda) + a_{\text{MID}} \cdot k_{\text{MID}} \cdot I_{\text{MID}}(\lambda) \quad (2)$$

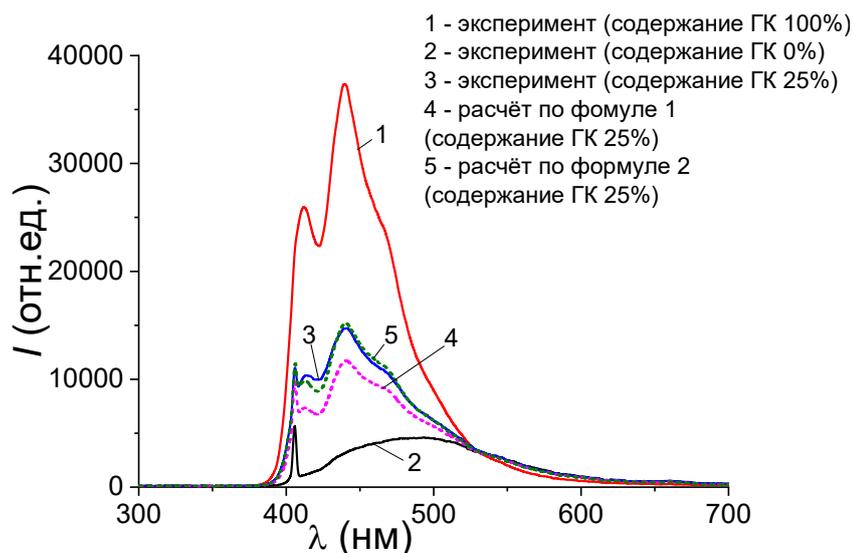
Далее, при обработке экспериментальных данных, можно варьировать коэффициенты  $a_{GK}$  и  $a_{MID}$  для достижения минимального среднего квадратического отклонения аппроксимации (2) и измеренной спектральной плотности  $I_{mix}(\lambda)$ . Хорошее совпадение аппроксимации (2) и экспериментальных данных будет подтверждать правильность выбранного теоретического подхода.

Спектры флуоресценции смесей масла ГК ТЦ и жидкости MIDEL eN, полученные до начала термического старения, приведены на Рисунке 41.

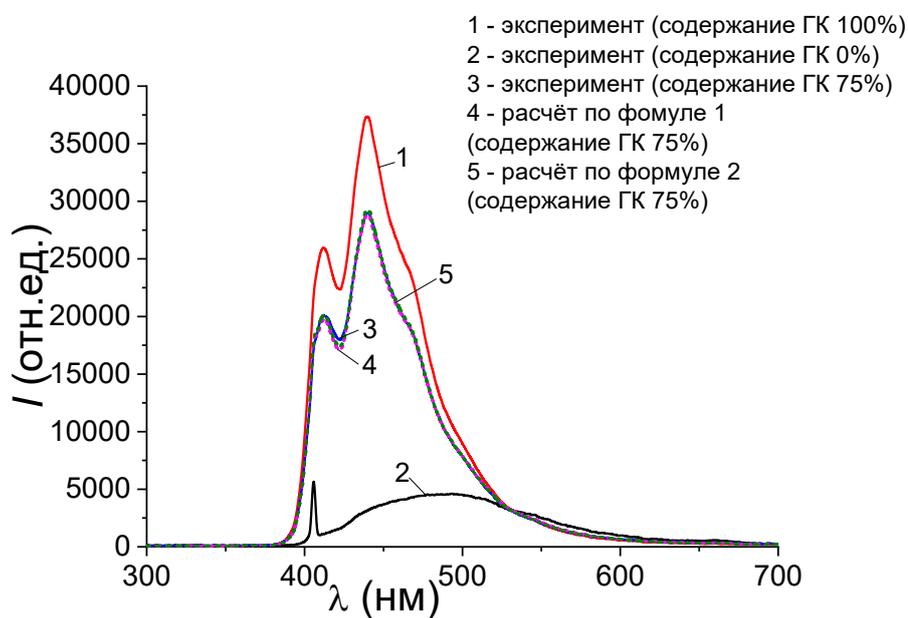


**Рисунок 41** Спектры флуоресценции смеси электроизоляционных жидкостей ГК ТЦ и MIDEL eN. Содержание ГК: 1 – 100%, 2 – 90%, 3 – 75%, 4 – 25%, 5 – 0%. Вторая цифра (1..3) в обозначении – это номер эксперимента.

Были вычислены коэффициенты аппроксимации  $a_{GK}$  и  $a_{MID}$ , при которых достигается минимальное среднеквадратическое отклонение измеренной и расчетной спектральной плотности излучения флуоресценции смесей. В качестве примера на Рисунках 42 и 43 представлены исходные спектральные плотности (непосредственно самих жидкостей), а также экспериментально измеренные и расчетные спектры флуоресценции для смесей жидкостей с концентрацией масла ГК ТЦ 25%, 75%.



**Рисунок 42** Спектры флуоресценции смеси электроизоляционных жидкостей ГК ТЦ и MIDELEON: 1-3 – эксперимент, 4, 5 – расчет (4 – без учета корректирующих коэффициентов, 5 – с учетом коэффициентов); содержание ГК: 1 – 100%, 2 – 0%, 3, 4, 5 – 25%.



**Рисунок 43** Спектры флуоресценции смеси электроизоляционных жидкостей ГК ТЦ и MIDELEON: 1-3 – эксперимент, 4, 5 – расчет (4 – без учета корректирующих коэффициентов, 5 – с учетом коэффициентов); содержание ГК: 1 – 100%, 2 – 0%, 3, 4, 5 – 75%.

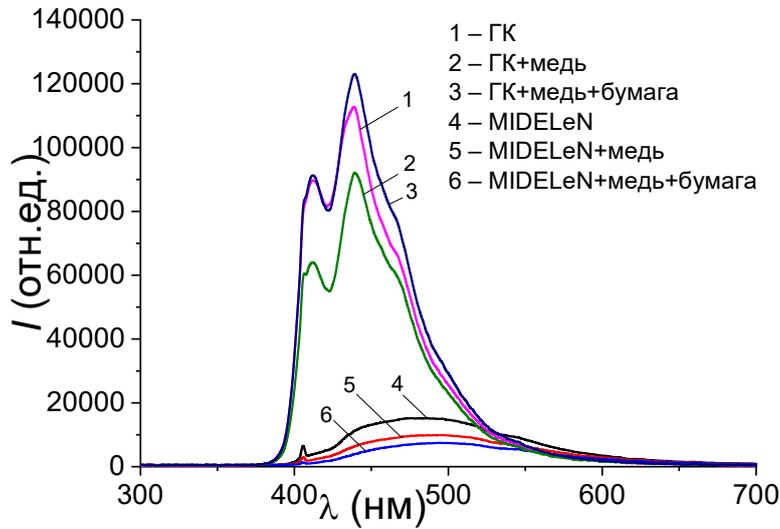
Расчетное значение коэффициентов и полученное значение среднеквадратического отклонения по отношению к среднему значению  $S_0$ ,  $S_1$  (в диапазоне длин волн 300 – 700 нм) приведены в Таблице 1 (величина  $S_0$  – по формуле (1),  $S_1$  – с учетом корректирующих коэффициентов (2)). Как следует из Рисунков 41 и 42, и Таблицы 3, имеет место хорошее совпадение экспериментально измеренных и расчетных данных с учетом корректирующих коэффициентов. То есть, спектр флуоресценции смесей исследованных диэлектрических жидкостей можно представить в виде суммы спектров каждой из жидкостей, но принимая во внимание корректирующие коэффициенты, учитывающие методику измерений.

ГК (%)	Расчетные значения коэффициентов			
	$a_{ГК}$	$a_{MID}$	$S_0$	$S_1$
90	1.15	0.72	$0.9 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
75	1.02	0.85	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
25	1.25..1.45	0.8..0.9	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$

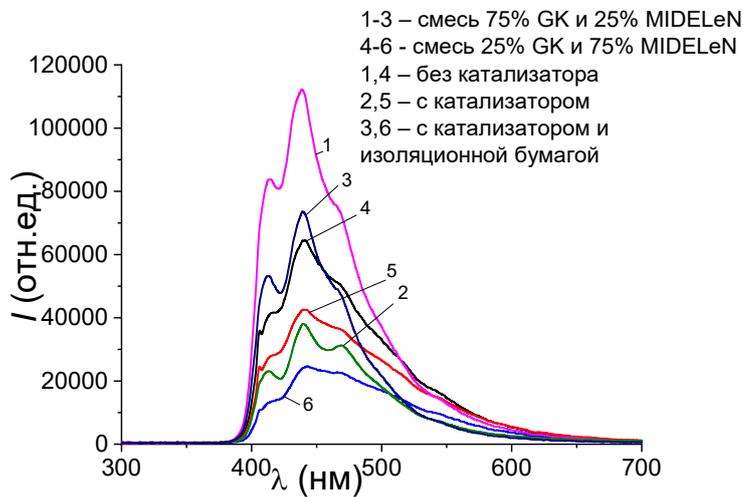
**Таблица 3 – Значение коэффициентов аппроксимации для различных концентраций диэлектрических жидкостей ГК и MIDEL eN**

Было введено определение коэффициента относительной сорбционной активности  $K_{sm}$  электроизоляционной бумаги как отношение максимальных спектральных плотностей излучения флуоресценции диэлектрической жидкости после искусственного старения в присутствии медного катализатора с бумагой и без нее. Чем выше коэффициент  $K_{sm}$ , тем дольше диэлектрические жидкости будут свои свойства в процессе старения (при данном определении – способность к флуоресценции).

Спектры флуоресценции исходных диэлектрических жидкостей, измеренные после 24 часов термического старения, приведены на Рисунках 44 и 45.



**Рисунок 44 - Спектры флуоресценции смеси электроизоляционных жидкостей ГК ТЦ и MIDELeN после 24 часов старения (эксперимент): 1 – ГК, 2 – ГК+медь, 3 – ГК+медь+бумага, 4 – MIDELeN, 5 – MIDELeN+медь, 6 – MIDELeN+медь+бумага**

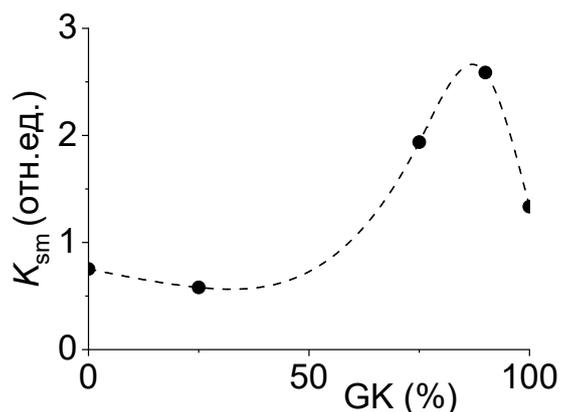


**Рисунок 45 - Спектры флуоресценции смеси электроизоляционных жидкостей ГК ТЦ и MIDELeN после 24 часов старения (эксперимент): 1-3 – смесь 75% GK и 25% MIDELeN, 4-6 - смесь 25% GK и 75% MIDELeN, 1,4 – без**

катализатора, 2,5 – с катализатором, 3,6 – с катализатором и изоляционной бумагой

Из полученных данных следует, что интенсивность флуоресценции масла ГК ТЦ в результате термического старения с медным катализатором снизилась больше, чем без катализатора, что является ожидаемым результатом.

Интенсивность флуоресценции масла после термического старения с медным и электроизоляционной бумагой сохранилась на уровне интенсивности, соответствующей старению масла без катализатора, что тоже является хорошо известным фактом. Однако при термическом старении диэлектрической жидкости MIDEL EN с катализатором и ЭИП интенсивность флуоресценции жидкости оказалась ниже, чем при старении жидкости только с катализатором. То есть, стандартная электроизоляционная бумага не только не обладает сорбционными свойствами по отношению к продуктам старения жидкости MIDELeN, замедляющими процесс старения диэлектрика, но и наоборот, ускоряет его. Такой характер изменения интенсивности флуоресценции следует считать аномальным.

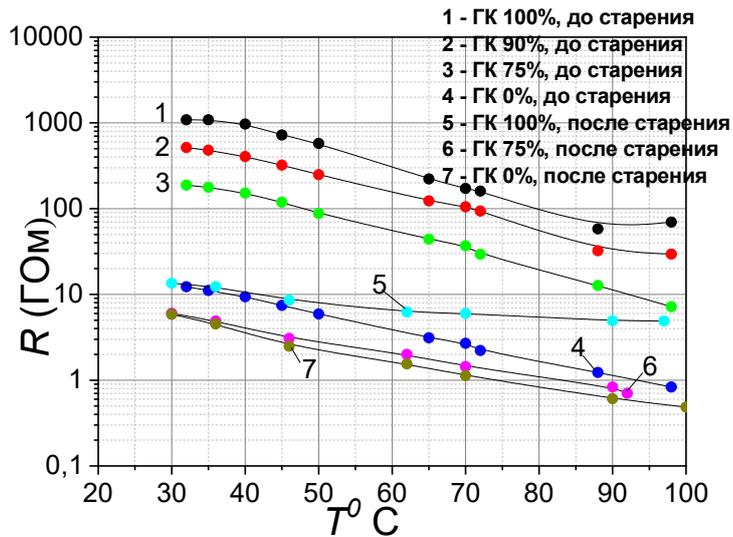


**Рисунок 46 - Зависимость коэффициента сорбционной активности от концентрации трансформаторного масла ГК в смеси диэлектрических жидкостей.**

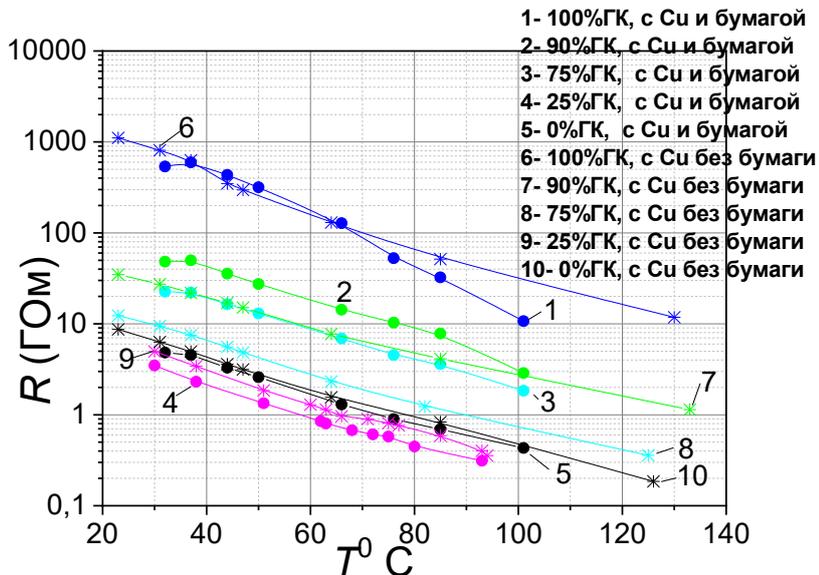
Аналогичный характер изменения ИФ имел место для смеси диэлектрических жидкостей с пропорцией 25% ГК и 75% MIDEL EN. В этом случае также ИФ состаренной смеси с катализатором, но без электроизоляционной бумаги была выше, чем состаренной с катализатором и бумагой. Объяснить данный эффект невозможно без знания состава и технологии изготовления диэлектрических использованных жидкостей, однако можно учесть при использовании этих жидкостей.

Измеренное значение коэффициента  $K_{sm}$  относительной сорбционной активности ЭИБ после 20 часов старения смесей диэлектрических жидкостей зависело от пропорции составляющих (Рисунок 44). Значения коэффициента  $K_{sm} < 1$  следует рассматривать как аномальное, а  $K_{sm} > 1$  – нормальное. Из полученных данных (Рисунки 42,43) следует, что стандартная электроизоляционная бумага при высокой относительной концентрации натурального эфира в смеси (100%...75% и менее) имеет аномальный коэффициент относительной сорбционной активности.

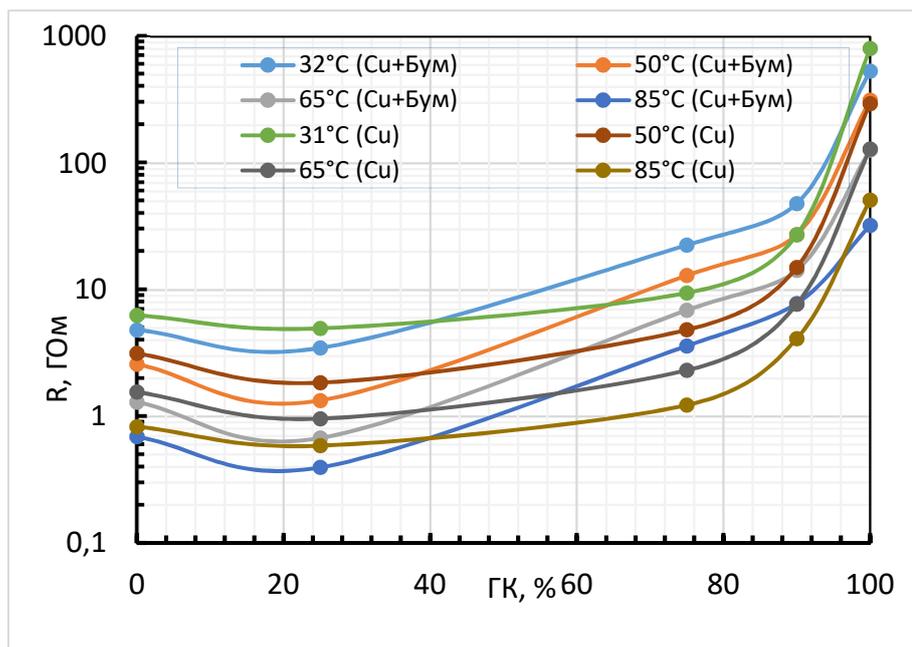
Для сопоставления оптических и электрических параметров были произведены измерения сопротивления смесей диэлектрических жидкостей  $R$  при различных температурах. В качестве примера некоторые из полученных зависимостей представлены на Рисунках 47-49. Уменьшение электрического сопротивления жидкостей после 24 часов термического старения явилось ожидаемым результатом.



**Рисунок 47 - Температурная зависимость электрического сопротивления диэлектрических жидкостей до и после термического старения: 1–4 – до старения, 5–7 – после старения в течение 24 часов; содержание масла ГК ТЦ в смеси: 1 – 100%, 2 – 90%, 3 – 75%, 4 – 0% (т.е. только MIDEЛ без ГК ТЦ), 5 – 100%. 6 – 75%, 7 – 0%.**



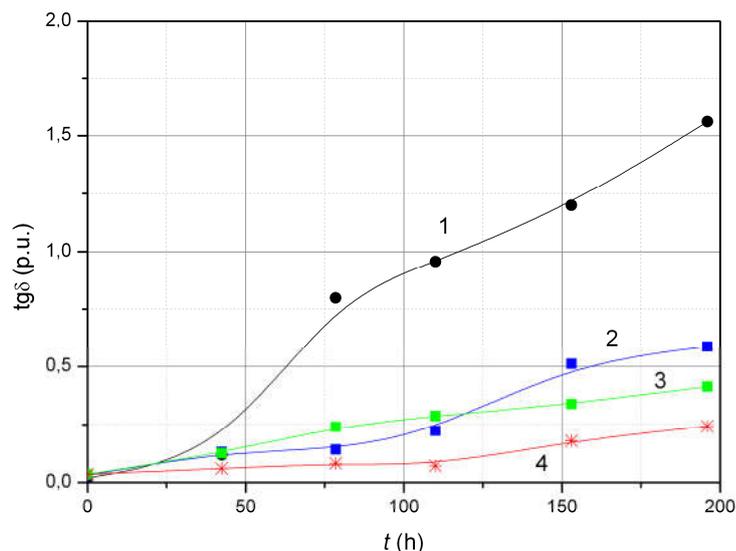
**Рисунок 48 - Температурная зависимость электрического сопротивления диэлектрических жидкостей после 24 часов термического старения: 1–5 – старение с катализатором и электроизоляционной бумагой, 6–10 – старение только с катализатором; содержание масла ГК ТЦ в смеси: 1, 6 – 100%, 2, 7 – 90%, 3, 8 – 75%, 4, 9 – 25%, 5, 10 0% (т.е. содержит только MIDEЛ eN без ГК ТЦ).**



**Рисунок 49 - Температурная зависимость электрического сопротивления диэлектрических жидкостей от процентного содержания в смеси масла ГК, после 24 часов термического старения, (Cu) – старение в присутствии медного катализатора, (Cu+Бум) – старение в присутствии медного катализатора и электроизоляционной бумаги.**

Графики зависимости электрического сопротивления смесей, состаренных при различных условиях, от температуры приведены на Рисунках 47,48. Из графиков следует, что аномальное влияние электроизоляционной бумаги на характер старения смесей имеет место не только для интенсивности флуоресценции, но и для электрического сопротивления.

Далее в работе будут представлены результаты исследования тангенса угла диэлектрических потерь смесей масел MIDEЛ 7131 и ГК в процессе старения.



**Рисунок 50 - Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от времени старения смеси MIDEL7131 и нефтяного масла ГК: 1 - 100% MIDEL (0% ГК), 2 - 30% MIDEL (70% ГК), 3 - 10% MIDEL (90% ГК), 4-0% MIDEL (100% ГК).**

По вышеизложенным данным можно увидеть, что величина тангенса угла диэлектрических потерь повышается у всех образцов по мере их старения. У MIDEL 7131 заметен сильный рост, у ГК увеличение параметра меньше выражено. Образцы №2 и №3 имеют промежуточные значения, ни одно из которых не превышает величину соответственного параметра масла MIDEL-7131, что позволяет сделать вывод о положительной совместимости исходных масел.

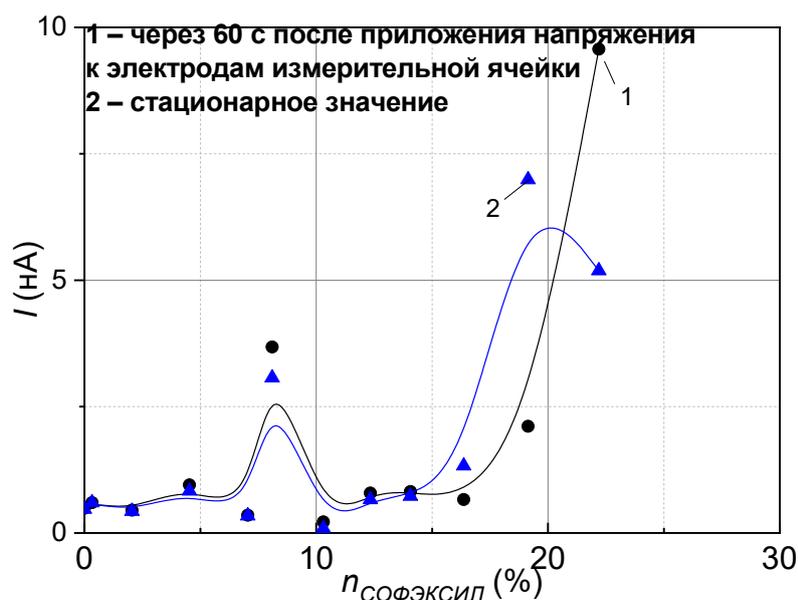
В процессе старения тангенс угла диэлектрических потерь у смесей масел, а также у чистого ГК стал более чем в 2 раза ниже, чем у чистого MIDEL 7131, что является хорошим показателем при работе масла в трансформаторе.

## Глава 4

В данной главе будут исследованы смеси минеральных масел с силиконовой жидкостью СОФЭКСИЛ ТСЖ.

Были проведены исследования электрического сопротивления смесей распространённой в России силиконовой жидкости СОФЭКСИЛ ТСЖ и минеральных масел ГК и Т1500 различных производителей.

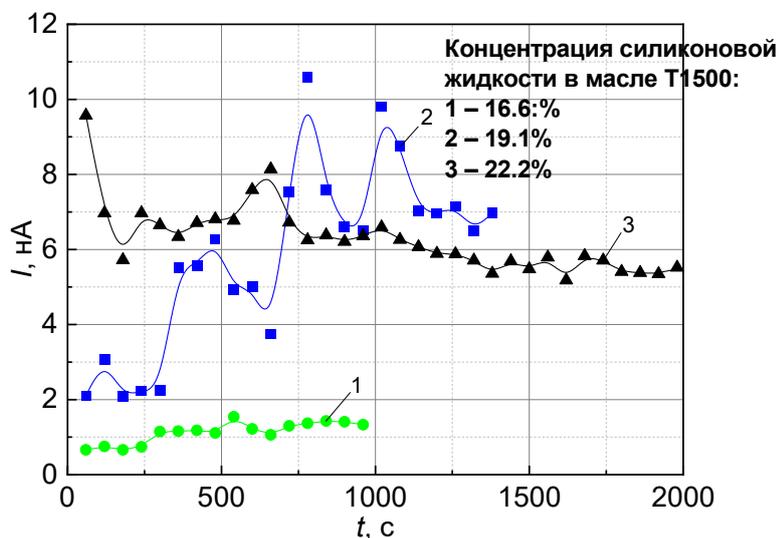
Результаты измерения тока, протекающего через смесь нефтяного масла Т1500 и силиконовой жидкости (через 60 секунд и стационарного значения) приведены на Рисунке 51. Характер изменения величины тока  $I$  от времени зависел от относительной концентрации составляющих.



**Рисунок 51 - Зависимость тока от относительной концентрации силиконовой жидкости в смеси с нефтяным маслом Т1500: 1 – через 60 с после приложения напряжения к электродам измерительной ячейки, 2 – стационарное значение**

При малых концентрациях силиконовой жидкости  $n_{\text{sil}}$  в смеси (до 3,5%) ток достигал стационарного значения за 2-3 минуты, а при  $n_{\text{sil}} > 15\%$  - почти на

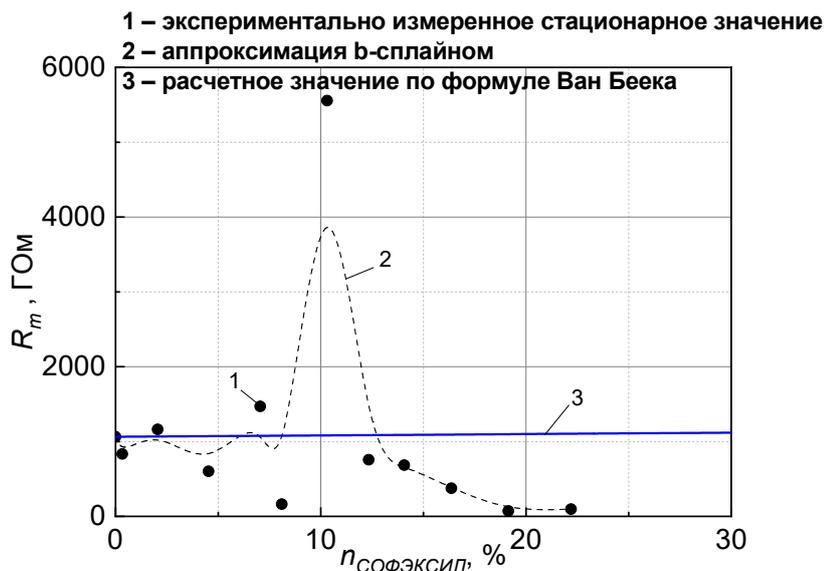
порядок больше. Пример изменения тока, протекающего через смесь, от времени, приведен на Рисунке 52.



**Рисунок 52 - Зависимость тока  $I$ , протекающего через смесь диэлектрических жидкостей от времени; концентрация силиконовой жидкости в масле T1500: 1 – 16.6:%, 2 – 19.1%, 3 – 22.2%.**

Следует отметить, что зависимость  $I(t)$  (Рисунок 50) может быть как возрастающей, так и убывающей, в зависимости от соотношения концентраций составляющих в смеси.

Используя значения электрического сопротивления чистого нефтяного масла и чистой силиконовой жидкости в используемой измерительной ячейке ( $R_{T1500}=1063.8 \text{ G}\Omega$ ,  $R_{sil}=1262.8 \text{ G}\Omega$ ), был выполнен расчет сопротивления с помощью формулы (1). Результаты расчета приведены на Рисунке 53. Из полученных данных (Рисунок 53) следует, что сопротивление смеси может быть на порядок меньше, чем сопротивление исходных составляющих.

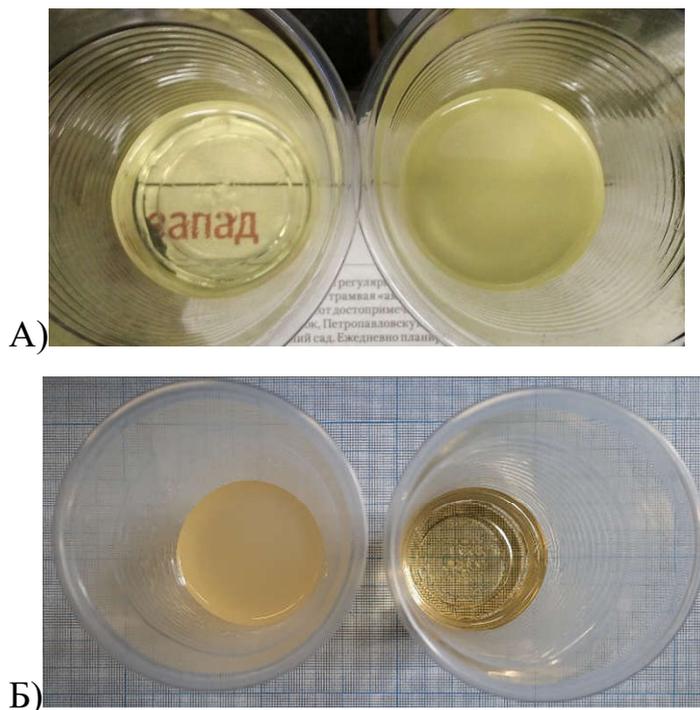


**Рисунок 53 - Зависимость электрического сопротивления смеси (по стационарному значению тока  $I$ ) от концентрации силиконовой жидкости в масле Т1500: 1 – экспериментально измеренное стационарное значение, 2 – аппроксимация b-сплайном, 3 – расчетное значение по формуле ван Беека.**

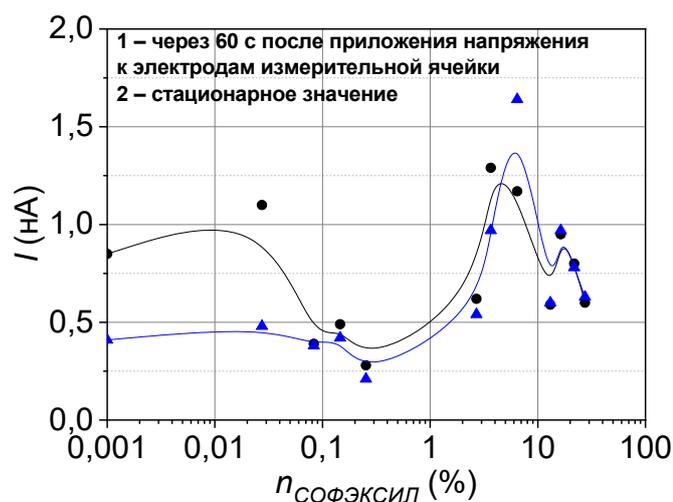
Полученный характер зависимости  $R_m(n_{sil})$  нельзя объяснить с помощью теории и формулы Ван Беека, полагающей диэлектрические жидкости независимыми и не взаимодействующими между собой. Формула (1) описывает монотонную зависимость электропроводимости смеси (соответственно и сопротивления) от относительной концентрации одного из компонентов. В частности, при равенстве проводимостей  $Y_1$  и  $Y_2$ , электрическое сопротивление смеси должно быть константой от  $n_1$  или  $n_2$ . При близких значениях величин  $Y_1$  и  $Y_2$  зависимость  $Y_m(n_k)$ , где  $k=\{1, 2\}$ , находится в пределах от  $Y_1$  до  $Y_2$ . Наличие экстремумов функции  $Y_m(n_k)$  не позволяет считать данные диэлектрические жидкости не вступающими в химическую реакцию.

Было установлено, что при определенных относительных концентрациях компонентов, смесь указанных диэлектрических жидкостей становится мутной, хотя каждая из составляющих смеси – нефтяное масло Т1500 и силиконовая жидкость являются прозрачными. Пример внешнего вида исследуемых жидкостей

(масла T1500 и его смеси с силиконовой жидкостью) приведен на Рисунке 54. Также на рисунке изображены образцы смеси кукурузного масла с силиконовой жидкостью СОФЭКСИЛ ТСЖ. В данном случае также наблюдается помутнение жидкости. В данном случае примечательно то, что коллоидный раствор возникает даже в условиях отсутствия антиокислительных присадок в масле, смешиваемом с силиконовой жидкостью.



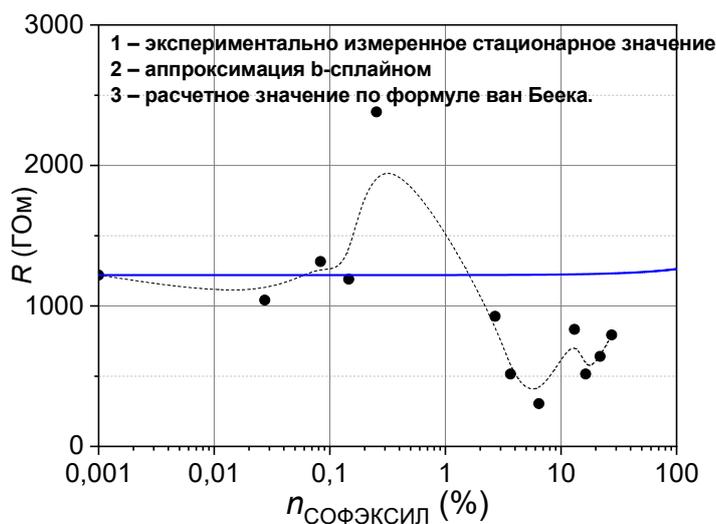
**Рисунок 54 - Внешний вид: А) 1 – масло T1500, 2 – смесь масла T1500 и силиконовой жидкости; относительная концентрация силиконовой жидкости – 22.2%. Б) 1 – смесь силиконовой жидкости и кукурузного масла 2 – чистое кукурузное масло**



**Рисунок 55 - Зависимость тока от относительной концентрации силиконовой жидкости в смеси с нефтяным маслом ГК (производитель 1): 1 – через 60 с после приложения напряжения к электродам измерительной ячейки, 2 – стационарное значение**

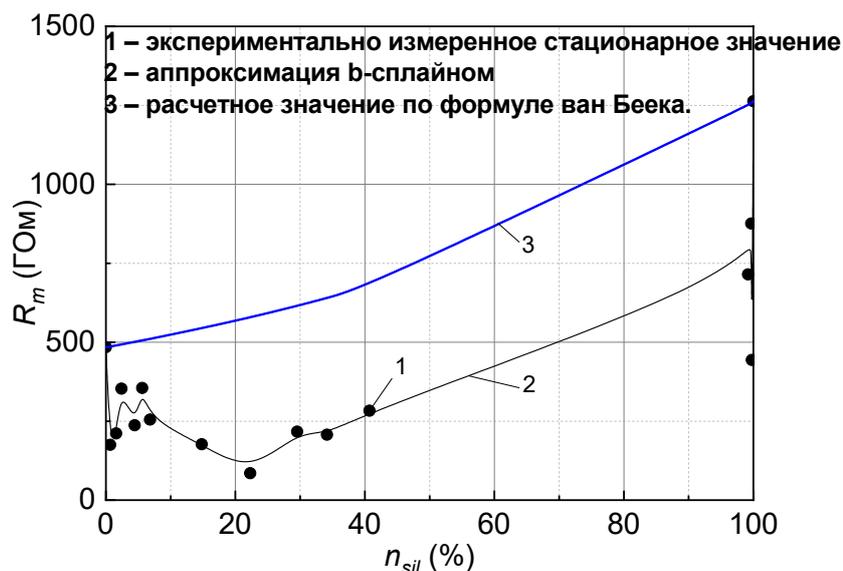
По внешнему виду смеси можно предположить, что в результате смешивания компонентов, образуются коллоидные формирования, приводящие к помутнению смеси. Образующийся коллоидный раствор сохранял свои оптические и электрические свойства в течение длительного времени.

Аналогичные закономерности были выявлены при смешивании нефтяных масел марки «ГК» различных производителей с силиконовой жидкостью. Примеры полученных зависимостей приведены на Рисунках 55-57.



**Рисунок 56 - Зависимость электрического сопротивления смеси (по стационарному значению тока  $I$ ) от концентрации силиконовой жидкости в масле ГК (производитель 1): 1 – экспериментально измеренное стационарное значение, 2 – аппроксимация b-сплайном, 3 – расчетное значение по формуле ван Беека.**

Измерения зависимостей  $I(n_{\text{sil}})$ , а также  $R_{\text{м}}(n_{\text{sil}})$  (Рисунки 55,56) производились начиная от относительной концентрации  $n_{\text{sil}}=0.027\%$  (кроме  $n_{\text{sil}}=0$ ) до  $n_{\text{sil}}=27.5\%$ . Зависимости, приводимые на Рисунке 57, получены при относительной концентрации  $n_{\text{sil}}$  от 0.67% до 40.7% и вблизи величины 100% – при 99,18%, 99,67%, 99,77%, а также при  $n_{\text{sil}}=100\%$ .

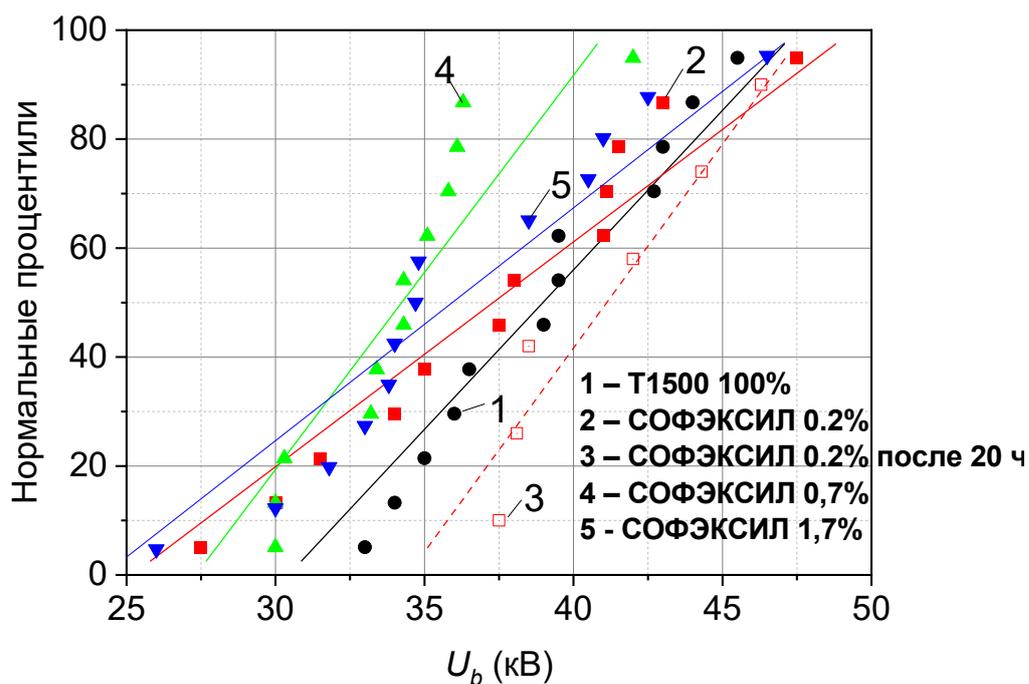


**Рисунок 57 - Зависимость электрического сопротивления смеси (по стационарному значению тока  $I$ ) от концентрации силиконовой жидкости в масле ГК (производитель 2): 1 – экспериментально измеренное стационарное значение, 2 – аппроксимация b-сплайном, 3 – расчетное значение по формуле ван Беека.**

Во всех рассмотренных случаях (Рисунки 51, 53, 55-57) при дальнейшем увеличении концентрации силиконовой жидкости, смесь становилась прозрачной – коллоидные образования исчезали, а характерное время достижения стационарного значения тока (соответственно и электрического сопротивления) при включении напряжения уменьшалось до 1-3 минут.

Особенностью свойств смесей нефтяных масел и PDMS (силиконовых) жидкостей является существенное влияние возникающих коллоидных частиц, образующихся при смешивании жидкостей на электрические параметры смеси, в частности, на пробивное напряжение. В качестве примера в данной работе рассматривается смесь нефтяного масла Т1500 и силиконовой трансформаторной жидкости (ТСЖ) с различной относительной концентрацией компонентов.

Полученные вероятностные характеристики пробоя смесей приведены на Рисунке 58. Статистические характеристики полученных распределений (среднее арифметическое и дисперсия действующего напряжения пробоя) обобщены в Таблице 4.



**Рисунок 58** Вероятностные характеристики электрического пробоя смесей нефтяного масла T1500 и PDMS жидкости (СОФЭКСИЛ ТСЖ): 1 – T1500 100%, 2 – PDMS 0.2%, 3 – PDMS 0.2% after 20 h, 4 – PDMS 7%

Параметр в кВ	PDMS 0%	0.2%	0.2% после 20ч	0.7%	1.7%	1.7% (после 92ч)	6.6%	6.6% (после нагрева)
Среднее $U_b$	39	37	41	34	36	38	34	45
Разброс	4	6	4	3	6	5	5	3

**Таблица 4 Значения напряжения пробоя смесей минерального масла T1500 и силиконовой жидкости СОФЭКСИЛ ТСЖ при различных концентрациях, а также в различных условиях (при выдержке в течение определённого времени, а также при нагреве смеси).**

Из полученных данных следует, что кратковременная электрическая прочность смеси может быть, как меньше электрической прочности исходных компонентов, так и больше. Величина пробивного напряжения ( $U_b$ ) смесей сразу после смешивания компонентов меньше, чем у исходных жидкостей, а по мере растворения компонентов (в данном случае эмульгации силиконовой жидкости в масле T1500) величина пробивного напряжения возрастает. В частности, при концентрации PDMS 0.2%, величина пробивного напряжения при комнатной температуре восстанавливается через несколько часов, а при 7% - только через несколько недель или даже месяцев. Увеличение  $U_b$  смеси от времени сразу после смешивания компонентов при малой концентрации PDMS можно наблюдать в процессе измерений пробивного напряжения: имеет место явная тенденция к увеличению пробивного напряжения после каждого пробоя. На начальной стадии эмульгации при концентрации PDMS 0.2% зависимость  $U_b$  от времени может быть аппроксимирована линейной зависимостью с начальным значением 29 В и коэффициентом наклона 0.43 В/с. Следует также отметить, что пробивное напряжение указанной смеси через 20 часов стало выше, чем величина  $U_b$  у исходного масла T1500 приблизительно на 10% (увеличение с 37 кВ до 41 кВ), что предположительно обусловлено частичным растворением влаги, находящейся в масле в эмульгированном состоянии, силиконовой жидкостью.

При концентрации PDMS 6.6% и более изменение  $U_b(t)$  происходит существенно медленнее. Нагрев смеси указанных диэлектрических жидкостей существенно ускоряет процесс эмульгации и как следствие – существенно сокращает время восстановления электрической прочности смеси после смешивания жидкостей, что подтверждается результатами измерений

пробивного напряжения (Таблица 4). Так, из полученных данных следует, что среднее арифметическое значение  $U_b$  после нагрева в течение 15 минут при температуре 90 °С при атмосферном давлении возросло более, чем на 30% (увеличение с 34 кВ до 45 кВ).

Аналогичные закономерности имеют место также и для смесей силиконовых жидкостей с другими типами нефтяных масел.

### **Научная новизна**

1. Впервые одновременно измерены удельное электрическое сопротивление и оптические характеристики смесей минеральных масел с синтетическим эфиром MIDE L 7131 и натуральным эфиром MIDE LeN в процессе искусственного старения смесей и показано, что изменение спектров флуоресценции и оптического затухания смесей связано с изменением электрических характеристик смесей диэлектрических жидкостей, а наилучшим описанием зависимости удельного сопротивления от относительной концентрации составляющих смеси является формула ван Беека.

2. Впервые выявлена аномальная сорбционная способность электроизоляционной бумаги при искусственном старении в среде смеси минерального масла и натурального эфира MIDE LeN, способствующая ускоренному старению жидкого диэлектрика.

3. Впервые измерено пробивное напряжение, электрическое сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь смесей различных минеральных масел с трансформаторными силиконовыми жидкостями при различных концентрациях составляющих и установлено, что появление даже небольшого количества ТСЖ в любом типе минерального трансформаторного масла приводит к резкому ухудшению диэлектрических свойств смеси – снижению пробивного напряжения и электрического сопротивления, а также увеличению тангенса угла диэлектрических потерь; установлено, что

диэлектрические свойства восстанавливаются после длительного хранения при комнатной температуре или после кратковременного нагрева.

4. Впервые выявлено, что ухудшение диэлектрических свойств смеси минерального масла и ТСЖ сопровождается увеличением оптического рассеяния, визуально проявляющегося как помутнение смеси, обусловленного образованием коллоидного раствора.

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Показана возможность использования формулы ван Беека для оценки электрического сопротивления смесей минерального масла с синтетическим и натуральным эфиром MIDELE.

2. Подтверждена возможность снижения скорости старения минерального трансформаторного масла как в составе бумажно-пропитанной композиции, так и без электроизоляционной бумаги посредством добавления натурального эфира в минеральное масло; определена оптимальная относительная концентрация натурального эфира, при котором скорость старения смеси минимальна – 10%.

3. Показано, что при относительной концентрации диэлектрической жидкости MIDELE<sub>N</sub> в минеральном трансформаторном масле более 40% стандартная электроизоляционная бумага не только не обладает сорбционными свойствами по отношению к продуктам старения жидкости, замедляющими процесс старения диэлектрика (аномальная сорбционная способность), но и наоборот, ускоряет его, что следует учитывать при выборе характеристик диэлектрической жидкости и эксплуатации силового трансформатора.

4. Выявлено существенное ухудшение диэлектрических свойств минерального масла сразу после добавления даже небольшого количества силиконовой жидкости, что необходимо учитывать при замене минерального масла на силиконовую жидкость, снижение указанного негативного влияния после нагрева смеси, а также эффект увеличения пробивного напряжения смеси после восстановления ее диэлектрических свойств.

5. Выработаны рекомендации по замене минерального масла на силиконовую жидкость в силовых трансформаторах.

### **Методология и методы исследования**

Исследования базируются на измерениях электрических и оптических параметров смесей трансформаторных минеральных масел различных марок с наиболее распространенными синтетическими диэлектрическими жидкостями как в исходном состоянии смесей, так и после искусственного старения. Измерения электрических параметров, а также подготовка измерительной ячейки и исследуемых образцов были выполнены в соответствии с существующими российскими и международными стандартами.

### **Положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

1. Результаты измерения электрических и оптических характеристик смесей минеральных масел с синтетическими диэлектрическими жидкостями при различной относительной концентрации составляющих: электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, пробивного напряжения, спектра флуоресценции и оптического затухания на различных длинах волн.
2. Подтверждение возможности использования формулы ван Беека для оценки зависимости электрического сопротивления смесей минеральных масел с натурными и синтетическими эфирами от относительной концентрации составляющих, а также возможности оценки относительной концентрации с применением методов флуоресцентной спектроскопии.
3. Наличие эффекта аномальной сорбционной способности электроизоляционной бумаги, приводящего к ускоренному старению жидкого диэлектрика в смесях минеральных масел и натурального эфира при концентрации последнего более 40%.
4. Наличие оптимальной концентрации натурального эфира в смеси с минеральным трансформаторным маслом для достижения минимальной скорости старения жидкого диэлектрика совместно с электроизоляционной бумагой – 10%.

5. Результаты исследования, показавшего, что появление даже небольшого количества ТСЖ в любом типе минерального трансформаторного масла приводит к резкому ухудшению диэлектрических свойств смеси, которые могут восстановиться после длительного хранения при комнатной температуре или после кратковременного нагрева.

6. Разработанная методика замены минерального масла в силовом трансформаторе на силиконовую жидкость.

**Достоверность полученных результатов** при измерении диэлектрических характеристик обеспечивалась использованием методов, соответствующих существующим российским и международным стандартам и современного оборудования, тщательной очисткой измерительных ячеек перед проведением измерений, а также строгому следованию последовательности действий при проведении экспериментов, калибровкой измерительных устройств, хорошей воспроизводимостью результатов при большим количеством измерений и корректной статистической обработкой полученных данных.

**Личный вклад автора** определяется участием в постановке задач исследования, разработке и создании методик измерения, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе полученных данных. Основные результаты работы получены автором лично.

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

1. Выполнены измерения основных электрических и оптических характеристик смесей минеральных масел с синтетическими диэлектрическими жидкостями при различной концентрации составляющих, на основании которых показана возможность использования формулы ван Беека для оценки электрического сопротивления смесей эфиров MIDEL с минеральными маслами.

2. Продемонстрирована возможность использования метода флуоресцентной спектроскопии для определения относительной концентрации диэлектрических жидкостей в смесях с учетом различного поглощения излучения флуоресценции на различных длинах волн и выполнены оценка скорости диффузии синтетических жидких диэлектриков в бумажную изоляцию, пропитанную минеральным маслом.

3. Подтверждено наличие оптимальной концентрации натурального эфира в смеси с минеральным трансформаторным маслом для достижения минимальной скорости старения жидкого диэлектрика совместно с электроизоляционной бумагой – 10%, а также выявлено наличие эффекта аномальной сорбционной способности электроизоляционной бумаги, приводящего к ускоренному старению жидкого диэлектрика в смесях минеральных масел и натурального эфира при концентрации последнего более 40%.

4. Установлено, что сразу после смешивания различных минеральных масел с полиметилсилоксановыми жидкостями образуется коллоидный раствор, электрические параметры которого существенно хуже, чем у исходных составляющих смеси, а оптическое рассеяние в смеси резко возрастает, что визуально проявляющегося как помутнение смеси.

5. Показано, что диэлектрические свойства смесей минеральных масел с ПМС жидкостями частично или полностью восстанавливаются после длительного хранения при комнатной температуре или после кратковременного нагрева, а пробивное напряжение смесей может быть даже выше, чем у исходного минерального масла.

6. Разработанная методика замены минерального масла в силовом трансформаторе на силиконовую жидкость.

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

- 1) Dmitry V. Kieseletter, Alexandr S. Reznik, Natalia M. Zhuravleva, Danila V. Litvinov, Alexandr S. Rutovich Application of Side-Illumination Fluorescence Measurement Technique for Monitoring of Quality of Dielectric Fluids Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), January 29- February 1, 2018, Saint Petersburg, Russia, P.423-425, DOI:10.1109/EIConRus.2018.8317124, ISBN: 978-1-5386-4339-6
- 2) D.V. Kieseletter, A.S. Reznik, N.M. Zhuravleva, D.V. Litvinov Investigation of Optical Characteristics of Mixtures of Dielectric Liquids in the Process of Artificial Aging Proc. 2019 IEEE conf. of Russian young researches in electrical and electronics engineering, 2019, p. 819-823, ISBN: 978-1-7281-0340-2, DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657073
- 3) Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник, Н.М. Журавлева, Д.В. Литвинов. Влияние концентрации компонентов смеси диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов на электрическое сопротивление и оптические характеристики // Материаловедение. Энергетика, Том 26, №3, 2020, С. 5-19
- 4) Кизеветтер Д.В., Резник А.С., Журавлева Н.М., Литвинов Д.В. Флуоресцентный анализ смесей диэлектрических жидкостей. В сборнике: Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте - 2020. Труды XXVIII Международной конференции. 2020. С. 52-54.
- 5) Dmitry V. Kieseletter, Alexandr S. Reznik, Nataliya M. Zhuravleva, Danila V. Litvinov Research of dielectric properties of the mixtures of petroleum transformer oils and silicone liquids 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, January 26-27, 2020

## Список литературы:

1. Андреева, М.А. Сухие силовые трансформаторы 6 – 35 кВ. Критерии выбора / М.А. Андреева // Новости Электротехники: информационно-справочное издание. – 2011. - №1 (67). – С. 44-46.
2. Быстрицкий, Г.Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: учебное пособие / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин – М.: Издательский центр Академия, 2003. – 176 с.
3. Панибратец, А. Н. Перспективные требования к обмоточным проводам для трансформаторов и реакторов / А.Н. Панибратец, А.И. Федотов // Кабели и провода. - 2008. - №5. - С. 12–20.
4. Лизунов, С.Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России / С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин // Электричество. - 2000. - № 8. - С. 2 – 11.
5. Маслякова, А. В. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика с помощью хитозана: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Маслякова Анна Вячеславовна. – СПб., 2005. – 204 с.
6. Журавлева, Н.М. Стабилизация диэлектрических потерь в процессе термостарения бумажно-пропитанной изоляции: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Журавлева Наталья Михайловна – СПб., 1989. – 187 с.
7. Ferrari, R., da Silva Oliveira, V., Scabio, A. Oxidative stability of biodiesel from soybean oil fatty acid ethyl esters, Scientia Agricola, Vol. 62, no. 3, Piracicaba, Brazil, pp. 291-295, May/June 2005.
8. Lamsa, M. (Raisio Tehtaat Oy AB, FIN-21200 Raisio, Finland) PCT International Patent, Application WO 96107632 A1.
9. Verma P., Condition Monitoring of Transformer Oil and Paper, [Disertation Thesis], Deemed University, India, 2005.

10. Smith S.D. Design and Test Experience With Natural Ester Fluid for Power Transformers, T&D Conference and Exposition, IEEE PES, Dallas, Texas, 2006, ISBN 0-7803-9194-2.
11. Li X., Li J., Sun C., Properties of Transgenic Rapeseed Oil Based Dielectric Liquid, IEEE SouthEastCon 2006, Memphis, TN, 2006.
12. I.V. Timoshkin, R. A. Fouracre, M. J. Given, S. J. MacGregor, P. Mason, and R. Clephan, "Dielectric Properties of Diala D, Midel 7131 and THESO Insulating Liquids", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, pp.622-625, 2008.
13. <http://www.millipore.com/catalogue/item/zrxq003t0>
14. I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given and M. P. Wilson «Mixtures of Midel 7131 and THESO Insulating Liquids for Pulsed Power Applications», 1070-9878/11/\$25.00 © 2011 IEEE
15. Haichuan Yu<sup>1</sup>, Rong Chen<sup>2</sup>, Xiaobo Hu<sup>2</sup>, Xiaogang Xu<sup>3</sup>, Yang Xu « Dielectric and Physicochemical Properties of Mineral and Vegetable Oils Mixtures», 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom
16. Laurentiu Marius Dumitran, Member IEEE, Florina Gorun, Ștefan Nicolae and Ciprian Mirică « Dielectric Properties of Mineral and Vegetable Oils Mixtures for Power Transformers», THE 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING March 28-30, 2019, Bucharest, Romania
17. Grzegorz Dombek\*, Jaroslaw Gielniak, and Robert Wroblewski «Fire Safety and Electrical Properties of Mineral Oil/Synthetic Ester Mixtures», Conference Proceedings of ISEIM 2017 Conference Proceedings of ISEIM 2017
18. Suwarno I. S. Darma, «Dielectric Properties of Mixtures between Mineral Oil and Natural Ester», Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 7-11, 2008, Yokkaichi, Mie, Japan
19. <https://www.cargill.com/bioindustrial/dielectric-fluids>

20. Ruijin Liao, Jian Hao, Lijun Yang, Stanislaw Grzybowski, « Study on Aging Characteristics of Mineral Oil/Natural Ester Mixtures-Paper Insulation», 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids

21. Ruijin Liao, Shuaiwei Liang, Caixin Sun, Lijun Yang, Huigang Sun, “A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil”, European Transactions on Electrical Power, Vol. 20, No. 4, pp. 518-533, 2010.

22. Ruijin Liao, Shuaiwei Liang, Caixin Sun, Lijun Yang, Huigang Sun, “A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil”, European Transactions on Electrical Power, Vol. 20, No. 4, pp. 518-533, 2010.

23. A. M. Emsley, G. C. Stevens, “Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers”, IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 141(5), pp.324-334, 1994.

24. C. Perrier et al. : Improvement of Power Transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters

25. A.A. Abdelmalik, J.C. Fothergill, S.J. Dodd « Aging of Kraft Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid», 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, Italy

26. <http://www.rosma.ru/catalogue/transformer>