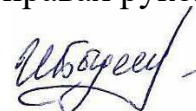


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

На правах рукописи



Богданов Илья Андреевич

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ПОЖАРОБЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

2.10.1. Пожарная безопасность

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Никифоров Александр Леонидович

Иваново – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	11
1.1. Анализ статистических данных по пожарам, вызванным электротехническими причинами.....	11
1.2. Обзор кабельных изделий	16
1.3. Физико-химические свойства и строение пластика на основе ПВХ, влияющие на его пожарную опасность	23
1.4. Анализ пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ	29
1.5. Оценка процессов старения изоляции кабельных изделий в условиях эксплуатации.....	35
1.6. Обзор нормативного правового регулирования оценки влияния эксплуатационного старения на пожарную опасность кабельных изделий	38
1.7. Подходы к прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации кабельных изделий	41
1.8. Заключение и основные выводы по главе 1	50
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	53
2.1. Характеристика выборки образцов кабельных изделий.....	53
2.2. Ускоренное термическое состаривание.....	54
2.3. Гравиметрический анализ	56
2.4. Термический анализ.....	57
2.5. Инфракрасная спектроскопия.....	58
2.6. Определение предельного кислородного индекса	60
2.7. Измерение электрического сопротивления	66
2.8. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	68

2.9. Измерение межпроводной емкости.....	71
2.10. Испытание токовой перегрузкой.....	72
2.11. Выводы по главе 2.....	74
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	76
3.1. Изменение химического состава и структуры ПВХ изоляции кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.....	76
3.2. Влияние термического старения в условиях длительной эксплуатации на общую горючесть ПВХ изоляции кабельных изделий	88
3.3. Изменение диэлектрических свойств ПВХ изоляции кабельных изделий при термическом эксплуатационном старении.....	91
3.4. Взаимосвязь между химическим составом, структурой ПВХ изоляции и пожарной опасностью кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации	100
3.5. Способ оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ, учитывающий термическое старение в условиях длительной эксплуатации.....	108
3.5.1. Оценка ресурса пожаробезопасной эксплуатации	108
3.5.2. Релевантные условия ускоренного термического состаривания.....	110
3.5.3. Метод и экспериментальная установка для ускоренного термического состаривания.....	114
3.5.4. Методика оценки общей горючести	119
3.5.5. Методика оценки электроизоляционных свойств	121
3.6. Выводы по главе 3.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
Приложение 1	144
Приложение 2	147

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества электрических бытовых приборов, использующихся в жилом секторе, ведет к повышению нагрузки, приходящейся на электрические проводки, которые часто на нее не рассчитаны. Это приводит к нагреву кабельных изделий выше допустимых температур эксплуатации. В результате аккумуляирования деструктивных эффектов изоляции в условиях длительной эксплуатации повышается пожарная опасность электропроводок.

Нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования является одной из основных причин пожаров на территории Российской Федерации. Количество пожаров по этой причине ежегодно увеличивается, каждый год на них погибает около 2000 человек [77].

Проблема обеспечения пожарной безопасности электропроводок в жилом секторе осложняется отсутствием контроля за проектными решениями жилого сектора и повсеместным нарушением правил устройства электропроводок (неправильный выбор сечения, способа прокладки и прочее).

Несмотря на то, что на сегодняшний день в Российской Федерации действуют нормативные требования по оценке пожарной опасности кабельных изделий, данные документы не регулируют влияние эксплуатационного старения на пожарную опасность.

При прокладке электрических проводок в жилом секторе внутри помещений среди всех негативных факторов, воздействующих на изоляцию кабельных изделий, превалирует повышенная температура.

Наиболее распространенным материалом, который используется при производстве изоляции кабельных изделий общепромышленного назначения является поливинилхлорид (ПВХ), что обусловило выбор кабельных изделий с изоляцией на основе данного материала при проведении настоящего диссертационного исследования.

ПВХ изоляция кабельных изделий обладает рядом преимуществ: экономичность, экологическая безопасность, универсальность, широкий диапазон рабочих температур. Вместе с тем, данный материал подвержен деструктивным изменениям в результате эксплуатационного старения, которое связано с разрушением физической и химической структуры полимера, а также миграцией на поверхность и улетучиванием пластификатора. Поэтому гарантируемый производителями срок службы кабельных изделий не всегда соответствует сроку пожаробезопасной эксплуатации. В то же время, до сих пор практически неизученными остаются вопросы, связанные с оценкой изменения пожароопасных свойств электрических проводок в процессе эксплуатации и естественного старения.

Актуальность исследования заключается в отсутствии адекватного способа оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий, учитывающего термическое старение изоляции в условиях длительной эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования

Тема настоящей диссертационной работы находится на стыке областей исследований, касающихся: деструкции материалов на основе ПВХ, пожарной опасности материалов на основе ПВХ и аварийных режимов работы электропроводок. Указанным вопросам посвящены работы отечественных и зарубежных авторов: Смелков Г.И., Варламкин А.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С., Мокряк А.Ю., Назарычев А.Н., Зыков В.И., Поляков Д.А., Гончаренко Г.А., Канискин В.А., Рябиков А.И., Берлин А.А., Сажин Б.И., Кузнецов С.М., Тагер А.А., Ржевская С.П., Редько В.В., Шувалов М.Ю., Коржов А.В., Мусин А.Х., Юрченко Е.Ю., Тужиков О.О., Лебедев Г.М., Шлык Ю.К., Sammers Dzh., Uilki Ch., Daniels Ch., Beneš M., Ludwig V., Al Salloum H., Bening P., Galski E., Boggs S., Kreuger F.H., Chan J.C., Pommerenke D., Wester F.J., Zhou Y., Mazzanti G., Montanari G. C., Tokunaga S., Qureshi M. I., Chen X. и др.

Цель работы заключается в разработке способа оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе поливинилхлорида, учитывающего старение полимера в условиях длительной эксплуатации.

Для достижения цели исследования были поставлены и решались следующие **задачи:**

- оценить влияние термического старения в условиях длительной эксплуатации на химический состав и структуру ПВХ изоляции кабельных изделий;
- провести оценку влияния изменения химического состава и структуры при термическом старении в условиях длительной эксплуатации на общую горючесть и диэлектрические свойства кабельных изделий с ПВХ изоляцией;
- выработать научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации с учетом термического старения изоляционных материалов;
- определить релевантные условия ускоренного термического состаривания кабельных изделий при оценивании изменения их пожарной опасности в процессе эксплуатации;
- разработать и изготовить экспериментальную установку для ускоренного термического состаривания кабельных изделий;
- предложить методики оценки общей горючести и электроизоляционных свойств ПВХ пластиката, учитывающие термическое старение кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации.

Научная новизна исследования:

- впервые проведена комплексная оценка влияния изменения химического состава и структуры ПВХ изоляции на пожарную опасность кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации;

- предложен научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации;
- определены релевантные условия и разработана экспериментальная установка для ускоренного термического состаривания кабельных изделий с целью оценивания их пожарной опасности в процессе эксплуатации;
- впервые предложены методики оценки общей горючести и электроизоляционных свойств кабельных изделий, учитывающие термическое старение ПВХ изоляции в условиях длительной эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении взаимосвязей между процессами термической деструкции и пожарной опасностью кабельных изделий с ПВХ изоляцией в условиях длительной эксплуатации и возможности распространения выявленных взаимосвязей на кабельные изделия с другими видами изоляционных материалов на основе термопластов.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный способ оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации позволит обеспечить пожарную безопасность в течение срока службы кабельных изделий.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с п. 3 в части, касающейся разработки научных методов исследования пожароопасных свойств материалов; а также в соответствии с п. 13 паспорта специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Методология и методы исследования. Диссертационная работа сочетает моделирование процессов эксплуатационного термического старения, лабораторные эксперименты и статистический анализ полученных данных. Экспериментальные данные получали с использованием общепринятых методов, удовлетворяющих сходимости теоретических и эмпирических результатов, с использованием сертифицированного и поверенного оборудования. При

обосновании полученных результатов опирались на научные труды авторитетных отечественных и зарубежных исследователей.

В ходе диссертационного исследования применялись современные методы исследования:

- термический анализ;
- инфракрасная спектроскопия;
- определение предельного кислородного индекса;
- измерение тангенса угла диэлектрических потерь;
- измерение электрического сопротивления;
- измерение межпроводной емкости;
- испытание токовой перегрузкой;
- гравиметрический анализ.

При обработке результатов измерений применялись методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная оценка влияния изменения химического состава и структуры ПВХ изоляции на пожарную опасность кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

2. Научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

3. Методика и экспериментальная установка ускоренного термического состаривания кабельных изделий с целью оценивания их пожарной опасности при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

4. Методика оценки общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией, учитывающая термическое старение пластика в условиях длительной эксплуатации.

5. Методика оценки электроизоляционных свойств ПВХ изоляции кабельных изделий, учитывающая термическое старение пластика в условиях длительной эксплуатации.

Степень достоверности и обоснованность научных результатов исследования обеспечены использованием надежного и поверенного оборудования, воспроизводимостью полученных результатов и их сопоставимостью с результатами, изложенными в научных трудах других исследователей изучавших полимерные материалы и обеспечение пожарной безопасности кабельных изделий, а также обсуждением основного материала на научных мероприятиях различного уровня и публикацией в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны, «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022 г.);

– XVII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-й годовщине образования гражданской обороны, «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022 г.);

– X Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023 г.);

– XI Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (Волгоград, Волгоградский государственный технический университет, 2023 г.);

- VI Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023 г.);
- Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024 г.);
- XI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024 г.);
- XIX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024 г.);
- Молодежной программе 28-ой Международной специализированной выставки-форума «Безопасность и охрана труда БИОТ-2024» (Москва, Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков средств индивидуальной защиты, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, индексируемых в РИНЦ, из них: 1 публикация, включенная в международную систему цитирования Scopus; 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ. Опубликовано монография, получен патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Разработка экспериментальной установки и оригинальных методик, получение экспериментальных результатов, их обработка и интерпретация выполнены автором лично.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (162 наименования) и приложений. Работа содержит 143 страницы машинописного текста, включая 56 рисунков и 24 таблицы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

1.1. Анализ статистических данных по пожарам, вызванным электротехническими причинами

Нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования является одной из основных причин пожаров в Российской Федерации (рисунок 1.1). Согласно статистическим данным, количество пожаров по данной причине ежегодно увеличивается [77].

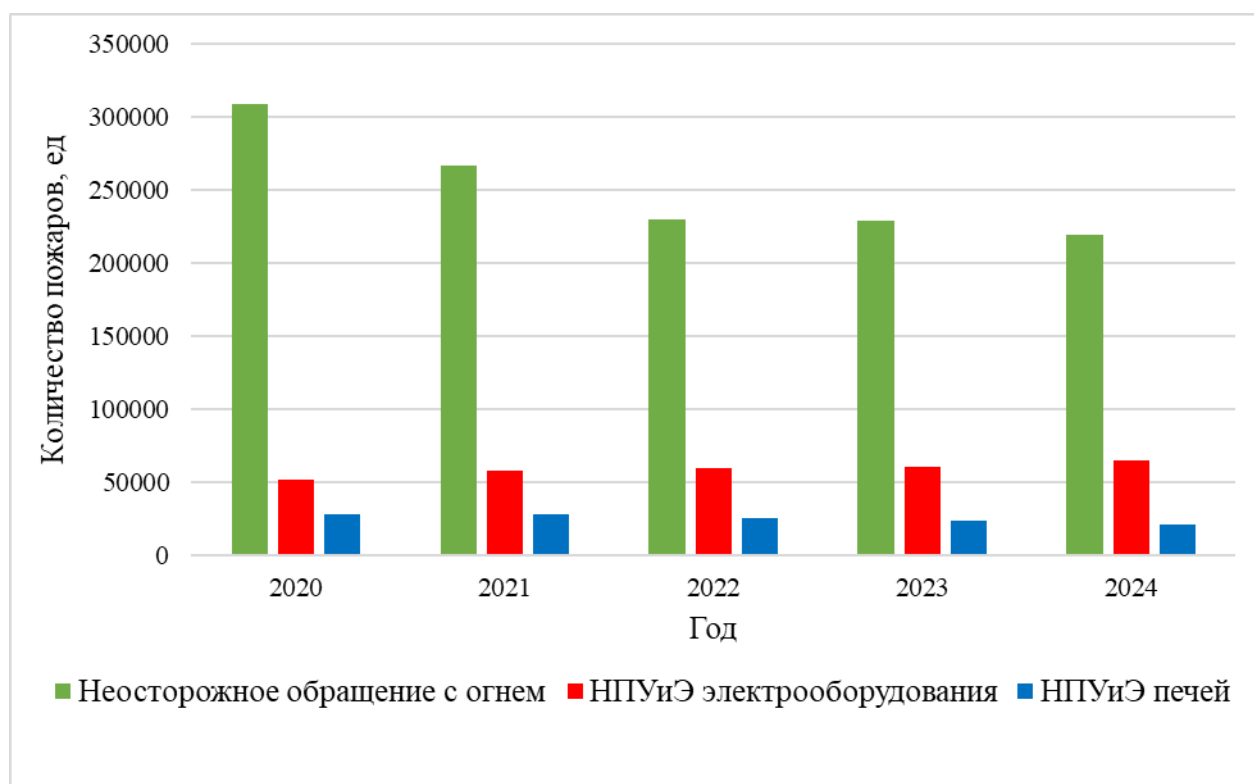


Рисунок 1.1 – Распределение количества пожаров в Российской Федерации по основным причинам за 2020-2024 годы

Основная доля пожаров по электротехническим причинам приходится на здания жилого сектора (рисунок 1.2).

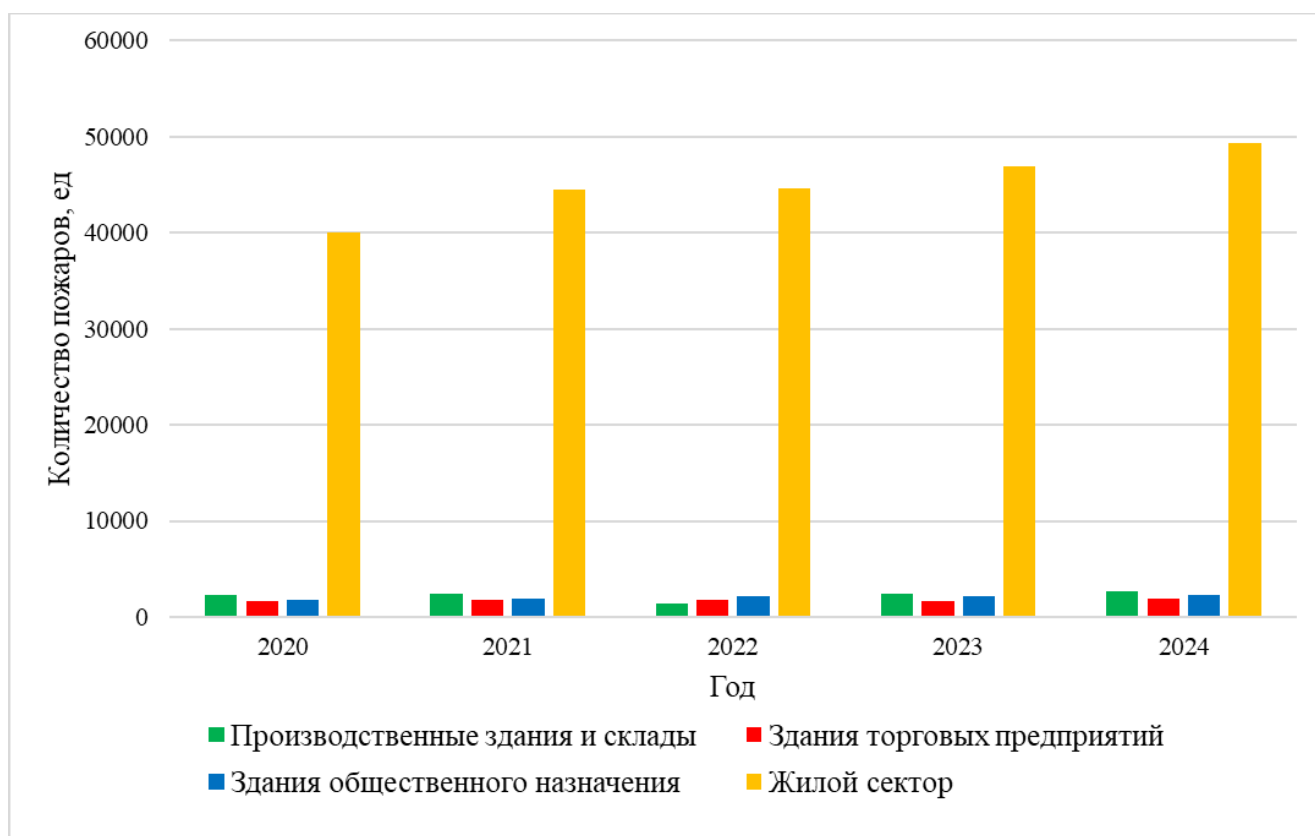


Рисунок 1.2 – Количество пожаров за 2020-2024 годы, возникших по причине нарушения правил эксплуатации электрооборудования и бытовых электроприборов, в зависимости от объекта возникновения

Анализ статистических данных показал, что кабельные изделия являются одним из основных источников возникновения пожаров (рисунок 1.3). Кабель или провод послужили источником возникновения 57374 пожаров в 2024 году. Немаловажен тот факт, что крупные пожары в Российской Федерации возникают в основном по электротехническим причинам (рисунок 1.4).

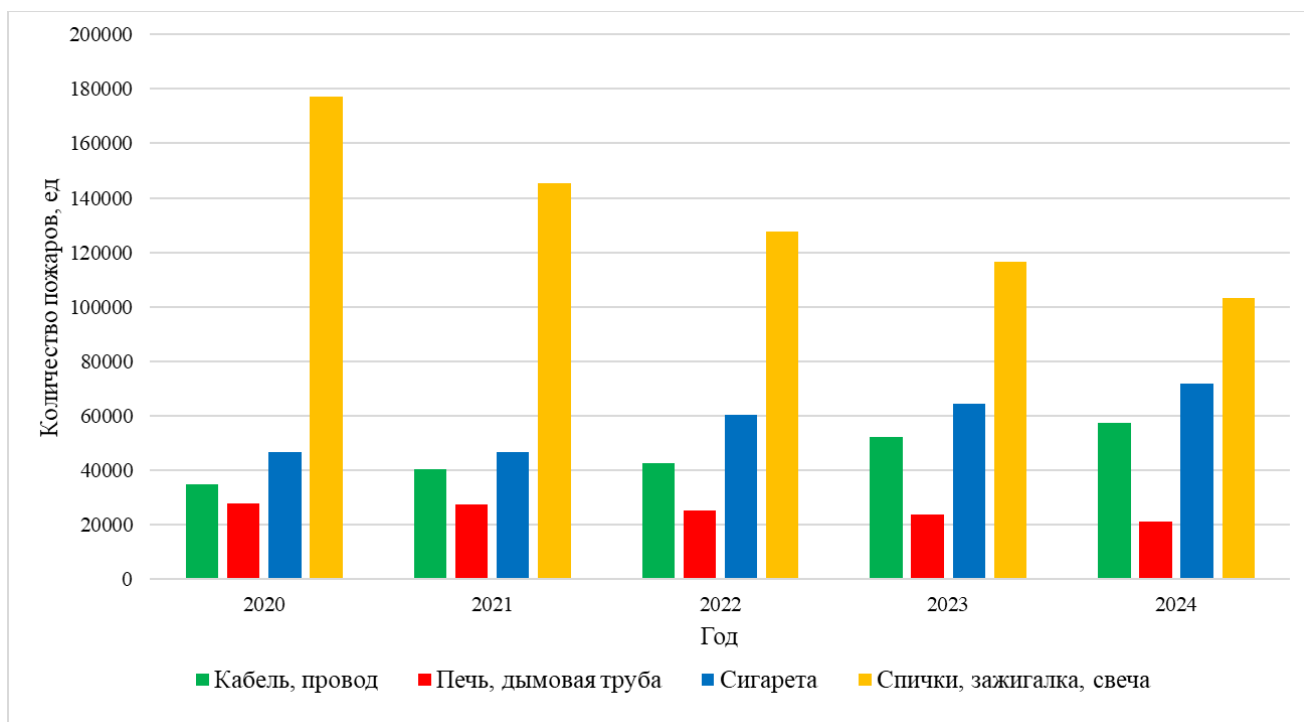


Рисунок 1.3 – Распределение пожаров за 2020-2024 годы по основным видам источников возникновения

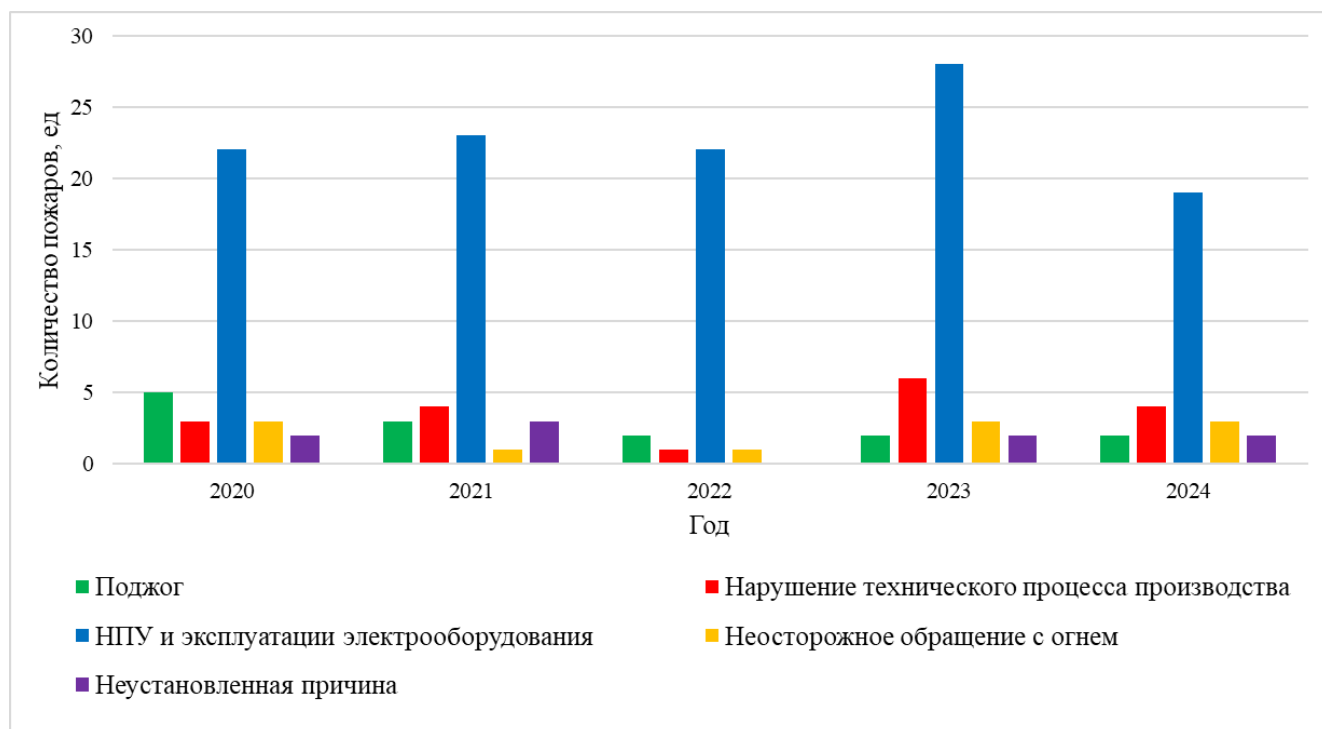


Рисунок 1.4 – Распределение основных показателей крупных пожаров за 2020-2024 годы по причинам их возникновения

При расследовании пожаров и составлении официальной статистики, как правило, упоминаются «юридические» причины. К ним относятся недостатки конструкции и изготовления, нарушения правил монтажа и другие причины. Однако указанная формулировка не всегда позволяет получить полное представление об истинных причинах возникновения пожаров.

При разработке научно обоснованных подходов к обеспечению пожарной безопасности кабельных изделий следует рассматривать данные об аварийных режимах работы электропроводок и связанные с ними физико-химические процессы, которые привели к пожару. В монографии Г.И. Смелкова [90] представлены статистические данные об отказах кабельных линий в электросетях ООО «Фирма ОРГРЭС» (рисунки 1.5, 1.6).

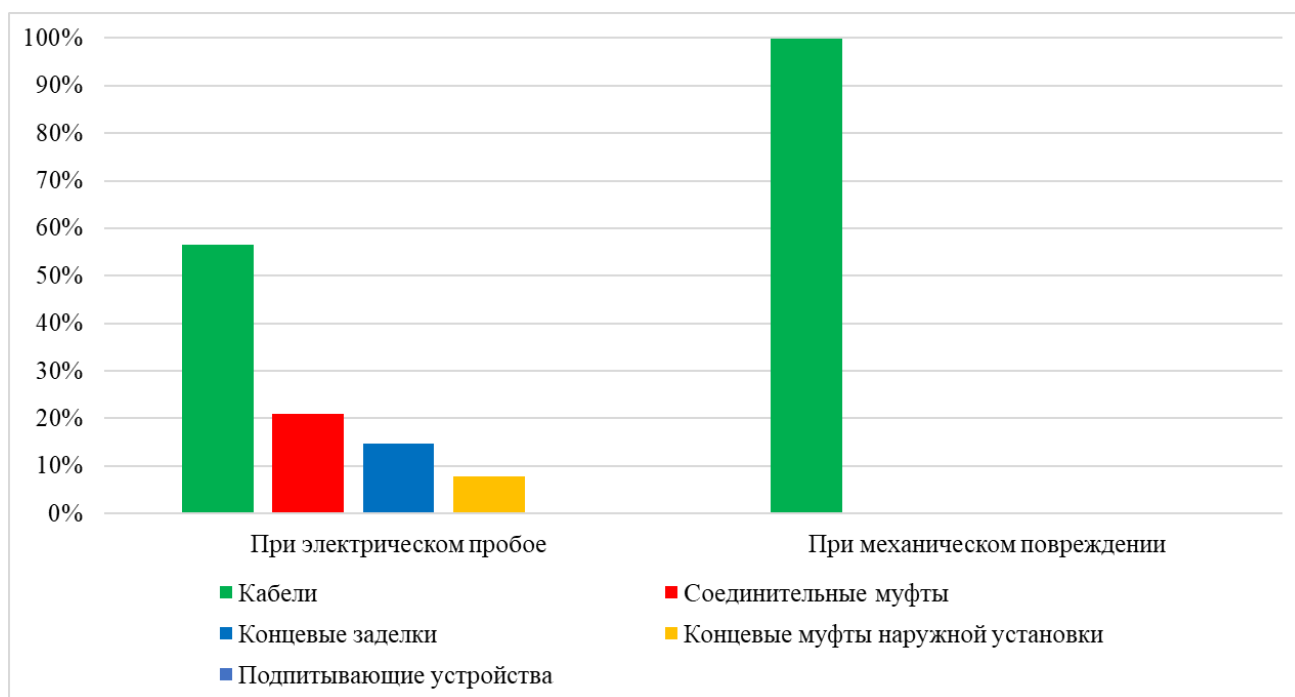


Рисунок 1.5 – Отказы кабельных электрических линий в электросетях
ООО «Фирма ОРГРЭС»

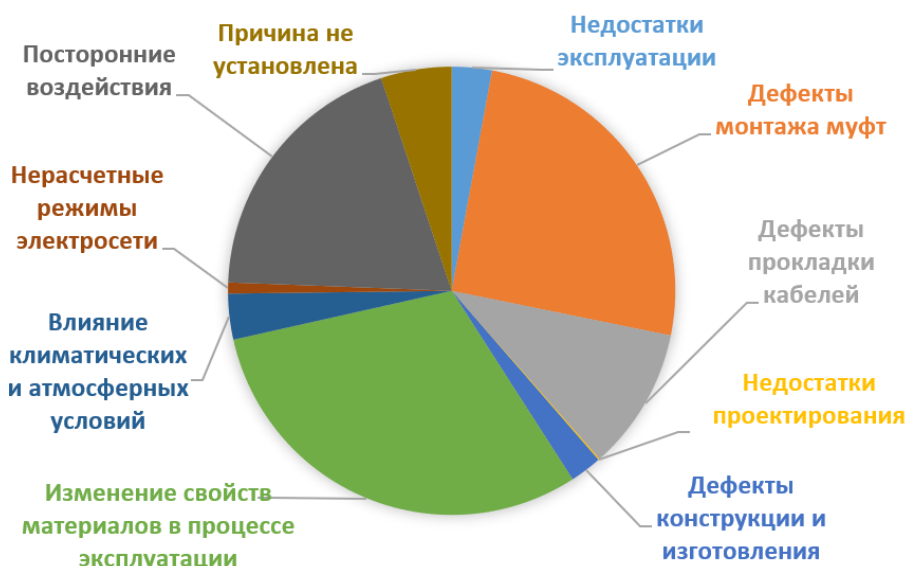


Рисунок 1.6 – Причины пробоя изоляции при отказах (авариях) кабельных энергетических линий в электросетях ООО «Фирма ОРГРЭС»

Из приведенных диаграмм видно, что основная часть аварийных режимов работы возникает на кабелях. При механическом пробое возникает больше отказов, чем при электрическом. Вместе с тем механический пробой менее опасен с точки зрения пожарной опасности, по сравнению с электрическим пробоем. Основной причиной пробоя изоляции является изменение свойств материалов в процессе эксплуатации. В результате пробоя изоляции возникают короткие замыкания. Основными аварийными режимами, приводящими к возгораниям электропроводок и кабельных линий, являются режимы сверхтоков, возникающие при коротких замыканиях и перегрузках [90].

Из анализа статистических данных следует:

- каждый седьмой пожар в Российской Федерации возникает по электротехническим причинам;
- электротехнические причины являются основными причинами возникновения крупных пожаров в Российской Федерации;
- пожары по электротехнической причине чаще всего возникают в зданиях жилого сектора;
- возгорание кабельных изделий является основным источником

возникновения пожаров по электротехническим причинам;

– наиболее распространённым аварийным режимом работы электропроводок, который может привести к пожару, является электрический пробой изоляции с последующим коротким замыканием;

– основной причиной электрического пробоя является старение изоляции.

1.2. Обзор кабельных изделий

Кабельное изделие – это электротехническое изделие, предназначенное для передачи электрической энергии. Все кабельные изделия можно разделить на виды, представленные в таблице 1.1 [18].

Таблица 1.1 – Виды кабельных изделий

Вид кабельного изделия	Определение
Электрический кабель (кабель)	Кабельное изделие, содержащее одну или более изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня, и пригодное, в частности, для прокладки в земле и под водой
Электрический провод (провод)	Кабельное изделие, содержащее одну или несколько скрученных проволок или одну, или более изолированных жил, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься легкая неметаллическая оболочка, обмотка и (или) оплетка из волокнистых материалов или проволоки, и не предназначенное, как правило, для прокладки в земле
Электрический шнур (шнур)	Провод с изолированными жилами повышенной гибкости, служащий для соединения с подвижными устройствами

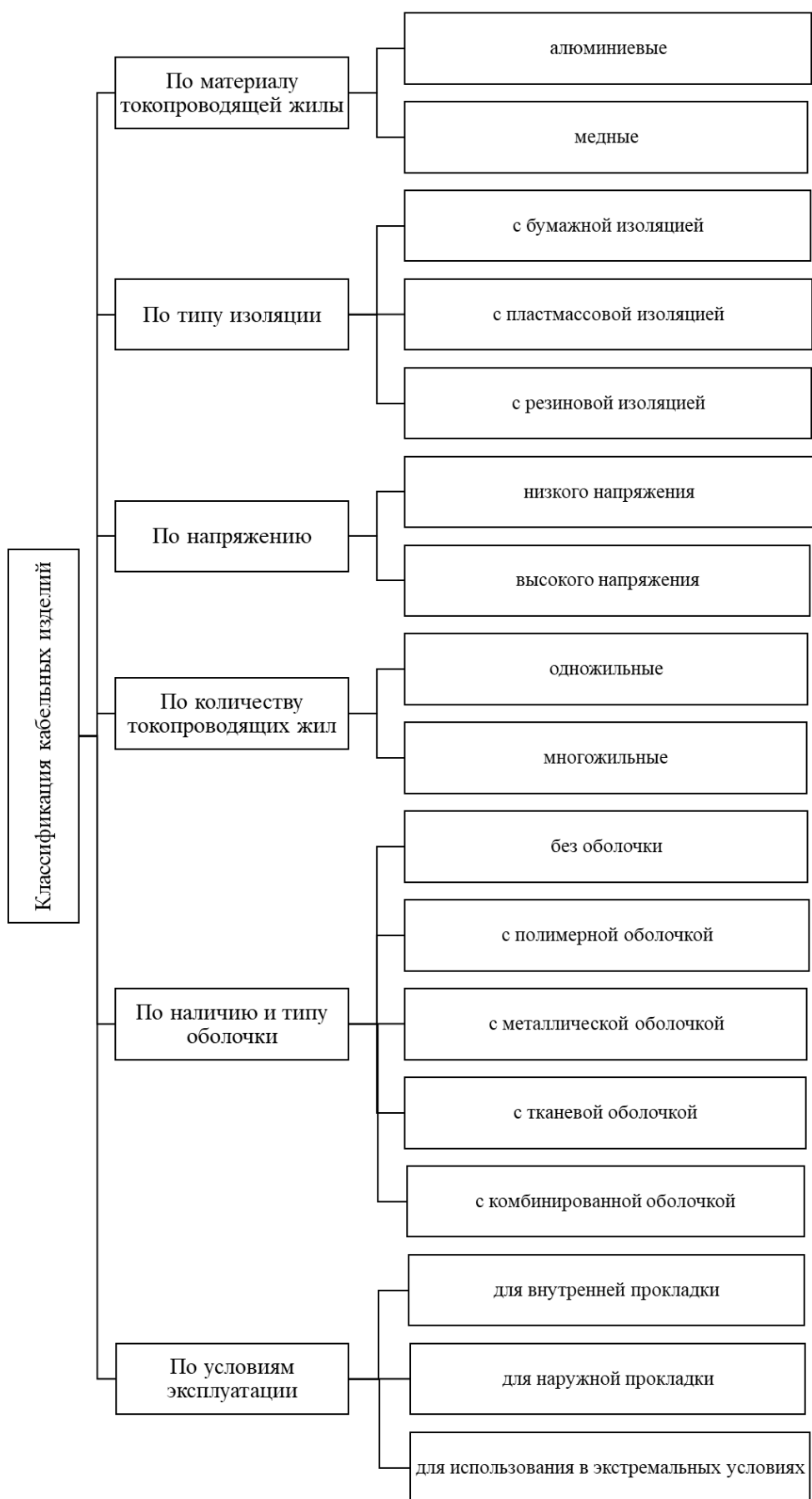


Рисунок 1.7 – Классификация кабельных изделий

Классификация кабельных изделий играет важную роль в обеспечении качества, безопасности и эффективности их использования в различных областях. Она позволяет систематизировать разнообразие продукции по определённым признакам, что облегчает выбор и использование кабелей в различных условиях и для разных целей. Основные признаки и классификация по ним приведены на рисунке 1.7.

Кабельное изделие может состоять из различных элементов, в зависимости от вида и назначения. Вместе с тем наиболее распространенные кабельные изделия общепромышленного назначения, как правило, состоят из токопроводящих жил, изоляции и оболочки (рисунок 1.8) [97].

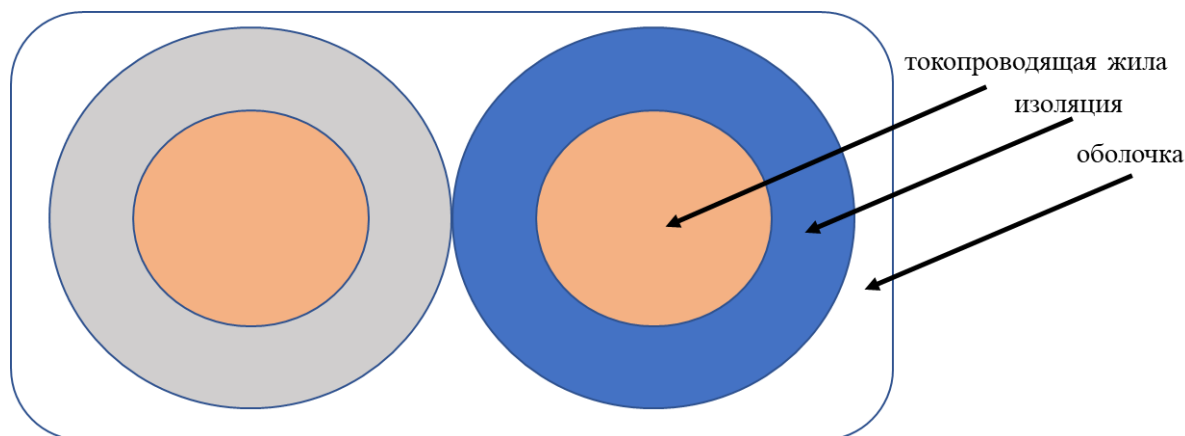


Рисунок 1.8 – Схема устройства наиболее распространённых кабельных изделий

Токопроводящая жила – это элемент кабельного изделия, который проводит электрический ток. В большинстве случаев токопроводящие жилы кабельных изделий изготавливаются из алюминия или меди. Запасы алюминия в природе весьма обширны, что объясняет сравнительно невысокую стоимость кабельных изделий с алюминиевыми токопроводящими жилами. Однако такие кабельные изделия менее устойчивы к повреждениям, возникающим в результате механических деформаций.

Проводящая способность меди уступает только серебру. Медь легче алюминия в обработке, более устойчива к изгибанию. Вместе со всеми

положительными сторонами применения медных токопроводящих жил присутствует и отрицательная – это дефицитность меди, которая обуславливает более высокую стоимость по сравнению с алюминиевыми жилами, что часто приводит к появлению фальсификата на рынке.

Оболочка кабельного изделия – это внешний слой, который покрывает изоляцию и, в некоторых случаях, непосредственно токопроводящую жилу. Она может быть выполнена из различных материалов, таких как полимеры, ткани и их комбинации.

Основная функция оболочки кабельного изделия заключается в защите внутренних компонентов от внешних воздействий, таких как влага, механические повреждения, ультрафиолетовое излучение, химические вещества и температурные колебания. Кроме того, оболочка обеспечивает герметичность и целостность конструкции кабельного изделия, что способствует сохранению его электрических характеристик и надёжности работы в различных условиях эксплуатации. Также оболочка может обеспечивать дополнительную механическую прочность и устойчивость к изгибам и растяжениям.

Изоляция кабельного изделия – это слой или совокупность слоев материала, который наносится на токопроводящую жилу с целью предотвращения её электрического контакта с окружающими элементами и внешней средой. Этот слой может быть выполнен из различных диэлектрических материалов, таких как резина, поливинилхлорид, полиэтилен, бумага и другие.

Основная функция изоляции кабельного изделия заключается в обеспечении безопасности эксплуатации, предотвращении коротких замыканий и снижении риска поражения электрическим током. Кроме того, изоляция защищает проводник от механических повреждений, влаги, химических веществ и других внешних воздействий, что способствует сохранению стабильности электрических характеристик и надёжности работы кабельного изделия.

В процессе изготовления кабельных изделий для изоляции применяются разнообразные материалы, каждый из которых выполняет свою задачу и влияет на

свойства и область применения. Ниже рассматриваются основные электроизоляционные материалы [44].

Полиэтилен – это полимер, который широко используется в различных отраслях благодаря своим уникальным свойствам. В качестве изоляции кабельных изделий полиэтилен применяется благодаря своей устойчивости к внешним воздействиям, гибкости и относительно низкой стоимости.

Полиэтилен получают путём полимеризации этилена. Он представляет собой термопластичный материал, который может быть переработан при нагревании. Полиэтилен обладает хорошими диэлектрическими свойствами, что делает его подходящим материалом для изоляции кабельных изделий.

Полиэтилен имеет ряд преимуществ его применения в качестве диэлектрика. Этот материал не впитывает влагу и устойчив к воздействию многих химических веществ, что обеспечивает надёжную изоляцию и продлевает срок службы кабельных изделий. Он легко поддаётся формовке и может быть использован для изоляции кабельных изделий сложной формы. По сравнению с некоторыми другими материалами, полиэтилен имеет относительно низкую стоимость, что делает его доступным для широкого применения. Данный материал обладает высокой стойкостью к износу и механическим повреждениям, что обеспечивает длительный срок службы изоляции. Полиэтилен является хорошим диэлектриком, что важно для обеспечения безопасности и надёжности кабельных систем.

К недостаткам применения полиэтилена в качестве электроизоляционного материала относится высокая теплопроводность по сравнению с некоторыми другими изоляционными материалами, что может влиять на тепловые характеристики кабельных изделий и ограничивает применение в условиях высоких температур. При длительном воздействии ультрафиолетовых лучей полиэтилен может подвергаться деградации, что снижает его изоляционные свойства. Поэтому при использовании полиэтилена для изоляции кабельных изделий в наружных условиях может потребоваться дополнительная защита от ультрафиолетового излучения.

Резина – это эластичный материал, который получают путём вулканизации натурального или синтетического каучука с различными добавками. Она обладает рядом свойств, которые делают возможным ее использование в качестве изоляционного материала для кабельных изделий.

Данный материал имеет ряд преимуществ его применения в качестве диэлектрика. Резина способна сохранять свои изоляционные свойства при деформациях, что важно для кабельных изделий, которые могут подвергаться изгибу и растяжению в процессе эксплуатации. Резиновая изоляция обладает высокой диэлектрической прочностью, что позволяет использовать её для изоляции кабелей, работающих под высоким напряжением. Этот электроизоляционный материал устойчив к влаге, химическим веществам и механическим повреждениям, что обеспечивает долговечность и надёжность эксплуатации. Резина легко формуется и обрабатывается, что позволяет изготавливать из неё изоляционные изделия сложной формы.

Недостатками применения резины в качестве электроизоляционного материала является низкая термостойкость, она может терять свои изоляционные свойства при высоких температурах, что ограничивает её применение в некоторых областях. Под воздействием ультрафиолетового излучения, озона и других факторов резина может стареть, теряя свои изоляционные свойства. По сравнению с некоторыми другими изоляционными материалами, резина может иметь более высокую стоимость.

Бумага – это волокнистый материал, который получают из целлюлозы, обычно из древесины. Она обладает рядом свойств, которые делают её пригодной для использования в качестве изоляции в кабельных изделиях. Бумага имеет относительно низкую плотность и хорошую гибкость, что облегчает её обработку и монтаж. Она также может быть пропитана различными составами для улучшения её электрических и механических свойств.

Бумага является относительно недорогим материалом, что делает её привлекательной для использования в массовом производстве кабельных изделий.

Она легко принимает форму кабельного изделия, что упрощает процесс изоляции токопроводящих жил. При пропитке специальными составами бумага может обеспечивать надёжную изоляцию и защиту от электрических пробоев. Данный диэлектрик является биоразлагаемым, что может быть важным фактором при выборе изоляционного материала с учётом экологических требований.

Существуют и определенные недостатки применения бумаги в качестве диэлектрика. Данный материал является гидрофильным, что может привести к снижению его электроизоляционных свойств и сокращению срока службы кабельного изделия. Меньшая механическая прочность, по сравнению с некоторыми другими изоляционными материалами, может ограничивать применение бумаги в условиях высоких механических нагрузок. Необходимость дополнительной пропитки для улучшения электрических свойств и защиты от внешних воздействий усложняет процесс производства и увеличивает стоимость бумажной изоляции.

ПВХ – синтетический полимер, который является наиболее распространенным материалом для применения в качестве изоляции токопроводящих жил кабельных изделий [3,55]. Он обладает хорошими диэлектрическими свойствами, устойчив к воздействию влаги, химикатов и ультрафиолетового излучения. Это делает изоляцию из ПВХ популярным материалом для изоляции кабельных изделий, особенно в условиях эксплуатации в агрессивных средах. Кроме того, ПВХ легко обрабатывается, что позволяет изготавливать из него изоляционные оболочки различных форм и размеров. Это обеспечивает гибкость при проектировании и монтаже кабельных систем. ПВХ является относительно недорогим материалом, что делает его доступным для широкого применения в кабельной промышленности.

Не смотря на широкий спектр преимуществ, ПВХ изоляция обладает рядом недостатков. При воздействии высоких температур ПВХ может выделять токсичные газы, что требует соблюдения требований пожарной безопасности при монтаже и эксплуатации. Данный полимер имеет относительно низкую

температуру плавления, что ограничивает его применение в условиях высоких температур. Под воздействием негативных эксплуатационных факторов ПВХ может терять свои свойства, что требует защиты кабельных изделий от внешних воздействий и исследования процессов старения в условиях эксплуатации.

Кабельные изделия общепромышленного назначения с ПВХ изоляцией получили наиболее широкое распространение по сравнению с кабельными изделиями, имеющими изоляцию из других материалов. Высоким спросом пользуются провода и кабели, имеющие маркировки: АППВ, ПБВВГ, ШВВП, ВВГ, ПВС, КГВВ, ВБШ [63].

1.3. Физико-химические свойства и строение пластика на основе ПВХ, влияющие на его пожарную опасность

ПВХ изоляцию производят из пластика, эксплуатационные характеристики которого зависят от свойств основного полимерного компонента. ПВХ является высокомолекулярным хлорсодержащим термопластичным полимером. Химическая формула: $[-C_2H_3Cl-]_n$. Свойства ПВХ (таблица 1.2) во многом определяются технологией его получения (таблица 1.3) [100].

Таблица 1.2 – Физико-химические свойства ПВХ

Физико-химическое свойство	Значение
Температура стеклования, К	343,15-353,15
Температура вязкого течения, К	423,15-473,15
Молекулярная масса, а. е. м. $\cdot 10^3$	9-170
Плотность, $кг/м^3 \cdot 10^3$	1,35-1,43
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,159
Температура начала реакции дегидрохлорирования, К	383,15-393,15

Таблица 1.3 – Характеристика способов получения ПВХ

Способ получения	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
Суспензионный	Метод основан на получении водной суспензии, содержащей мономер – винилхлорид, в которую добавляют ингибиторы и регуляторы, которые запускают процесс полимеризации. В процессе полимеризации мономер превращается в полимер и остается в суспензии в виде мелких капелек. Получил наибольшее распространение в народном хозяйстве	Высокая производительность, возможность получения ПВХ с разными свойствами, чем обусловлено применение в широком спектре отраслей	Значительные энергетические затраты и затраты на оборудование, проблематика экологичной утилизации отходов и загрязнения окружающей среды
Эмульсионный	Метод основан на создании эмульсии мономера – винилхлорида и воды. Под воздействием эмульгатора мономер превращается в полимер ПВХ в виде мелких частиц в эмульсии. В процессе полимеризации происходит увеличение длины цепи полимера	Низкая цена сырья, высокий процент выхода готовой продукции, возможность производства полимеров с различными заданными свойствами	Высокая вязкость эмульсии, проблемы с управлением реакцией полимеризации, более высокая стоимость очистки и утилизации отходов по сравнению с другими методами
Полимеризация в массе	Метод основан на термической полимеризации мономеров винилхлорида в условиях повышенной температуры и давления	Возможность производства ПВХ высокого качества с хорошими механическими свойствами и широкой областью применения	Высокая стоимость оборудования, сложный процесс контроля качества, риски возгорания или взрыва при обработке (при высоких температурах, давлении)

ПВХ получают радикальной полимеризацией винилхлорида, который имеет сравнительно высокую доступность, что повлияло на широкое распространение ПВХ в народном хозяйстве. Поливинилхлорид, благодаря наличию хлоридных групп в структуре, относится к самозатухающим и трудногорючим материалам. Диэлектрические свойства ПВХ (таблица 1.4) характеризуются высоким сопротивлением электрическому току [120].

Таблица 1.4 – Диэлектрические характеристики ПВХ

Наименование характеристики		Значение
Удельное объемное сопротивление, Ом·см, при температуре, °C	10	10^{15}
	90	$2 \cdot 10^{11}$
Диэлектрическая проницаемость при температуре, °C	10	4
	90	8,6
Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре, °C	10	$5 \cdot 10^{-2}$
	90	$7 \cdot 10^{-2}$
Удельное термическое сопротивление, м·К·(Вт) ⁻¹		7

При горении ПВХ выделяются токсичные газы, такие как хлороводород (HCl) и диоксины. ПВХ может вступать в реакции с сильными окислителями, такими как перекиси или галогены. Например, при воздействии хлора или гипохлоритов может происходить хлорирование ПВХ с образованием хлорированных производных. ПВХ может взаимодействовать с некоторыми химическими веществами, например, с кислотами или щелочами. В зависимости от условий реакции и природы вещества, это может привести к изменению свойств ПВХ или даже к его разрушению. Например, под воздействием некоторых сильных кислот ПВХ может гидролизироваться, что приводит к разрушению полимерной цепи.

Под воздействием определённых химических агентов или при высоких температурах ПВХ может подвергаться реакции сшивания, в результате которой отдельные полимерные цепи соединяются между собой, образуя трёхмерную структуру. Это может изменить механические свойства материала, например, увеличить его жёсткость.

Молекула ПВХ характеризуется конфигурационной изомерией (рисунок 1.9) [46]. Конфигурация молекулы может быть:

- изотактической (атомы хлора расположены по одну сторону от скелета молекулы);
- синдиотактической (атомы хлора расположены по разные стороны от скелета молекулы);
- атактической (изо- и синдиотактические последовательности чередуются случайным образом).

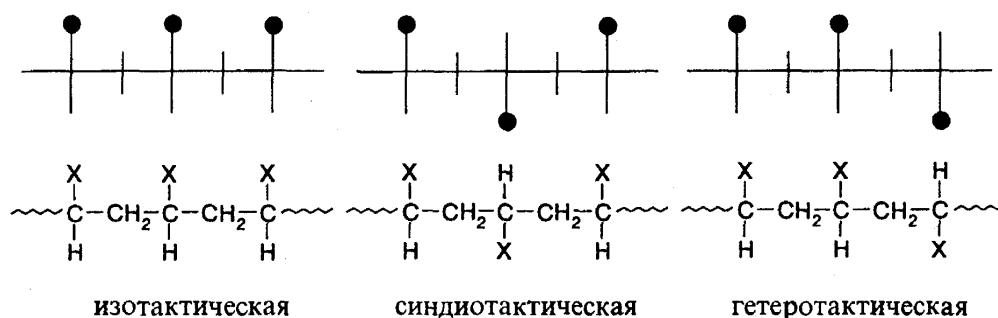


Рисунок 1.9 – Конфигурационная изомерия молекулы полимера

В связи с вариативностью структуры, молекулам ПВХ присуще достаточно большое количество дефектов, что обуславливает подверженность деградации под воздействием различных деструктивных факторов (ультрафиолетовое излучение, высокая температура и пр.) [150].

Первичная деструкция ПВХ характеризуется в основном реакцией дегидрохлорирования. При реакции дегидрохлорирования разрывается связь углерода с атомами хлора и водорода, которые связываются между собой, образуя молекулу хлороводорода, а оставшиеся после разрыва связи замыкаются на соседних атомах углерода, образуя полиеновые последовательности (чередующиеся одинарные и двойные связи углерода между собой) [54]. Процесс дегидрохлорирования ПВХ, приводящий к образованию полиеновых последовательностей в молекуле ПВХ приведен на рисунке 1.10 [38].

Снижение количества хлоридных групп повышает пожарную опасность ПВХ. Формирование полиеновых последовательностей в полимерной цепи серьезным образом изменяет свойства ПВХ (электрическую проводимость, оптическое пропускание, жёсткость и пр.). На втором этапе деструкции ПВХ могут образоваться смолы и другие растворимые вещества, которые затем подвергаются вторичной деструкции и происходит разрыв полимерных цепей ПВХ [154,125,144,155,161,127,126].

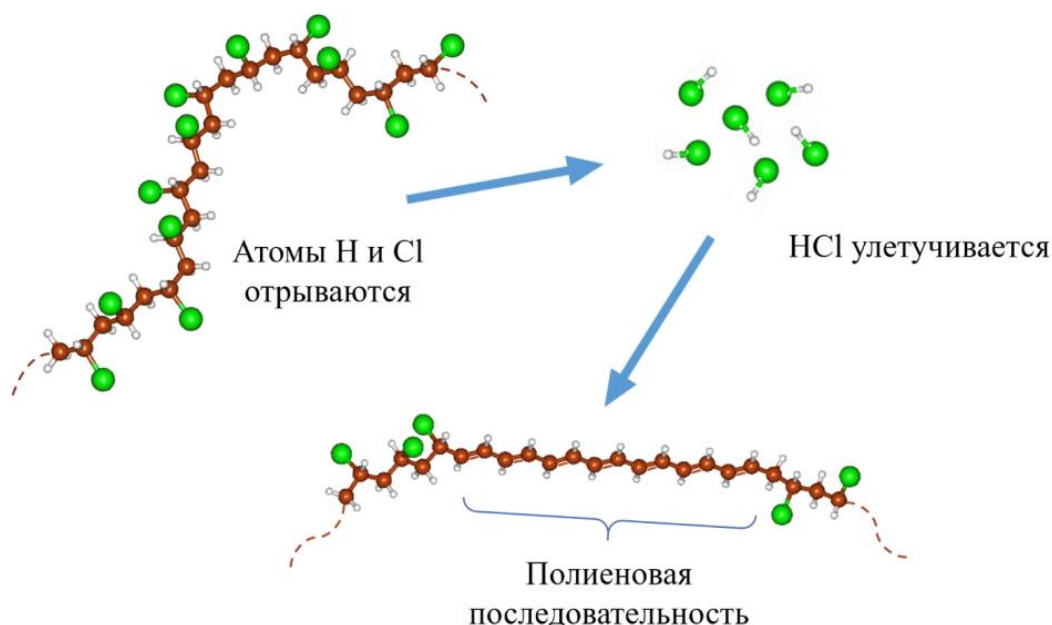


Рисунок 1.10 – Процесс дегидрохлорирования ПВХ, приводящий к образованию полиеновой последовательности в молекуле ПВХ

На сегодняшний день большое количество работ посвящено как повышению пожарной безопасности продукции с использованием поливинилхлорида [78,79,53,94,88], так и изучению особенностей его структуры и свойств [134,95,104].

Для изоляции токопроводящих жил кабельных изделий используется пластикат на основе ПВХ, который кроме предконденсата поливинилхлорида содержит 30-90 массовых частей пластификатора (как правило эфиров фталевой, фосфорной, себаценовой или адипиновой кислот). В его состав входят также термостабилизаторы, смазки, пигменты или красители, минеральные наполнители и эластомеры. Самая простая композиция ПВХ изоляции включает в себя: экструзионный поливинилхлорид, пластификатор (обычно диэтилфталат, дибутилфталат), стабилизатор (стеарат кальция) и пигменты [51].

Поливинилхлоридный пластикат предназначен для изоляции, а также для защитных оболочек проводов и кабелей, работающих в зависимости от марки пластиката и конструкции провода и кабеля в диапазоне температур от -60 до $+70$ °С, для пластиката марки ИТ-105 – до $+105$ °С. Стандартные типы и марки ПВХ

пластиков, применяемых для производства кабельных изделий, приведены в таблице 1.5 [24].

Таблица 1.5 – Стандартные типы и марки ПВХ пластиков, применяемые для производства кабельных изделий

Тип	Марка	Тип	Марка
И – изоляционный	И40-13 И40-13А И50-13 И40-14 И50-14 И60-12	О – изоляционный и для оболочек	И045-12
ИТ – изоляционный термостойкий	ИТ-105	О – для оболочек	О-40 О-50 О-55 ОМБ-60 ОНМ-50 ОНЗ-40

Физико-механические свойства ПВХ пластика определяются в основном процентным содержанием пластификатора в его составе. С увеличением содержания пластификатора улучшаются износостойчивость, гибкость, морозостойчивость и прочие необходимые свойства для кабельного изделия. Повышение содержания пластификатора в ПВХ пластике приводит к ухудшению его диэлектрических свойств и повышению пожарной опасности.

Таким образом, ПВХ пластик, применяемый для изоляции токопроводящих жил, несмотря на все свои преимущества, с точки зрения обеспечения пожарной безопасности, имеет ряд недостатков. Недостатки обусловлены горючестью материала, а также подверженностью эксплуатационному старению [152].

1.4. Анализ пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ

Изучению вопроса пожарной опасности кабельной продукции на сегодняшний день посвящено достаточно большое количество исследований [50, 2,32,4]. Пожарную опасность кабельных изделий можно разделить на три составные части, каждая из которых имеет свои особенности (рисунок 1.11).

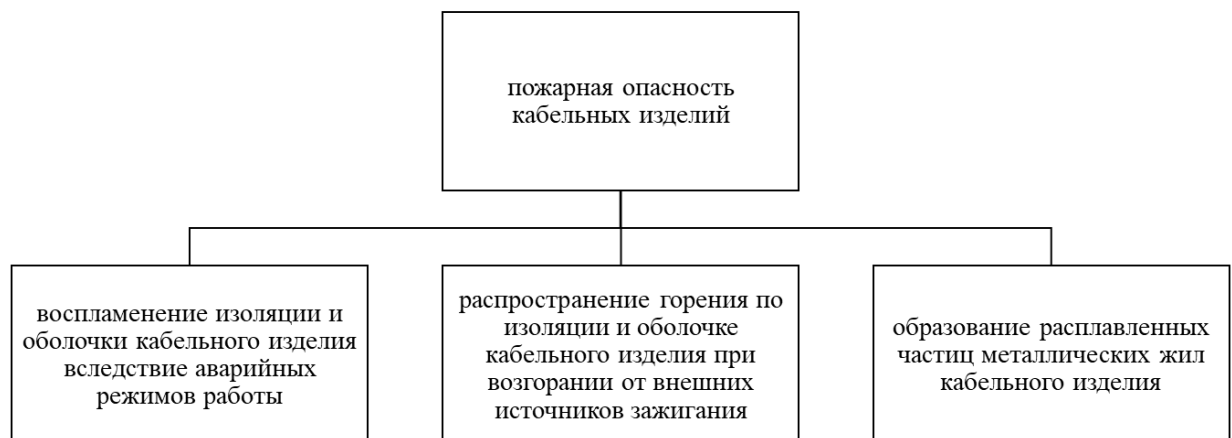


Рисунок 1.11 – Пожарная опасность кабельных изделий

Основными аварийными режимами работы, которые могут привести к воспламенению изоляции и оболочки кабельного изделия, являются:

- короткое замыкание (металлическое или неметаллическое);
- токовая перегрузка;
- большое переходное сопротивление.

Коротким замыканием (КЗ) принято называть не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание токоведущих частей, имеющих различную полярность, подключенных к различным фазам или имеющих различные потенциалы [91].

Металлическое (полное) КЗ характеризуется соприкосновением токопроводящих жил, находящихся под напряжением. В таком случае сопротивление в месте контакта проводников стремится к 0, а значение силы

проходящего по проводнику электрического тока стремительно возрастает. В некоторых случаях подобные короткие замыкания происходят во время ремонта электрооборудования, которое находится под напряжением, или после завершения ремонта и подачи напряжения на оборудование, которое до этого было обесточено.

В случае КЗ в электропроводках, где возможно прохождение значительных токов (например, в электросети с напряжением 220, 380 и более В), наибольшую угрозу возникновения пожара представляет электрическая дуга, возникающая при КЗ. Температура электрической дуги варьируется в диапазоне 1500-4000 °С. Также пожароопасной является токовая перегрузка, возникающая в следствие прохождения токов КЗ и приводящая к нагреву изоляции и ее воспламенению [92].

Неметаллическим (неполным) КЗ принято называть КЗ, при котором замыкание происходит не через металлические элементы электрической цепи, а через неметаллические элементы или материалы. В случае возникновения неполного КЗ в кабельном изделии такими элементами или материалами могут выступать: карбонизированные участки изоляции, а также пыль, грязь и влага, попавшие в микротрещины в изоляции.

При неметаллическом коротком замыкании изоляция нагревается, что может привести к её воспламенению. Кроме того, неметаллическое КЗ в результате нагрева изоляции и ее деструкции чаще всего приводит к пробое изоляции, который сопряжен с теми же пожароопасными проявлениями, что и металлическое КЗ.

Токовой перегрузкой называется аварийный режим, при котором в проводниках электрических сетей, машин и аппаратов возникают токи, длительно превышающие величины, допускаемые нормами [29].

При токовой перегрузке пожароопасным является тепловыделение от проходящего по токопроводящим жилам электрического тока, которое приводит к воспламенению изоляции. В результате токовой перегрузки сначала возникает неполное КЗ, которое впоследствии приводит к пробое изоляции и полному КЗ с присущими им пожароопасными проявлениями.

Большим переходным сопротивлением (БПС) называют аварийный пожароопасный режим, возникающий при переходе электрического тока с одного проводника на другой [60]. БПС появляется, когда проводники или части проводника недостаточно плотно соприкасаются друг с другом. В результате в месте контакта выделяется такое количество тепла на единицу площади, которое способно привести к воспламенению изоляции и оболочки провода или кабеля. Основной причиной возникающего БПС в кабельных изделиях является излом или дефект токопроводящей жилы при сохранении контакта.

В случае КЗ возникает электрическая дуга, которая может привести к расплавлению алюминиевых и медных проводов, а также латунных контактов и стальных деталей. В результате этого процесса образуются мелкие частицы расплавленного металла, которые разлетаются в разные стороны и могут стать источником зажигания при совокупности определенных условий. Частицы алюминия, которые возникают в результате короткого замыкания в проводах, более пожароопасны, чем частицы меди (тепловыделение при сгорании алюминия в 11 раз выше, чем при сгорании меди) [15].

Еще одним фактором, определяющим пожарную опасность кабельных изделий, является наличие горючего вещества в виде изоляции и оболочки, по которым возможно распространение горения. Особенно данная проблема актуальна для кабельных проходок, соединяющих смежные помещения или квартиры. Огнестойкость кабельных проходок во многом определяется их конструкцией. Риск распространения пожара по кабельным изделиям в основном зависит от свойств изоляции и способа прокладки (горизонтальный, вертикальный, в пучке или одиночный, по поверхности или внутри трубы, лотка или короба) [106].

Актуальным является вопрос снижения пожарной опасности и создания пожаробезопасных материалов для изоляции кабельных изделий на основе ПВХ, что подтверждается рядом работ и патентов [119,116,118,115,117,34,93]. На рисунке 1.12 приведены основные пути снижения пожарной опасности кабельных изделий в электропроводках.

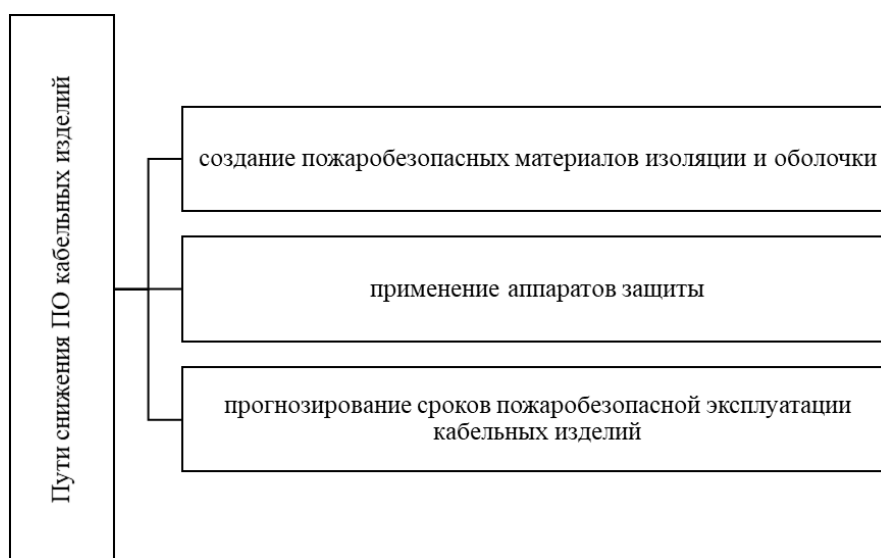


Рисунок 1.12 – Пути снижения пожарной опасности кабельных изделий

На сегодняшний день на рынке представлены кабельные изделия с повышенными требованиями пожарной безопасности к ним: не распространяющие горение при одиночной или групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением, не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении, с повышенной огнестойкостью, с низкой токсичностью продуктов горения.

Внедрение таких продуктов на рынок повышает пожарную безопасность эксплуатации кабельных изделий с указанными характеристиками, но не гарантирует отсутствие пожарной опасности в условиях эксплуатации и пожара. Кроме того, кабельные изделия пониженной пожарной опасности стоят дороже, что негативно отражается на масштабах применения их собственниками, особенно в жилом секторе.

Как правило, для создания пожаробезопасных изоляционных материалов на основе ПВХ в рецептуру пластика вводят дополнительные компоненты, снижающие пожарную опасность изделия. Добавление в состав новых компонентов влияет на возможность введения необходимого количества пластификатора (улучшающего физико-механические свойства изоляции), либо на

возможность применения необходимого количества самого ПВХ (который обуславливает самозатухающие свойства изоляции).

Важной и актуальной научной задачей является оценка влияния процессов старения на изменение пожароопасных свойств модифицированных полимеров в процессе эксплуатации кабельного изделия. Например, в работе [158] для некоторых антипиренов на основе брома период полувыведения из полипропилена при 30 °C составил 200 дней. Без проведения исследований, направленных на оценку влияния эксплуатационного старения на свойства полимеров пониженной горючести невозможно говорить об эффективности применения дополнительных компонентов в составе ПВХ и снижении за счет их введения пожарной опасности кабельного изделия [67].

Применение аппаратов защиты электропроводок и электрооборудования значительно повышает безопасность их эксплуатации. К аппаратам защиты относятся: плавкие предохранители, автоматические выключатели, тепловые реле, устройства защитного отключения. Возникновение пожаров на объектах, оборудованных аппаратами защиты, действие которых основано на тепловых проявлениях электрического тока, обусловлено инертностью отключения электрического тока в электропроводках и электрооборудовании, работающих в аварийном режиме [75].

Кроме того, такие аппараты защиты не предотвращают возникновение небольших токов утечки и неполных КЗ, при которых значения электрического тока не превосходят расчетные значения работы. Под воздействием токов утечки и неполного КЗ происходит подготовка изоляции к полному КЗ и воспламенению. Таким образом, существует возможность, при которой аппарат защиты сработает после воспламенения изоляции, а по подготовленной горючей среде произойдет распространение пожара.

Устройства защитного отключения предназначены для защиты человека от поражения электрическим током и предотвращения пожаров, связанных с неисправностями электрооборудования и утечками тока. Однако они не всегда

могут обеспечить пожарную безопасность. Наличие устройства защитного отключения не способно предотвратить неполное короткое замыкание, а значит не исключает возможность возникновения пожара.

Еще одним решением, позволяющим обеспечить пожарную безопасность кабельных изделий, является прогнозирование ресурса пожаробезопасной эксплуатации, которое позволяет определить срок службы в условиях воздействия конкретных эксплуатационных факторов и обеспечить надёжную и безопасную работу электротехнических систем [80].

Для прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий используются различные методы и подходы. Они могут быть основаны на анализе физико-химических свойств материалов, из которых изготовлены кабельные изделия, изучении их поведения в условиях воздействия высоких температур, механических нагрузок, химических веществ и других эксплуатационных факторов.

Одним из наиболее распространённых методов является расчётный метод, который основан на использовании математических моделей и формул для определения срока службы кабеля. Эти модели учитывают различные факторы, влияющие на пожаробезопасные характеристики кабелей, такие как температура, характеристики электрического тока, механические нагрузки и т. д.

Также для прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий могут использоваться экспериментальные методы, основанные на проведении испытаний образцов кабельных изделий в условиях, моделирующих реальные эксплуатационные условия. Результаты этих испытаний позволяют определить срок службы и выявить потенциальные слабые места кабельного изделия.

Таким образом, в кабельном изделии, находящимся под напряжением, сочетаются все факторы, необходимые для возникновения и распространения пожара: возникающие при аварийных режимах источники зажигания; горючие материалы (оболочка и изоляция); а также наличие в зоне реакции окислителя в

виде кислорода воздуха. Наиболее пожароопасным из аварийных режимов работы считаем неполное КЗ, при котором известные аппараты защиты не обеспечивают исключение возможности возникновения пожара [76].

1.5. Оценка процессов старения изоляции кабельных изделий в условиях эксплуатации

В процессе эксплуатации на кабельные изделия влияют различные негативные факторы: ультрафиолетовое излучение; низкие и высокие температуры, а также их перепад; механические воздействия; повышенная влажность и др. Вследствие воздействия эксплуатационных факторов происходит старение изоляции кабельного изделия [61].

При открытой прокладке на кабельные изделия может воздействовать УФ-излучение, которое провоцирует фотоиндуцированную деградацию полимеров, приводящую к их распаду на более короткие звенья и простые вещества.

Механические воздействия на изоляцию кабельных изделий могут быть различны: удары, нагрузки, изгибы и т.д. Эти воздействия могут привести к повреждениям структуры изоляции, образованию трещин, деформации материала и другим изменениям, которые способствуют старению изоляции.

Под воздействием влаги снижаются диэлектрические свойства изоляции, вплоть до возникновения токов утечки, что особенно актуально при наличии микротрещин.

Электрическое старение изоляции вызвано возникновением частичных разрядов, которые приводят к постепенному появлению микротрещин и их аккумулярованию. Частичный разряд в изоляции кабельного изделия – это локальный электрический разряд, возникающий внутри изоляционного слоя и не приводящий к полному пробое изоляции. Однако такие разряды могут свидетельствовать о наличии дефектов в изоляции и являются потенциальным предвестником более серьёзных повреждений, включая снижение электрической

прочности и ухудшение эксплуатационных характеристик кабельных изделий. Вследствие возникновения микротрещин происходит электрический (прокалывающий) пробой. Как правило прокалывающий пробой возникает в наиболее уязвимом месте и обычно связан с локальным разрушением изоляции кабельного изделия.

При эксплуатации кабельных изделий в условиях низких температур наблюдается изменение физико-химических характеристик изоляционных материалов, что может привести к ухудшению их диэлектрических свойств. Это связано с изменением диэлектрической проницаемости материалов, снижением эластичности, ухудшением адгезии между слоями изоляции и изменением механических свойств. В результате увеличивается риск механических повреждений, отслоения слоёв, деформации кабельных изделий, что может привести к нарушению целостности изоляции. Также изменяются электрические характеристики изоляционных материалов, такие как удельное сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь, что негативно влияет на надёжность изоляции и увеличивает риск электрических пробоев.

В условиях резких перепадов температур изоляция может испытывать термические напряжения, что также негативно сказывается на её состоянии. При охлаждении изоляционные материалы могут сжиматься, а при нагреве – расширяться, что вызывает появление трещин и микрповреждений. В результате снижается надёжность кабельных изделий, повышается риск возникновения коротких замыканий и других аварийных режимов работы.

Вследствие воздействия высоких температур в кабельном изделии может возникать тепловой пробой, который происходит при условии, что тепловыделение в изоляции превышает количество отводимого тепла. Такой пробой развивается постепенно и завершается, как правило, в тех местах, где в связи с повышением диэлектрических потерь рост температуры интенсифицируется. Повышенная температура окружающей среды может способствовать развитию теплового пробоя, что позволяет говорить о том, что вследствие пробоя могут возникать

вторичные очаги пожара. Как правило, пробой носит комбинированный характер. Нагрев, вызванный частичными разрядами, приводит к местному перегреву изоляции и развитию в этом месте теплового пробоя [74].

При эксплуатации кабельного изделия под воздействием электрической нагрузки токопроводящая металлическая жила нагревается. Выделяемое тепло приводит к нагреванию изоляции до невысоких температур (в сравнении с температурой начала деструкции ПВХ пластиката: 180 °С [102]), также на изоляцию и оболочку кабельного изделия воздействуют внешние температуры. Данный нагрев не приводит к быстропротекающему разложению полимера. Однако в течение срока эксплуатации длительный нагрев приводит к появлению и аккумулялированию дефектов химической структуры компонентов изоляции (в частности ПВХ) и повреждению её структурной целостности.

В результате воздействия вышеописанных негативных факторов происходит старение изоляции кабельных изделий. В процессе старения в полимерах происходят процессы, направленные на установление термодинамического и статистического равновесия в физической системе [71]. Данный процесс и называется «физическим старением». Установлено, что негативные факторы, приводящие к процессам старения, действуют как отдельно, так и в совокупности [96].

На изоляцию кабельных изделий при скрытой прокладке воздействует, как правило, два негативных фактора: электрический ток и тепло. Под воздействием повышенной температуры начинается термическая деструкция материалов изоляции кабельного изделия. При прохождении электрического тока на участках, подверженных деструкции, возникают частичные разряды, катализирующие разрушение материала изоляции. Таким образом, термическая стойкость полимера к деструкции нивелирует негативное воздействие электрического тока.

Механизм термической деструкции ПВХ пластиката, из которого изготавливают изоляцию кабельных изделий связан с физическими процессами миграции в поверхностный слой и выпаривания пластификатора из структуры

изоляции под воздействием температуры, вследствие чего возникают дефекты структуры и появляются микротрещины в материале изоляции. При условиях эксплуатации, сопряженных со сниженной возможностью улетучивания пластификатора с поверхности материала (например, при скрытой прокладке электропроводки), возможно скопление пластификатора в поверхностном слое изоляции. Также вследствие воздействия термофлуктуационных процессов может протекать дегидрохлорирование ПВХ с образованием полиеновых последовательностей углерода.

Таким образом, основными негативными эксплуатационными факторами, воздействующими на изоляцию кабельных изделий при прокладке электропроводок внутри отапливаемых помещений, являются: термическое воздействие и воздействие электрического тока. В следствие процессов, протекающих при старении изоляции, возможно повышение пожарной опасности кабельных изделий, что может выражаться в повышении горючести изоляции [157] и вероятности ее пробоя [66].

1.6. Обзор нормативного правового регулирования оценки влияния эксплуатационного старения на пожарную опасность кабельных изделий

Согласно статье 12 технического регламента о требованиях пожарной безопасности [99] все вещества и материалы (за исключением строительных, текстильных и кожевенных материалов) классифицируются по пожарной опасности. Частью 3 данной статьи установлено, что методы испытаний на горючесть веществ и материалов устанавливаются нормативными документами по пожарной безопасности, перечень которых утвержден распоряжением Правительства [65].

В данном нормативном правовом акте указан ГОСТ 21793-76 [19], который предназначен для сравнительной оценки способности пластмасс гореть в исследовательских испытаниях. В этом перечне также присутствует

ГОСТ 12.1.044-89 [16], согласно которому значение кислородного индекса следует применять, в том числе, при контроле горючести полимерных материалов.

Объектом исследования в вышеприведенных методиках являются вещества и материалы. На наш взгляд, в целях получения объективных данных, следует рассматривать не материал, а изделие, т.к. наличие токопроводящей жилы и форма изделия могут существенно повлиять на интенсивность и характер физико-химических процессов, протекающих при горении кабельных изделий [14].

Требования пожарной безопасности, предъявляемые к кабельным изделиям описаны в ГОСТ 31565-2012 [22]. Данный нормативный документ распространяется на кабельные изделия, к которым предъявляются требования по пожарной безопасности, предназначенные для прокладки в зданиях и сооружениях, и устанавливает классификацию, требования пожарной безопасности, показатели пожарной опасности (рисунок 1.13), а также преимущественные области применения. Испытания производимых кабельных изделий осуществляют в соответствии с серией стандартов [28], положительные результаты испытаний являются основанием для нанесения на кабель соответствующей идентификационной маркировки.

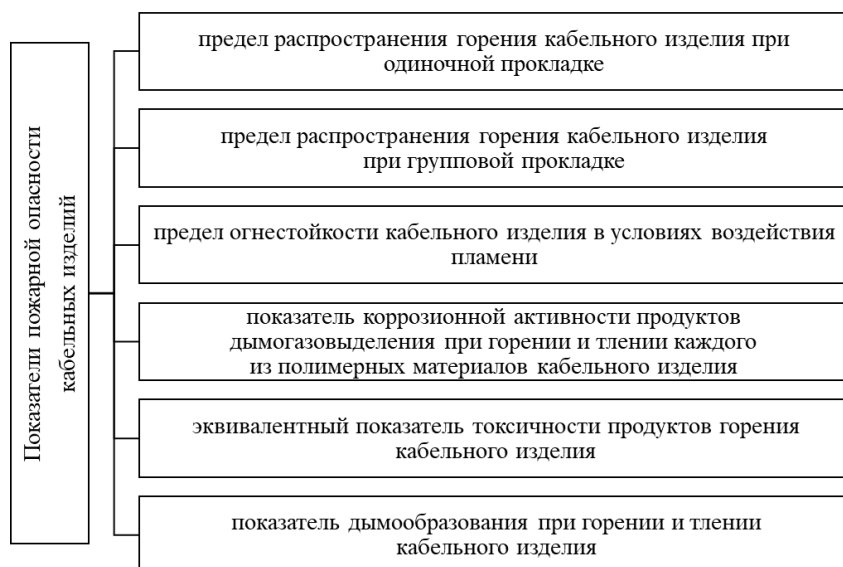


Рисунок 1.13 – Показатели пожарной опасности кабельных изделий

Соответствие кабельного изделия требованиям пожарной безопасности в соответствии с показателями существенно повышает пожарную безопасность эксплуатации кабельных изделий. Однако недостаточно изучен вопрос влияния эксплуатационного старения на соответствие критериям показателей пожарной опасности в условиях длительной эксплуатации. Кроме того, данный стандарт не распространяется на все виды кабельных изделий и не затрагивает существенный сегмент, который пользуется спросом при прокладке электропроводок собственниками в жилом секторе. Также указанный стандарт не учитывает возможность возникновения источника зажигания вследствие аварийных режимов работы [1].

Оценка влияния эксплуатационного старения на механические свойства материала изоляции и оболочки кабельных изделий проводится в соответствии с ГОСТ 25018-81 [20], который регламентирует методы определения прочности (разрушающего напряжения) при растяжении и относительного удлинения при разрыве изоляции и оболочки кабелей, проводов и шнуров с резиновой или пластмассовой (поливинилхлоридной и полиэтиленовой) изоляцией и оболочкой в исходном состоянии, после термического и других видов старения или воздействия масел, жидкого топлива и др.

Подготовка образцов к испытаниям предполагает удаление токопроводящей жилы и изготовлении двусторонних лопаток из изоляции кабельного изделия (при малом диаметре испытуемого изделия образцы изготавливаются в виде трубочек). По нашему мнению, существенным недостатком данного метода является то, что в процессе ускоренного термического состаривания при улетучивании пластификатора и образовании дефектов структуры изоляции токопроводящая жила может оказывать существенное влияние на образование микротрещин в структуре материала.

Таким образом, на сегодняшний день не существует релевантной нормативной правовой системы оценки влияния эксплуатационного старения на пожарную опасность кабельных изделий. Нормативные правовые акты и

документы, так или иначе касающиеся указанной области оценки кабельных изделий, не учитывают влияние эксплуатационного старения на горючесть и возможность возникновения источника зажигания, а также не учитывают особенности конструктивного исполнения кабельных изделий [83].

1.7. Подходы к прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации кабельных изделий

Для оценки влияния термического старения на качество и срок службы изоляции кабельных изделий используются различные методы, обзор которых приведен в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Методы оценки влияния термического старения на качество и срок службы изоляции кабельных изделий

№ п/п	Наименование группы методов	Краткое описание
1.	Лабораторные испытания на старение	образцы изоляции подвергаются воздействию повышенных температур в контролируемых условиях в течение заданного времени, затем проводятся измерения электрических, механических и других характеристик для оценки изменений
2.	Термогравиметрический анализ	метод позволяет определить изменение массы образца при нагревании, что может указывать на процессы деградации материалов
3.	Дифференциальная сканирующая калориметрия	метод помогает определить тепловые эффекты, происходящие в материале при нагревании, такие как экзо- или эндотермические реакции, которые могут быть связаны со старением
4.	Испытания на электрическую прочность	измерение напряжения пробоя изоляции до и после термического старения позволяет оценить изменение её диэлектрических свойств
5.	Механические испытания	определение изменений механических свойств, таких как прочность на разрыв, эластичность и твёрдость, после термического старения помогает оценить потенциальное ухудшение физических характеристик изоляции
6.	Визуальный осмотр и микроскопия	наблюдение за изменениями внешнего вида и структуры изоляции под микроскопом может выявить признаки деградации, такие как трещины, расслоения или изменение цвета

Окончание таблицы 1.6

7.	Спектроскопические методы	например, инфракрасная спектроскопия может быть использована для идентификации химических изменений в материале, которые могут указывать на старение
8.	Методы неразрушающего контроля	ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская дефектоскопия и другие методы могут быть использованы для выявления внутренних дефектов и изменений в структуре изоляции без её разрушения
9.	Статистический анализ данных	статистическая обработка данных об аварийных режимах работы кабельных изделий позволяет выявить закономерности и спрогнозировать срок службы изоляции
10.	Математическое и компьютерное моделирование	использование математических и компьютерных моделей для симуляции процессов старения и прогнозирования поведения материалов под воздействием температуры и других факторов

Большинство научно обоснованных методов, которые используются для оценки влияния термического старения на качество и срок службы изоляции кабельных изделий базируются на экспериментальных данных, полученных при температурах, значительно превышающих эксплуатационные. Каждый из этих методов основывается на каком-либо измеряемом физическом параметре, а также на выборе критерия отказа.

Согласно данным, изложенным в руководстве по определению характеристик термостойкости электроизоляционных материалов [26], параметром, по которому оценивают качество ПВХ пластикатов, является относительное удлинение при разрыве, а критерием отказа – достижение 50 % в процессе старения (от его изначальной величины). Согласно методике определения показателей долговечности кабелей и проводов с оболочкой и изоляцией на основе ПВХ [85], параметр остается неизменным, а критерий отказа – 50 % (абсолютных).

В основе обработки экспериментальных данных лежит допущение – применение уравнения Аррениуса, которое применяют для математического описания процессов теплового старения материалов изоляции кабельного изделия (пластикатов).

Оценку срока службы проводят посредством определения величины значения энергии активации процесса термического старения, которая

основывается на экспериментальных данных. В таком случае срок службы вычисляется по уравнению:

$$t_1 = \frac{t_2 \cdot E_{\text{акт}}}{R \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (1.1)$$

где t_1 – срок службы при температуре эксплуатации T_1 , суток;

t_2 – время до достижения состояния материала, соответствующее критерию отказа при температуре ускоренного состаривания T_2 , суток;

T_1 – температура эксплуатации, К;

T_2 – температура ускоренного состаривания, К;

$E_{\text{акт}}$ – энергия активации, Дж·моль⁻¹;

R – универсальная газовая постоянная, Дж·(моль·К)⁻¹.

Применение уравнения Аррениуса с целью прогнозирования ресурса изоляции кабельных изделий возможно только при отсутствии релаксационных и фазовых переходов у материалов, из которых изготовлена изоляция кабельных изделий, в исследуемом диапазоне температур (от температур эксплуатации до температур ускоренного состаривания).

Дополнительные сведения о механизмах старения изоляционных материалов дает сравнение искусственно состаренных образцов изоляции с образцами, подвергшимися естественным процессам повреждения. Однако проведение таких исследований затруднительно в силу длительности срока эксплуатации кабельных изделий.

Одним из решений указанной проблемы является моделирование процессов старения изоляции с помощью математических моделей [139, 140], которые основаны на различных механизмах старения, включая:

- термическое старение [141];
- частичные разряды [145];
- электрические и водные пробой [135,132];
- накопление объемного заряда в системах постоянного тока [151].

Также стоит отметить, что срок службы кабельной изоляции зависит от условий эксплуатации. Таким образом, остаточный срок службы изоляции можно оценивать, опираясь на данные о напряжении, токе и температуре поверхности кабеля [148].

Математические модели, описывающие механизм старения изоляции кабельных изделий, основаны на разных механизмах деструкции [137, 138]. Однако некоторые из них применимы исключительно к определенным электрическим установкам или оборудованию. Ниже рассмотрены самые известные универсальные математические модели старения изоляции кабельных изделий [35].

Модель Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{w - \chi E}{RT}\right), \quad (1.2)$$

где τ – срок службы изоляции, суток;

τ_0 – срок службы, когда экспонента стремится к единице, суток;

w – энергия активации структурного разрушения, Дж·моль⁻¹;

R – универсальная газовая постоянная, Дж·(моль·К)⁻¹;

χ – параметр структуры;

E – напряженности электрического поля, В·м⁻¹;

T – температура, К.

Модель Ж.-П. Крайна:

$$\tau \cong \frac{h}{2kT} \exp\left(\frac{\Delta G - 0,5 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \Delta V E^2}{kT}\right), \quad (1.3)$$

где τ – срок службы изоляции, суток;

$\varepsilon, \varepsilon_0$ – относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость материала;

h – постоянная, зависящая от материала изоляции;

k – постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹;

ΔV – объем активации с напряженностью электрического поля E , см³;

ΔG – изменение свободной энергии активации, Дж·моль⁻¹;

E – напряженности электрического поля, В·м⁻¹;

T – температура, К.

Модель, учитывающая обратную степенную модель и уравнение Аррениуса:

$$\tau = \tau_0 \exp(-VcT)(E \cdot E_0^{-1})^{-(n_0 - bcT)}, \quad (1.4)$$

где τ – срок службы изоляции, суток;

τ_0 – срок службы при $T=T_0$, $E=E_0$, суток;

$V=\Delta W \cdot k^{-1}$ – переменная, зависящая от ΔW , К·моль⁻¹;

ΔW – энергия активации термической деструкции, Дж·моль⁻¹;

k – постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹;

E – напряженность электрического поля, В·м⁻¹;

E_0 – напряженность электрического поля, меньше которого значением можно пренебречь, В·м⁻¹;

$cT=1/T_0-1/T$ – условное температурное напряжение, К;

T – температура ускоренного состаривания, К;

T_0 – комнатная температура, К;

n_0 – критерий устойчивости к напряжению;

b – параметр взаимодействия электрических и тепловых полей.

Модель Купчинского [47]:

$$\tau = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right), \quad (1.5)$$

где E – напряженность электрического поля, В·м⁻¹;

W_a – энергия активации, Дж·моль⁻¹;

k – постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹;

T – температура, К;

A – постоянная, зависящая от материала и свойств изоляции;

n – индекс степени, зависящий от типа изоляции.

При применении проанализированных математических моделей для идентичных образцов кабельных изделий все величины уравнений будут неизменными, за исключением температуры. В работе [52] доказано, что при

правильном выборе параметров все рассмотренные модели демонстрируют идентичные результаты.

В работе [85] измеряется потеря массы образца пластика при нагревании методом ТГА. После эмпирические данные математически обрабатываются с целью получения значений величины энергии активации.

Как в европейских, так и в российских стандартах [26, 85] измеряемым параметром, по которому оценивают влияние процессов старения на пластик, является относительное удлинение при разрыве.

Физическую достоверность применения относительного удлинения при разрыве для прогнозирования поведения ПВХ пластиков при тепловом старении, показывает подчинение реакции первого порядка с определенной энергией активации скорости изменения относительного удлинения при разрыве кабельного пластика при термическом старении [128].

Определение относительного удлинения при разрыве кабельного пластика применимо и при рассмотрении старения пластика вследствие испарения пластификатора. Например, может быть определена зависимость относительного удлинения при разрыве от содержания пластификатора в кабельном пластике.

В работе [85] описывается, что «старение оболочки (изоляции) на воздухе при температуре до 100 °С происходит вследствие десорбции пластификатора с поверхности материала». В работе [136] эмпирически доказано, что при термическом старении пластика помимо упомянутой десорбции пластификатора, происходят изменения в физико-химической структуре материала. Также в указанной работе скорость испарения пластификатора рассматривается как реакция первого порядка несмотря на то, что скорость испарения не является линейной функцией концентрации пластификатора. К недостаткам рассматриваемого подхода следует отнести также то, что природа пластификатора влияет на его эффективность. Одному и тому же значению показателя относительного удлинения будет соответствовать разное процентное содержание

пластификатора в массе, если учитывать, что пластификаторы имеют разную природу и, как следствие, свойства.

В работе [57] проведена оценка адекватности предлагаемого в работе [85] метода. Эмпирически показано, что устойчивость к термическому старению пластика И-40 13А выше, чем у пластика ОМ-40. Однако расчетные методы, предлагаемые в работе [85], показывают обратные результаты.

Метод, изложенный в руководстве по определению характеристик термостойкости электроизоляционных материалов [26], базируется на применимости уравнения Аррениуса для описания термического старения пластика изоляции кабельных изделий. В работе [131] доказана диффузия пластификатора из изоляции в оболочку и наоборот при термическом старении кабельного изделия. Кроме того, в работе [133] показано, что при горении кабельного изделия целиком и горении усредненного состава изоляции и оболочки (горючей нагрузки кабельного изделия) кривые выделения тепла отличаются. Существенным недостатком рассматриваемых подходов [26,85] является то, что они оценивают старение материала, из которого изготовлена изоляция, игнорируя воздействие прочих элементов кабельного изделия.

Существующие методы ускоренного термоэлектрического состаривания изоляции позволяют под воздействием электрического тока достичь повышенных значений температур изоляции и оболочки кабельного изделия. Недостатком данных методов является то, что повышается воздействие сразу двух негативных факторов (повышенная температура и воздействие частичных разрядов), что приводит к сложности трактования результатов и доказывания адекватности методики ускоренного состаривания.

Для диагностики состояния изоляции при производстве и в условиях эксплуатации разработан ряд диагностических методов. Методы контроля состояния изоляции кабельных линий разделяют на диагностические, вероятно-статистические и экспертные. Диагностические методы могут быть разрушающими и неразрушающими. К методам разрушающей диагностики

относятся: испытания повышенным напряжением выпрямленного тока, испытания повышенным напряжением промышленной частоты, испытания напряжением сверхнизкой частоты и испытания импульсным напряжением [13].

Методы неразрушающей диагностики делятся на испытания без отключения кабельной линии от сети (измерение частичных разрядов, контроль состояния изоляции по режимным параметрам, тепловизионный метод, измерение токов утечки) и испытания с отключением кабельной линии от сети (измерение сопротивления изоляции, оценка диэлектрических потерь, измерение коэффициента абсорбции, метод измерения и анализа возвратного напряжения, метод рефлектометрии, импульсный метод, высокочастотный метод, рентгеновский метод, видео-микроскопия).

Среди методов диагностики при эксплуатации кабельных линий к наиболее перспективным стоит отнести методы неразрушающей диагностики. При помощи данных методов возможно определять коэффициент абсорбции, указывающий на степень увлажненности изоляции, которая характеризует ее состояние. Методы, основанные на измерении частичных разрядов [5,21,33,124,129,130,142,143,147,159,146,153,156,160,162] позволяет диагностировать уровень и местонахождение частичных разрядов в кабельной линии. Одним из недостатков указанных методов диагностики является необходимость высокой квалификации у инженера, диагностирующего кабельную линию (понимание того, как влияют негативные эксплуатационные факторы на характеристики изоляции при различных сроках эксплуатации).

Рентгеновский метод позволяет оценить влияние различных эксплуатационных факторов на характеристики изоляции кабельных изделий [40]. Указанный метод нашел свое применение при разработке и производстве кабельной продукции. Недостатком такого метода является высокая стоимость оборудования.

Также известны методы оценки причин термомеханического старения, влияющего на появление микротрещин в изоляции кабельных изделий, основанные

на изучении температурно-частотных спектров диэлектрических потерь [41,42,114]. Повышенной точностью отличаются методы оценки диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь [30,64]. Также находят свое применение методы электроискрового контроля [86], высокочастотной и импульсной рефлектометрии [48,49,56,108].

Большая работа по оценке физико-химических процессов, влияющих на состояние и ресурс изоляции кабельных изделий проведена во ВНИИКП, где разработаны методы, основанные на видеоусиленной компьютерной микроскопии, микроспектрофотометрии, микрооптике, микрохимии [9,11,82,113,112,110]. Общим недостатком современных методов неразрушающей диагностики изоляции кабельных линий является необходимость применения высокоточной и дорогостоящей аппаратуры.

В рамках вероятностно-статистических методов оценки рассматривают данные об отказах кабельных линий за определенный период времени. Для анализа данных применяют математический аппарат, основанный на теории вероятностей [43,98,89]. Прогнозирующие модели оперируют комплексом показателей, включающим квалификацию и качество работы персонала, негативные воздействия окружающей среды и пр. [58,59,121,122]. К недостаткам данных методов можно отнести возможность получения некорректных результатов, вследствие отсутствия адекватной системы сбора статистических данных, необходимых для использования представительной выборки. Кроме того, вероятностно-статистические методы не могут учитывать присутствие на рынке некачественной и фальсифицированной продукции.

Проведенный обзор показал, что на сегодняшний день методика оценки влияния процессов термического старения на пожарную опасность изоляции кабельных изделий отсутствует, существуют лишь косвенные методы. Данный вывод согласуется с работой Смелкова Г.И. [10].

Полагаем, что наиболее релевантными методами оценки воздействия термического старения на пожарную опасность изоляции кабелей являются

способы, основанные на испытаниях образцов, подвергнутых ускоренному состариванию. Эти методы принимают во внимание реальные условия эксплуатации и позволяют получить точные данные о старении непосредственно изделий, а не только материалов.

1.8. Заключение и основные выводы по главе 1

Анализ статистических данных, опубликованных в открытых источниках, показал, что каждый седьмой пожар в России происходит по электротехническим причинам. Эти причины являются основными виновниками крупных пожаров, особенно в жилых зданиях. Кабельные изделия представляют собой основные объекты, на которых возникают пожары, вызванные электротехническими факторами. Наиболее распространённым аварийным режимом работы электропроводки, способным привести к пожару, является электрический пробой изоляции с последующим коротким замыканием. Основной причиной электрического пробоя является износ изоляции в процессе эксплуатации.

Наиболее популярные кабельные изделия, предназначенные для общепромышленного применения, обычно состоят из токопроводящих жил, изоляции и оболочки. Самым распространённым материалом для изоляции является ПВХ пластикат. Несмотря на все свои достоинства, ПВХ пластикат обладает некоторыми недостатками с точки зрения пожарной безопасности. К ним относятся горючесть материала и его подверженность эксплуатационному старению.

В кабельном изделии, находящимся под напряжением, сочетаются все факторы, необходимые для возникновения и распространения пожара: источники зажигания, возникающие при аварийных режимах работы; горючие материалы (оболочка и изоляция); а также наличие окислителя в виде кислорода воздуха в зоне реакции. Среди аварийных режимов работы наиболее пожароопасным является

неполное короткое замыкание, при котором известные аппараты защиты не способны полностью исключить возможность возникновения пожара.

В процессе эксплуатации происходит старение изоляции кабельных изделий под воздействием различных деструктивных факторов. Основными негативными факторами, влияющими на изоляцию кабельных изделий при прокладке электропроводок внутри отапливаемых помещений, являются термическое воздействие и воздействие электрического тока. В результате процессов, происходящих при старении изоляции, может повышаться пожарная опасность кабельных изделий, что может проявляться в повышении горючести изоляции и вероятности её пробоя.

На сегодняшний день не существует эффективной нормативной правовой системы, позволяющей оценить влияние эксплуатационного старения на пожарную опасность кабельных изделий. Нормативные правовые акты и документы, касающиеся этой области, не учитывают влияние старения на горючесть и возможность возникновения источника зажигания, а также не учитывают особенности конструктивного исполнения кабельных изделий.

Проведённый обзор научной литературы, представленной в открытой печати, показал, что на данный момент отсутствует научно обоснованная методика оценки влияния процессов термического старения на пожарную опасность изоляции кабельных изделий. Существуют лишь косвенные методы.

Полагаем, что наиболее релевантными способами оценки воздействия термического старения на пожарную опасность изоляции кабельных изделий являются способы, основанные на испытаниях образцов, подвергнутых ускоренному состариванию. Эти способы учитывают реальные условия эксплуатации и позволяют получить адекватные данные о старении непосредственно изделий, а не только материалов.

Таким образом, для разработки способа оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ,

учитывающего старение полимера в условиях длительной эксплуатации необходимо:

- оценить влияние термического старения в условиях длительной эксплуатации на химический состав и структуру ПВХ изоляции кабельных изделий;
- провести оценку влияния изменения химического состава и структуры при термическом старении в условиях длительной эксплуатации на общую горючесть и диэлектрические свойства кабельных изделий с ПВХ изоляцией;
- выработать научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации с учетом термического старения изоляционных материалов;
- определить релевантные условия ускоренного термического состаривания кабельных изделий при оценивании изменения их пожарной опасности в процессе эксплуатации;
- разработать и изготовить экспериментальную установку для ускоренного термического состаривания кабельных изделий;
- предложить методики оценки общей горючести и электроизоляционных свойств ПВХ пластиката, учитывающие термическое старение кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика выборки образцов кабельных изделий

Для проведения исследования было отобрано 5 видов образцов кабельных изделий, основные сведения по которым приведены в таблице 2.1. Все представленные образцы имеют изоляцию из ПВХ и рассчитаны на напряжение до 0,38 кВ. Они обладают широким спектром применения при монтаже электропроводок, доступны в свободной розничной продаже на территории Российской Федерации и широко распространены в жилом секторе.

Далее в работе указываются только номера образцов. Подготовка образцов к экспериментам описывается в соответствующих разделах и подразделах настоящей диссертационной работы.

Таблица 2.1 – Характеристика образцов исследования

№ образца	Маркировка	Материал токопроводящей жилы	Кабель/ провод/ шнур	Материал изоляции	Материал оболочки	Количество жил	Сечение жил, мм
1	АППВ 2х2,5	алюминий	провод	ПВХ	-	2	2,5
2	ПБВВГ 2х1,5	медь	провод	ПВХ	ПВХ	2	1,5
3	ПВС 2х1,5	медь	провод	ПВХ	ПВХ	2	1,5
4	ШВВП 2х0,5	медь	шнур	ПВХ	ПВХ	2	0,5
5	ВВГ-Пнг(А)-LS 2х1,5	медь	кабель	ПВХ пониженной горючести	ПВХ пониженной горючести	2	1,5

2.2. Ускоренное термическое состаривание

Для проведения гравиметрического анализа ускоренное термическое состаривание образцов проводили в сушильном шкафу Тула-Терм СНВС-4,5.4,5.4/3-И1, технические характеристики которого приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики сушильного шкафа СНВС-4,5.4,5.4/3-И1

Напряжение питания, В	220
Частота переменного тока, Гц	50
Мощность нагревательной камеры, кВт	2,5
Номинальная рабочая температура, °С	300
Диапазон автоматического регулирования температуры, °С	40-300
Точность автоматического регулирования температуры, °С	±3
Остаточное давление в рабочей камере, Па (мм.рт.ст)	$1,3 \cdot 10^3$ (10)
Время разогрева до номинальной рабочей температуры, мин.	120
Размеры рабочей камеры (ШхГхВ), мм	450х450х400
Габариты вакуумного шкафа (ШхГхВ), мм	700х830х740
Масса, кг	75

Перед проведением ускоренного термического состаривания подготовленные образцы помещали в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды. Далее образцы подвешивались вертикально в сушильном шкафу на расстоянии не менее 20 мм друг от друга и занимали не более 50 % объема. Для обеспечения размещения образцов в сушильном шкафу была разработана система крепления, общий вид которой представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Система крепления образцов в сушильном шкафу Тула-Терм СНВС-4,5.4,5.4/3-И1

В лабораторной установке поддерживалась постоянная температура: 80 ± 3 , 110 ± 3 , 150 ± 3 , 180 ± 3 , 200 ± 3 , 220 ± 3 °C в течение 168 часов. После выдерживания в сушильном шкафу образцы помещались в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды.

Для подготовки состаренных образцов к другим методам исследования они выдерживались при температуре 150 ± 3 °C в течение 664 часов в разработанной экспериментальной установке для ускоренного термического состаривания кабельных изделий. Релевантные значения температуры и времени ускоренного состаривания основаны на математических расчетах. Методика, экспериментальная установка, выбор релевантных условий ускоренного термического состаривания описаны в 3 главе настоящей диссертационной работы.

2.3. Гравиметрический анализ

Для количественной оценки изменения состава поливинилхлоридной изоляции при термическом старении был проведен гравиметрический анализ. Данный метод основан на законе сохранения массы веществ при химических превращениях [45].

Общая выборка составила 150 образцов изоляции длиной 100 мм (по 30 образцов на каждый вид). Измерение массы образцов проводили до и после ускоренного термического состаривания на электронных лабораторных весах ВК-600.1, технические характеристики которых приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики электронных лабораторных весов ВК-600.1

Габаритные размеры платформы, мм	120
Вид весовой платформы	круглая
Наибольший предел взвешивания, г	600
Цена деления, г	0,02
Наличие ветрозащитного экрана	да
Выборка массы тары	во всем диапазоне взвешивания
Диапазон рабочих температур, °С	от +15 до +30
Масса, кг	2,1

Для удобства сопоставления данных по разным видам образцов была рассчитана относительная потеря массы по формуле 2.1 и относительная скорость потери массы по формуле 2.2.

$$\Delta m_{\text{отн}} = \frac{100 \cdot m_{\text{к}}}{m_{\text{н}}}, \quad (2.1)$$

где $\Delta m_{\text{отн}}$ – относительная потеря массы, %;

$m_{\text{н}}$ – масса образца до помещения в сушильный шкаф, г;

$m_{\text{к}}$ – масса образца после извлечения из сушильного шкафа, г.

$$V_{\text{отн}} = \frac{\Delta m_{\text{отн}}}{t}, \quad (2.2)$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость потери массы, %·ч⁻¹;

$\Delta m_{\text{отн}}$ – относительная потеря массы, %;

t – время выдерживания образцов в сушильном шкафу, ч.

Относительную потерю массы при температуре определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях образцов одной группы. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

2.4. Термический анализ

Для определения релевантной температуры ускоренного термического состаривания образцов были проведены исследования материалов изоляции методом термогравиметрического анализа. Данный метод позволяет определить температуру, при которой начинаются интенсивные процессы изменения химического состава в результате термической деструкции.

ГОСТ Р 53293-2009 [27] устанавливает порядок и методы проведения термического анализа. Согласно указанному нормативному документу термический анализ включает в себя следующие методы: термогравиметрический, термогравиметрический по производной, дифференциальной-термический анализ или дифференциально-сканирующую калориметрию. Принципиальная схема установки для проведения термогравиметрического анализа приведена на рисунке 2.2 [109].

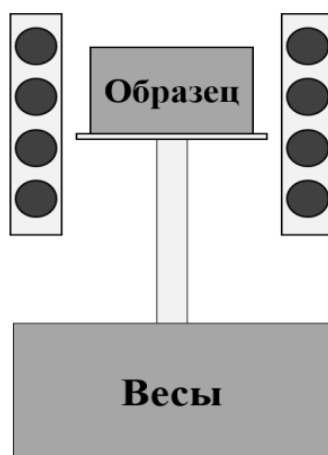


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема установки для проведения термогравиметрического анализа

Исследование термических характеристик изоляции образцов проводилось методом синхронного термического анализа в азотно-кислородной атмосфере (содержание кислорода в системе – 21 %) в интервале температур от 70 до 750 °С на термическом анализаторе SETSYS Evolution 16, общие технические характеристики которого приведены в таблице 2.4. Перед проведением исследований изоляция образцов измельчалась до однородного состояния (в порошок), после чего выдерживалась в эксикаторе 20 часов при температуре окружающей среды. Масса навески составляла 8 мг, скорость нагрева: 5 °С·мин⁻¹. Достоверность данных подтверждалась тремя параллельными измерениями для каждого образца.

Таблица 2.4 – Технические характеристики термического анализатора SETSYS Evolution 16

Наименование технической характеристики	DTA	DSC	TGA		TMA
			Весы 35 г	Весы 100 г	
Температурный диапазон модуля, °С	от +20 до +1600	от +20 до +1500	от +20 до +1600		от +20 до +1600
Объем тигля, мкл	30/100	80/100	50/1500		-
Разрешение	-	0,4 мкВт	0,03 мкг	0,3 мкг	0,2 нм
Шум RMS	-	16 мкВт	0,03 мкг	0,03 мкг	5 нм
Удельный шум RMS	-	0,16 мкВт·мкл ⁻¹	0,02 мкг·мл ⁻¹	0,2 мкг·мл ⁻¹	0,25·10 ⁻⁶
Диапазон измерений	-	-	±200 мг	±2 г	±2 мм

Термические характеристики материалов изоляции образцов определяли путем анализа данных выборки при n=3 измерениях. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

2.5. Инфракрасная спектроскопия

Инфракрасная спектроскопия – это аналитический метод, используемый для идентификации и изучения молекул на основе их взаимодействия с инфракрасным

излучением. Этот метод основан на том, что молекулы поглощают инфракрасные фотонные энергии, что вызывает колебания их атомов. Инфракрасная спектроскопия позволяет оценить изменения в физико-химической структуре и составе ПВХ изоляции, происходящие в результате термического старения.

Исследование проводилось на универсальном лабораторном инфракрасном Фурье-спектрометре ФСМ 2201 (технические характеристики приведены в таблице 2.5), который предназначен для проведения научных исследований и аналитических измерений в средней инфракрасной области спектра.

Таблица 2.5 – Технические характеристики универсального лабораторного инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 2201

Спектральный диапазон, см^{-1}	370-7800
Спектральное разрешение, см^{-1}	1,0
Отношение сигнал/шум (время измерения 1 мин в интервале 2100-2200 см^{-1} и разрешении 4 см^{-1})	> 60000
Минимальное время получения одного полного спектра менее, с	1
Светоделитель	KBr с покрытием на основе Ge
Источник излучения	высокотемпературный металлокерамический
Детектор	пироприемник DLATGS
Размеры кюветного отделения, мм	150x190x170
Габаритные размеры, мм	520x370x250
Масса, кг	28

При подготовке образцов к исследованию были получены таблетки в KBr: 2 мг порошка, изготовленного из изоляции образцов, смешивали со 150 мг спектрально чистого бромида и прессовали полученную смесь, которую предварительно выдерживали в эксикаторе 20 часов при температуре окружающей среды.

Согласно закону Бугера-Ламберта-Бера доля поглощённого излучения прямо пропорциональна числу частиц поглощающего вещества в слое, через который проходит поток света. Для количественной и качественной оценки процессов, протекающих при термической деструкции изоляции образцов, рассчитывали соотношения оптических плотностей характеристических полос спектра

(спектральный критерий), который объективно отражает изменение соотношения в угле исходных алифатических и вновь появляющихся ароматических (карбонизованных) структур. Спектральный критерий рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{D_x}{D_n}, \quad (2.3)$$

где K – спектральный критерий;

D_x – оптическая плотность, соответствующая волновому числу пика колебания, интенсивность которого указывает на наличие характерной связи;

D_n – оптическая плотность, соответствующая волновому числу начальной точки колебания, пик интенсивности которого указывает на наличие характерной связи.

Спектральные характеристики определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

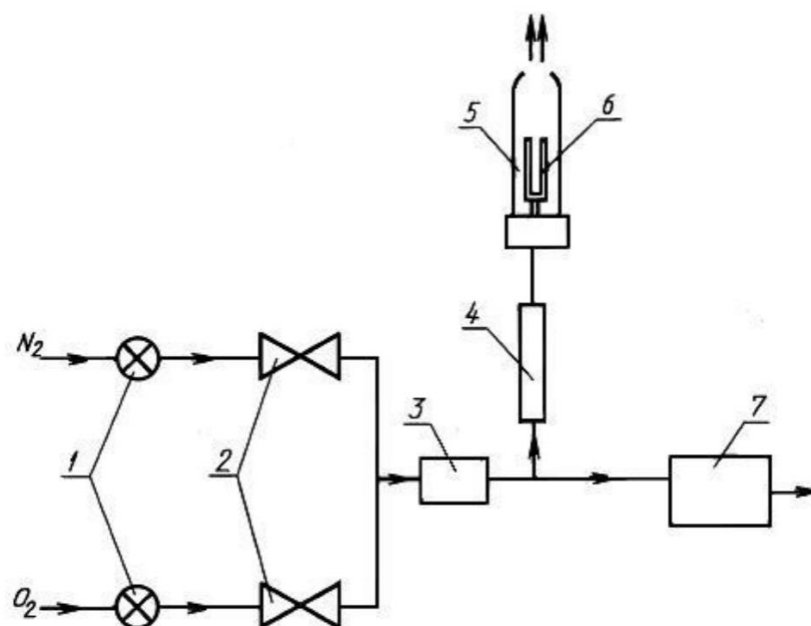
2.6. Определение предельного кислородного индекса

Для оценки общей горючести образцов был использован метод определения предельного кислородного индекса. Согласно ГОСТ 12.1.044-89 [16], который регламентирует определение предельного кислородного индекса, значение кислородного индекса следует применять, в том числе при контроле горючести полимерных материалов.

Сущность данного метода заключается в нахождении минимальной концентрации кислорода в потоке кислородно-азотной смеси, при которой наблюдается самостоятельное горение вертикально расположенного образца, зажигаемого сверху, что позволяет проводить сравнительную оценку общей меры горючести полимерных материалов и огнезащитных композиций.

Результатом измерения является минимальное процентное количество кислорода в кислородно-азотной среде, при которой возможно самостоятельное

горение образца (предельный кислородный индекс). Схема лабораторной установки для определения кислородного индекса представлена на рисунке 2.3 [16]. Технические характеристики лабораторной установки Oxygen Module Index Concept Equipment, на которой проводили испытания образцов, приведены в таблице 2.6.



- 1 – вентиль предварительной регулировки; 2 – вентиль точной регулировки;
 3 – смеситель; 4 – расходомер; 5 – реакционная камера; 6 – держатель образца;
 7 – кислородный анализатор

Рисунок 2.3 – Схема лабораторной установки для определения кислородного индекса

Таблица 2.6 – Технические характеристики лабораторной установки для определения предельного кислородного индекса Oxygen Module Index Concept Equipment

Допустимая температура окружающей среды, °С	от 10 до 35
Погрешность определения кислородного индекса, %	±0,1
Диапазон измерения кислородного анализатора, % O ₂	от 0 до 100
Повторяемость, % O ₂	±0,1
Линейность, % O ₂	±0,1
Габаритные размеры реакционной камеры, мм	75x450
Масса, кг	14

Реакционная камера представляла собой термостойкую прозрачную трубу внутренним диаметром 75 мм и высотой 450 мм, установленную вертикально на основании.

На дне камеры было предусмотрено приспособление для равномерного распределения газовой смеси, состоящее из металлических шариков диаметром 3-5 мм, помещенных слоем высотой 80-100 мм. Над шариками располагалось металлическое сито с целью улавливания падающих частиц горящего образца.

В нижней части реакционной камеры был предусмотрен держатель образца для закрепления его в вертикальном положении, который не имел острых кромок для лучшего обтекания газовым потоком.

Чистота азота и кислорода, расположенных в баллонах, составляла 98 %. Система смешивания и регулировки газов перед поступлением в реакционную камеру позволяла изменять концентрацию кислорода с шагом 0,1 % об. Средства измерения и контроля концентрации кислорода в газовой смеси обладали погрешностью 0,1 % об.

Источником зажигания служила горелка с диаметром наконечника 2 мм и обеспечивала высоту пламени 16 ± 4 мм, а также свободно входила в камеру через верхний открытый конец. Для удаления сажи и дыма установка была размещена в лабораторном вытяжном шкафу, что обеспечивало выведение сажи и дыма без изменения потоков газа в камере или ее температуры. Фото проведения эксперимента представлено на рисунках 2.4 и 2.5.

Согласно табл. 11 ГОСТ 12.1.044-89 [16] образцы относятся к четвертому типу. Исходя из чего длина образцов составляла 100 мм. Края образцов были гладкими. На образцы были нанесены метки (поперечные линии) на две смежные стороны на расстоянии 50 мм от конца образца, вступающего в контакт с источником зажигания. Все образцы перед проведением испытания выдерживались 96 часов в стандартной атмосфере по ГОСТ 12423-2013 [17].

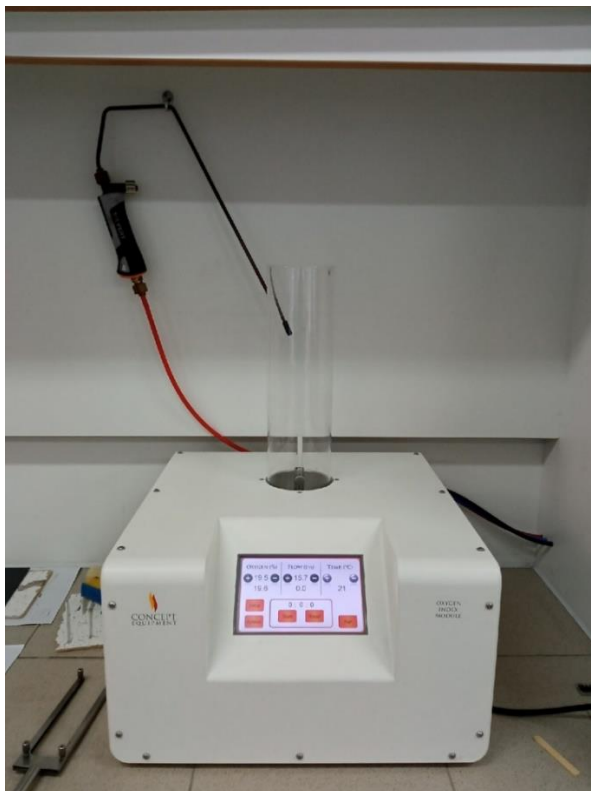


Рисунок 2.4 – Подготовка к проведению эксперимента по определению кислородного индекса

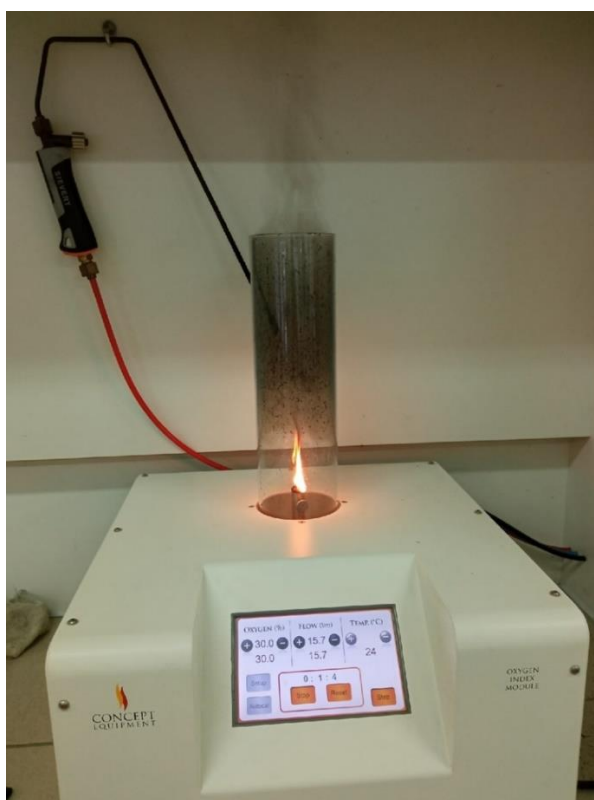


Рисунок 2.5 – Проведение эксперимента по определению кислородного индекса

Испытания проводили при температуре 23 ± 2 °С. Перед испытанием аппаратуру калибровали. Для определения условий первого эксперимента один из образцов поджигали в атмосфере воздуха и делали вывод о начальной концентрации кислорода исходя из того, поддерживали образцы самостоятельное горение или нет.

Образцы закрепляли в вертикальном положении в держателе в центре колонки так, чтобы верхний край образца находился на расстоянии не менее 100 мм от верхнего края колонки. Приборы для измерения давления и расхода газов регулировали так, чтобы газовый поток в колонке при температуре 23 ± 2 °С с заданной концентрацией кислорода имел скорость 40 ± 10 мм·с⁻¹. Перед испытанием систему продували газовой смесью 30 с и поддерживали концентрацию кислорода постоянной до конца испытания.

Зажигание образцов проводили по варианту А. Нижнюю часть пламени горелки подводили к верхней горизонтальной поверхности образца, медленно перемещая так, чтобы пламя покрывало ее полностью и не касалось вертикальных поверхностей или граней образца. Длительность воздействия пламени на образец составляло 30 с с короткими перерывами через каждые 5 с. Образец считали воспламененным, если после отвода горелки через 5 с вся его верхняя часть горит.

После воспламенения образца включали секундомер и наблюдали за распространением горения. Если горение прекращалось и не возобновлялось в течение 1 с, то, выключив секундомер, определяли время горения и измеряли максимальную длину сгоревшей части образца. Если хотя бы один из указанных показателей горения образца превосходил приведенные в табл.12 ГОСТ 12.1.044-89 [16] критерии (время горения после зажигания – 180 с; длина сгоревшей части образца – 50 мм от верхнего торца образца), то результат испытания записывали как Х. В противном случае результат испытания записывали как 0.

По ходу проведения испытаний также фиксировали процессы, сопровождающие горение (падение частиц, обугливание, неравномерное горение, тление). Если образец горел и выполнял установленные выше критерии, то его

гасили и вынимали из реакционной камеры. После чего сито очищали от упавших сгоревших частиц образца и охлаждали до 23 ± 2 °С.

При испытании последующего образца выбирали концентрацию кислорода таким образом, что: уменьшали концентрацию кислорода, если для предыдущего образца записан Х, или увеличивали концентрацию кислорода, если записан 0.

Для определения предварительной концентрации кислорода проводили испытания до получения пары концентраций, отличающихся друг от друга не более чем на 1 %, при одной из которых получен результат Х. Из этой пары выбирали концентрацию, для которой получен результат 0. После испытывали один образец, при определенной выше величине концентрации кислорода.

Затем, выбирая изменения концентраций кислорода, равные 0,2 % об., испытывали ряд образцов, до получения первого результата, противоположного полученному.

После испытывали еще четыре образца, поддерживаясь при этом изменения концентраций кислорода в 0,2 % об. Записывали концентрацию кислорода для последнего образца и вычисляли величину кислородного индекса по формуле 2.4, приведенной в ГОСТ 12.1.044-89 [16].

$$КИ = C_k + K \cdot d, \quad (2.4)$$

где C_k – конечное значение концентрации кислорода, определенное согласно п. 4.14.3.18 ГОСТ 12.1.044-89 [16], округленное до десятичного знака, % об.;

d – разница между значениями концентрации кислорода, определенная согласно п. 4.14.3.16-4.14.3.17 ГОСТ 12.1.044-89 [16], % об.;

K – коэффициент, определяемый из табл. 13 согласно п. 4.14.4.2 ГОСТ 12.1.044-89 [16].

За результат испытаний принимали значение кислородного индекса, определенного по формуле 2.4, если стандартное отклонение удовлетворяет соотношению:

$$\frac{2}{3} \cdot \sigma < d < \frac{3}{2} \cdot \sigma, \quad (2.5)$$

где σ – оценка стандартного отклонения концентрации кислорода, вычисляемая для последних шести испытаний по формуле:

$$\partial = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(V_i - \text{КИ})^2}{n-1} \right]^{0,5}, \quad (2.6)$$

где V_i – последовательные значения концентраций кислорода, полученные в последних шести испытаниях;

$n = 6$;

КИ – значение кислородного индекса, определенного по формуле 2.4.

Если условие неравенства 2.5 не выполнялось и $d < \frac{3}{2} \cdot \partial$, то повторяли испытания с увеличением d до тех пор, пока условие неравенства не выполнится. Если $\frac{2}{3} \cdot \partial < d$, то повторяли испытание с уменьшенным значением d до тех пор, пока не выполнится условие 2.5 (при этом d не должно быть менее 0,2 % об.).

Параллельно были проведены испытания образцов для определения предельного кислородного индекса при поджоге образца снизу. Такая методика учитывает физические, физико-химические, теплофизические процессы, происходящие в условиях пожара. Для проведения испытаний была разработана система крепления образцов в лабораторной установке. Доработанная лабораторная установка для определения предельного кислородного индекса и методика испытаний приведена в 3 главе настоящей диссертации.

2.7. Измерение электрического сопротивления

Электрическое сопротивление изоляции измеряли при помощи мегаомметра Е6-24/1, технические характеристики которого приведены в таблице 2.7. Прибор способен подавать постоянное высокое напряжение (100 В, 250 В, 500 В и 1000 В) на изолированные провода и измерять ток утечки. Чем выше ток утечки, тем ниже сопротивление изоляции, а соответственно и ее диэлектрические характеристики.

Таблица 2.7 – Технические характеристики мегаомметра Е6-24/1

1. Измерение сопротивления		
Диапазоны измерения сопротивления	Пределы допускаемой основной погрешности, не более, %	
от 0,01 до 9,99 МОм	± 3	
от 10,0 до 99,9 МОм		
от 100 до 999 МОм		
Время установления показаний при емкости объекта не более 0,5 мкФ и сопротивлении не более 100 МОм, не более, с	30	
2. Испытательные напряжения		
Значения испытательного напряжения на разомкнутых гнездах, В	100, 250, 500 и 1000	
Относительная погрешность установки испытательного напряжения, не более, %	от 0 до + 15	
Ток в измерительной цепи при коротком замыкании, не более, мА	2	
3. Измерение напряжения		
Диапазон измерения действующего значения напряжения переменного тока частотой 50 Гц, В	от 40 до 400	
Пределы допускаемой основной погрешности при измерении напряжения, не более, %	± 5	

Сопротивление определяется по формуле, основанной на законе Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2.7)$$

где R – сопротивление изоляции кабельного изделия, Ом;

U – напряжение, приложенное к изоляции, В;

I – ток утечки, А.

Методика определения электрического сопротивления образцов основывалась на ГОСТ 3345-76 [23]. Для измерения было подготовлено по 5 исходных и состаренных заготовок длиной 500 мм, исключая длину концевых разделок, для каждого вида образцов. Измерение электрического сопротивления изоляции проводили при напряжении от 100 В до 1000 В.

Перед измерением концы проводов были очищены от изоляции, после чего образцы помещали в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды. Электрическое сопротивление измерялось между двумя токопроводящими жилами. При повторных измерениях образцы провода разряжались в течение 2 минут путем соединения токопроводящей жилы с заземляющим устройством. Отсчеты значений электрического сопротивления изоляции при измерении

проводили по истечении 1 мин с момента приложения измерительного напряжения к образцу.

Измерение проводили при температуре окружающей среды 20 ± 2 °С. Если измерение проводилось при температуре, отличающейся от 20 °С, то измеренное значение электрического сопротивления изоляции пересчитывали на температуру 20 °С по формуле 2.8.

$$R_{20} = K \cdot R_t, \quad (2.8)$$

где R_{20} – электрическое сопротивление изоляции при температуре 20 °С, МОм;

R_t – электрическое сопротивление изоляции при температуре измерения, МОм.

K – коэффициент для приведения электрического сопротивления изоляции к температуре 20 °С, значения которого приведены в ГОСТ 3345-76 [23].

Сопротивление изоляции определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях образцов одной группы. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений сопротивления изоляции при доверительной вероятности 0,95.

2.8. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

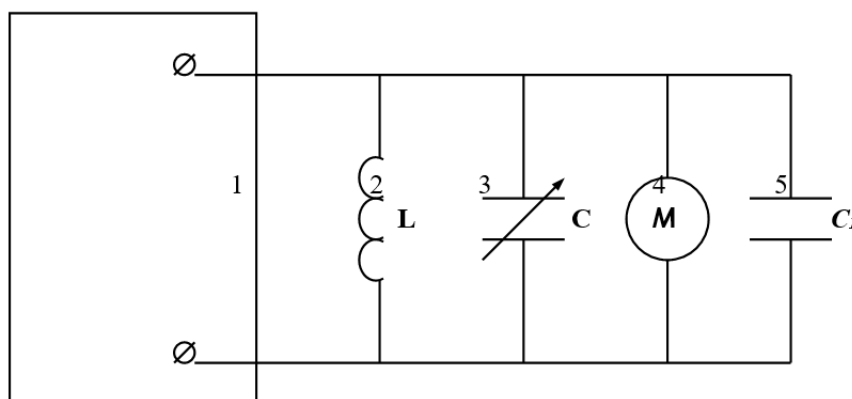
Одним из важных параметров, характеризующих диэлектрические свойства полимеров, является тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Этот параметр описывает соотношение между активной и реактивной составляющими диэлектрической проницаемости материала и служит индикатором потерь энергии при воздействии переменного электрического поля.

Тангенс угла диэлектрических потерь определяли при помощи измерителя добротности Е9-4, технические характеристики которого приведены в таблице 2.8. В основу работы измерителя добротности положен контурный резонансный метод.

Таблица 2.8 – Технические характеристики измерителя добротности Е9-4

Тип индикации	стрелочный
Выбор пределов измерений прибора	ручной
Диапазон частот	от 50 кГц до 35 МГц
Перекрытие по частоте поддиапазонов генератора, не менее %	2
Погрешность градуировки генератора по частоте в оцифрованных точках не более, %	± 1
Габаритные размеры, мм	550x330x236

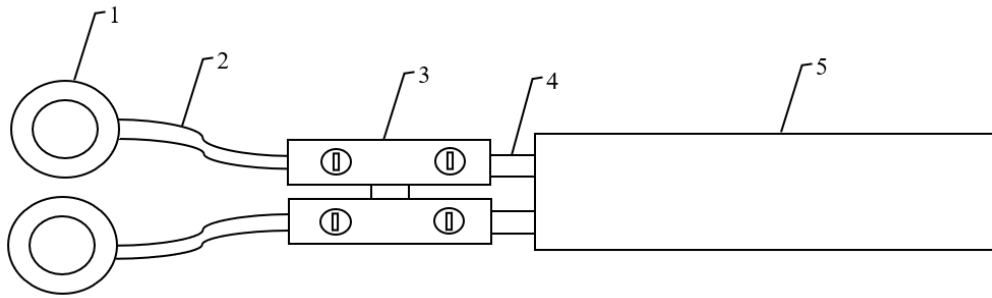
Схема определения тангенса угла диэлектрических потерь контурным резонансным методом представлена на рисунке 2.6 [62].



1 – генератор высокой частоты; 2 – катушка индуктивности; 3 – конденсатор переменной емкости; 4 – вольтметр; 5 – измерительная ячейка

Рисунок 2.6 – Схема определения тангенса угла диэлектрических потерь контурным резонансным методом

Для возможности проведения измерений тангенса угла диэлектрических потерь изоляции образцов в рамках диссертационной работы была разработана и изготовлена измерительная ячейка, представленная на рисунке 2.7. Конструктивное исполнение измерительной ячейки позволяет исследовать различные кабельные изделия с фиксированным расположением токоведущих жил относительно друг друга.



- 1 – кольцевые клеммы; 2 – тоководы; 3 – клеммная колодка;
 4 – концевые разделки (токопроводящие жилы исследуемого образца);
 5 – изоляция исследуемого образца

Рисунок 2.7 – Измерительная ячейка

Источником питания служил генератор высокой частоты с фиксированной частотой, соединенный с колебательным контуром, который содержал катушку индуктивности, конденсатор переменной емкости и измерительную ячейку с исследуемым материалом.

Напряжение на колебательном контуре при изменении проводимости (или емкости) проходило через максимум за счет работы генератора в режиме постоянного тока. Состоянию резонанса соответствовало наибольшему значению напряжения, которому соответствовали также определенные значения емкости и добротности. Данные показатели использовались для расчета величины $\text{tg} \delta$ по формуле:

$$\text{tg } \delta = \frac{C_1(Q_1 - Q_2)}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)}, \quad (2.9)$$

где C_1 – емкость на данной частоте при отключенной измерительной ячейке, пФ;

Q_1 – добротность на данной частоте при отключенной измерительной ячейке;

C_2 – емкость контура, в который, кроме исходной емкости прибора, входила емкость, образованная измерительной ячейкой, пФ;

Q_2 – добротность контура, в который, кроме исходной емкости прибора, входила емкость, образованная измерительной ячейкой.

Добротность изоляции рассчитывалась по формуле:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}, \quad (2.10)$$

где Q – добротность;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

К токоведущим жилам исследуемых образцов кабельных изделий подключались электроды измерителя добротности. Параллельность токоведущих жил обеспечивалась конструктивным исполнением кабельных изделий. Длина образцов составляла 50 мм.

Диапазон изменения частот, при исследовании диэлектрических свойств образцов, лежал в пределах $5 \cdot 10^3$ - $35 \cdot 10^6$ Гц. Перед проведением эксперимента образцы помещали в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды. Все зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты были получены при температуре 21 ± 3 °С. Выбранный диапазон частот соответствовал частотам, разрешенным к использованию в промышленности.

Тангенс угла диэлектрических потерь и добротность изоляции определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях образцов одной группы. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

2.9. Измерение межпроводной ёмкости

Оценить изменение диэлектрических свойств изоляции кабельных изделий можно посредством измерения межпроводной емкости. В определенном приближении две токоведущие жилы кабельного изделия образуют электрическую ёмкость, величина которой может быть рассчитана по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.11)$$

где C – межпроводная емкость, Ф;

ε – диэлектрическая проницаемость вещества;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

S – площадь обкладки, м^2 ;

d – расстояние между токопроводящими жилами, м.

Таким образом, изменение межпроводной емкости в рассматриваемой системе будет определяться только изменением диэлектрической проницаемости изоляции, величина которой является суперпозицией величин диэлектрической проницаемости всех соединений, входящих в её состав.

Измерение межпроводной ёмкости проводилось при помощи цифрового мультиметра Mastech MY65, технические характеристики которого приведены в таблице 2.9. Перед проведением эксперимента образцы помещали в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды.

Таблица 2.9 – Технические характеристики цифрового мультиметра Mastech MY65

Тип отображения	цифровой
Диапазон измерений постоянного напряжения, В	от 0,2 до 1000
Диапазон измерений постоянного тока, А	от 0,002 до 10
Диапазон измерений сопротивления, МОм	от 0,0002 до 200
Диапазон измерений переменного напряжения, В	от 2 до 750
Диапазон измерений переменного тока, А	от 0,002 до 10
Диапазон измерений емкости, мкФ	от 0,02 до 100
Погрешность при измерении емкости, %	± 4
Рабочая температура, °С	от 0 до +40
Габариты, мм	188x93x50

Межпроводную емкость определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях образцов одной группы. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

2.10. Испытание токовой перегрузкой

Для испытания токовой перегрузкой был разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд, схема которого приведена в 3 главе настоящей диссертации.

Принцип работы стенда в рамках методики определения вероятности короткого замыкания заключается в возможности создания стандартного режима

работы электропроводки (при длительно допустимом электрическом токе), в которую входит исследуемый образец кабельного изделия, а также 2-х и 4-х кратной токовой перегрузки на ней. Токовая перегрузка создавалась путем подсоединения потребителей.

Сила проходящего электрического тока определялась по значениям амперметра. Для прекращения работы электросети в случае наступления короткого замыкания был предусмотрен автоматический выключатель. Перед проведением эксперимента образцы помещали в эксикатор на 20 часов при температуре окружающей среды. Температура окружающей среды составляла 20 ± 2 °С, напряжение переменного тока – 220 В, атмосфера – нормальная.

К клеммным колодкам подключали образцы длиной 500 мм и пропускали электрический ток в течение 10 мин с заданными параметрами. Значения силы электрического тока для проведения испытаний образцов приведены в таблице 2.10 [81,87]. Если автоматический выключатель не срабатывал в течение 10 мин с момента подачи электрического тока на испытуемый образец, то результат фиксировался как отрицательный. При срабатывании автоматического выключателя секундомером фиксировалось время от момента подачи тока на образец до короткого замыкания. Наступление короткого замыкания определялось по срабатыванию автоматического выключателя и визуальным осмотром образцов.

Таблица 2.10 – Сила электрического тока для проведения испытаний образцов

№ образца	Сила электрического тока, А		
	Длительно допустимый	2-х кратная перегрузка	4-х кратная перегрузка
1	24	48	96
2	23	46	92
3	23	46	92
4	11	22	44
5	23	46	92

Вероятность короткого замыкания рассчитывалась по формуле:

$$P(KЗ) = \frac{m}{n} \cdot 100\%, \quad (2.12)$$

где m – количество элементарных исходов, благоприятствующих событию (краткому замыканию);

n – общее число всех равновозможных, элементарных исходов этого испытания.

Вероятность короткого замыкания и время его наступления определяли путем анализа данных выборки при $n=5$ измерениях образцов одной группы. Статистическая обработка данных осуществлялась стандартным методом путем расчета средних выборочных значений при доверительной вероятности 0,95.

2.11. Выводы по главе 2

В качестве образцов для проведения исследования были отобрано 5 видов кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ, которые доступны в свободной розничной продаже и используются при монтаже электропроводок.

Для оценки деструктивных процессов, происходящих при термическом старении ПВХ изоляции кабельных изделий, была разработана методика ускоренного термического состаривания, релевантные условия которого были определены математическими расчётами и основывались на теоретических и экспериментальных данных. Методом гравиметрического анализа определялись относительные значения потери массы и скорости потери массы.

Температура ускоренного термического состаривания образцов должна быть ниже температуры интенсивных химических превращений. Методом термогравиметрического анализа определялась температура, при которой начинаются интенсивные процессы изменения химического состава в результате термической деструкции. Также по данным термогравиметрического анализа можно выдвинуть гипотезу о характере процессов термической деструкции при термическом воздействии разной интенсивности. Изменения химического состава и структуры изоляции образцов, происходящие при термической деструкции, определялись методом инфракрасной спектроскопии.

Для сравнительной оценки общей горючести исходных и состаренных образцов был использован метод определения предельного кислородного индекса по стандартной и доработанной методикам.

Для оценки изменения диэлектрических свойств изоляции образцов в условиях эксплуатационного термического старения были использованы методы: определения электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, межпроводной емкости, вероятности короткого замыкания.

Выбранные образцы для проведения исследования и последовательное использование перечисленных методов исследования позволили оценить деструктивные процессы, происходящие в ПВХ изоляции кабельных изделий при эксплуатационном термическом старении и предложить методы оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ, учитывающие термическое старение в условиях длительной эксплуатации.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Изменение химического состава и структуры ПВХ изоляции кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации

С целью определения релевантной температуры ускоренного термического состаривания, а также для количественной оценки изменения состава поливинилхлоридной изоляции при термическом старении был проведен гравиметрический анализ. В таблице 3.1 приведены результаты эксперимента. На рисунке 3.1 приведен график относительной потери массы при ускоренном термическом состаривании с разной степенью нагрева. Предварительная проработка исследования по данному направлению представлена в работе [73].

Таблица 3.1 – Средняя выборочная относительная потери массы при термическом состаривании образцов с разной степенью нагрева

№ образца	Средняя выборочная относительной потери массы, % (при T, °C)					
	80	110	150	180	200	220
1	0,116	4,144	17,728	39,781	75,286	79,371
2	0,192	4,569	18,231	40,562	74,874	80,001
3	0,129	4,632	15,994	39,001	75,987	81,002
4	0,121	8,944	16,828	44,569	76,821	83,568
5	0,151	3,023	14,058	38,995	73,254	77,963

С возрастанием степени нагрева исследуемых образцов изоляции процент потери массы повышается. Опираясь на данные литературных источников и на полученные экспериментальные данные, можно сделать предположения о характере процессов деструкции, протекающих при термическом воздействии разной интенсивности (таблица 3.2).

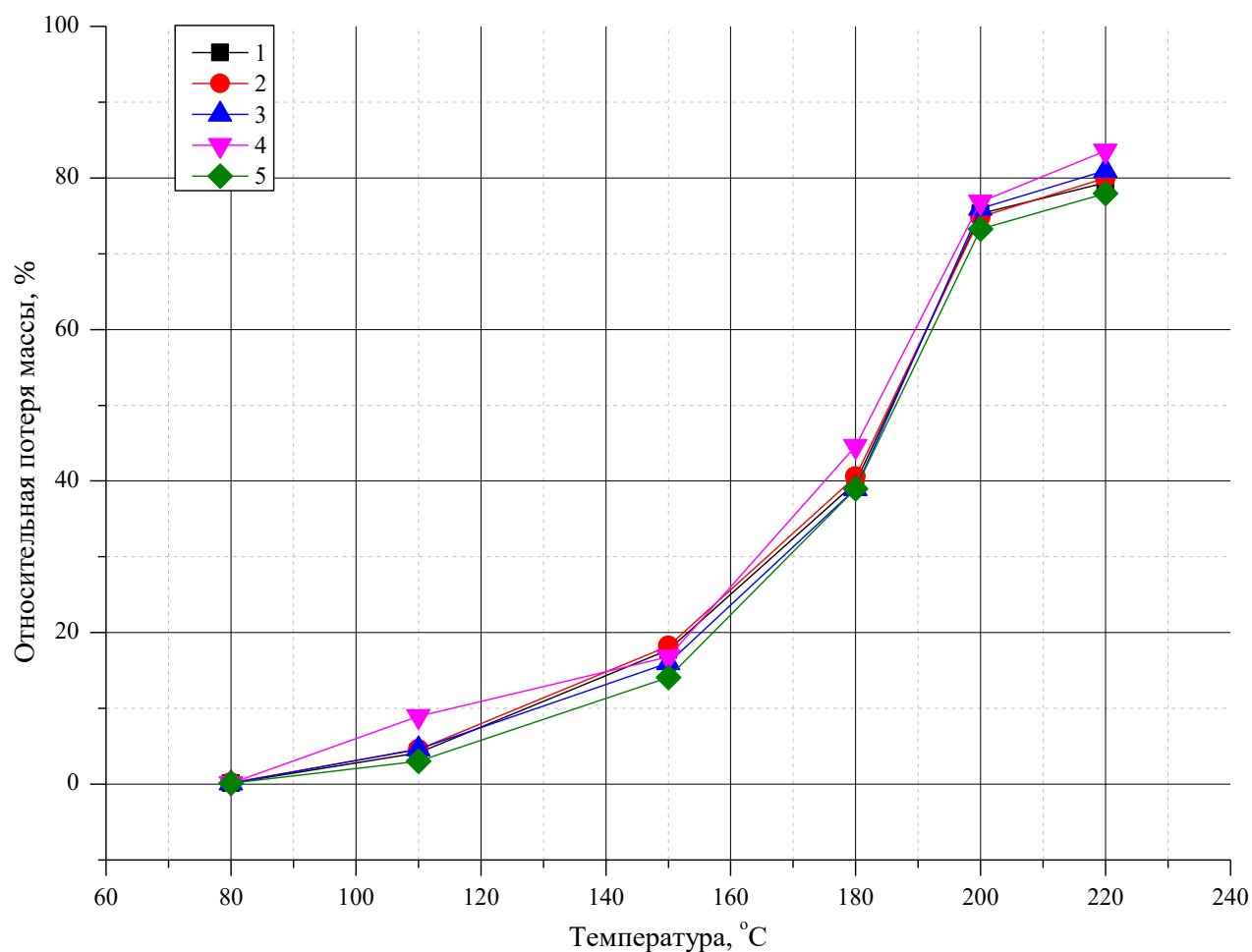


Рисунок 3.1 – Относительная потеря массы при ускоренном термическом состаривании с разной степенью нагрева

Таблица 3.2 – Характеристика процессов деструкции при термическом воздействии разной интенсивности

№ п/п	Температура, °C	Средняя относительная потеря массы, %	Средняя относительная скорость потери массы, %·ч ⁻¹	Протекающие процессы деструкции
1	80	0,5	0,001	испарение пластификатора с низкой интенсивностью
2	110	5	0,030	
3	150	17	0,099	преобладает испарение пластификатора и начинается протекать реакция дегидрохлорирования с низкой интенсивностью
4	180	40	0,242	
5	200	75	0,448	интенсифицируются процессы испарения пластификатора и дегидрохлорирования ПВХ
6	220	80	0,478	

Для оценки взаимосвязи между степенью нагрева и потерей массы образцов при термическом старении был рассчитан коэффициент корреляции. Ковариация определялась по формуле:

$$\text{cov}(x, y) = \overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}, \quad (3.1)$$

где x – значения факторного признака (температура),

y – значения результативного признака (относительная потеря массы).

$$\text{cov}(x, y) = 7181,794 - 156,667 \cdot 36,33 = 1490,12.$$

Показателем тесноты связи является выборочный линейный коэффициент корреляции, который рассчитывался по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{S(x) \cdot S(y)}, \quad (3.2)$$

где $S(x)$, $S(y)$ – соответствующие среднеквадратические отклонения.

$$r_{xy} = \frac{7181,794 - 156,667 \cdot 36,33}{49,216 \cdot 32,058} = 0,944.$$

Линейный коэффициент корреляции может принимать значения от -1 до $+1$. Связи между признаками могут быть слабыми и сильными (тесными). Их критерии оцениваются по шкале Чеддока:

$0,1 < r_{xy} < 0,3$: слабая;

$0,3 < r_{xy} < 0,5$: умеренная;

$0,5 < r_{xy} < 0,7$: заметная;

$0,7 < r_{xy} < 0,9$: высокая;

$0,9 < r_{xy} < 1$: весьма высокая.

Исходя из значения выборочного линейного коэффициента, связь между признаком x и фактором y по шкале Чеддока весьма высокая и прямая.

Для оценки значимости коэффициента корреляции были выдвинуты гипотезы:

$H_0: r_{xy} = 0$, нет линейной взаимосвязи между переменными;

$H_1: r_{xy} \neq 0$, есть линейная взаимосвязь между переменными.

Для того чтобы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверить нулевую гипотезу о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции нормальной двумерной

случайной величины при конкурирующей гипотезе $H_1 \neq 0$, было вычислено наблюдаемое значение критерия ($t_{\text{набл.}}$) по формуле:

$$t_{\text{набл.}} = r_{xy} \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (3.3)$$

где n – количество выборки.

$$t_{\text{набл.}} = r_{xy} \cdot \frac{\sqrt{28}}{\sqrt{1-0,944^2}} = 15,207.$$

По таблице Стьюдента с уровнем значимости $\alpha=0,05$ и степенями свободы $k=28$ была найдена критическая точка двусторонней критической области $t_{\text{крит}}$ по формуле:

$$t_{\text{крит}}(n - m - 1; \frac{\alpha}{2}), \quad (3.4)$$

где $m = 1$ – количество объясняющих переменных.

$$t_{\text{крит}}(28; 0,025) = 2,368.$$

Поскольку $|t_{\text{набл.}}| > t_{\text{крит}}$, то гипотеза о равенстве нулю коэффициента корреляции была отклонена. Другими словами, коэффициент корреляции статистически значим.

Таким образом, между степенью нагрева и потерей массы образцов при термическом старении связь весьма высокая и прямая, т.к. линейный коэффициент корреляции является значимым и равен 0,944.

Чтобы определить температуру, при которой начинают протекать химические реакции деструкции, не носящие термофлуктуационный характер, был проведен термогравиметрический анализ изоляции исходных образцов. Зависимость скорости потери массы образцов изоляции кабельных изделий от температуры приведены на рисунке 3.2.

Скорость потери массы до 200 °C у всех образцов равна 0 мг·мин⁻¹. От 200 до 240 °C скорость потери массы не превышает 0,1 мг·мин⁻¹. Пик скорости потери массы образцов приходится на интервал температур от 270 до 300 °C. Отличающиеся температуры начала, интервалы и пики термической деструкции указывают на то, что изоляция образцов имеет разный химический состав и

физико-химическую структуру. Основная деструкция образцов протекает в интервале температур от 200 до 350 °С. Известно, что в данном интервале температур происходит испарение пластификатора и выделяется HCl при разложении поливинилхлорида (дегидрохлорирование).

В работе [69] проводился термогравиметрический анализ исходных и состаренных при 150 °С в течение 40 часов образцов изоляции провода АПуВ 2,5. Зависимость относительной массы исходных и состаренных образцов изоляции кабельных изделий от температуры приведены на рисунке 3.3.

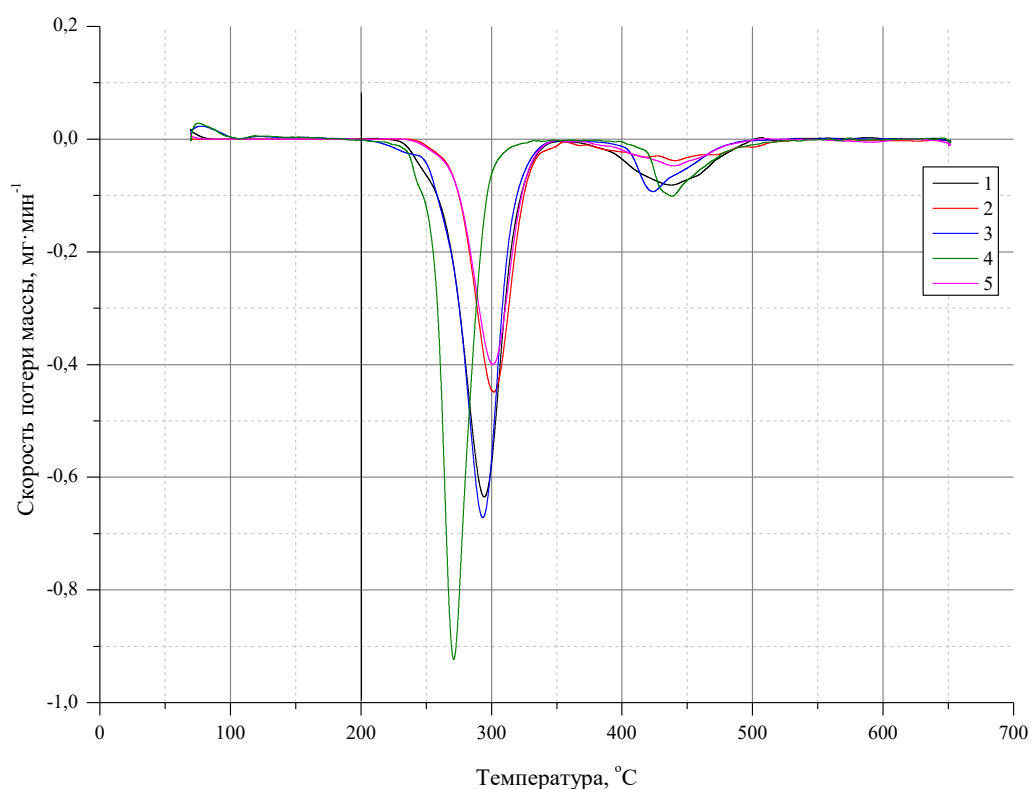


Рисунок 3.2 – Зависимость скорости потери массы образцов изоляции кабельных изделий от температуры

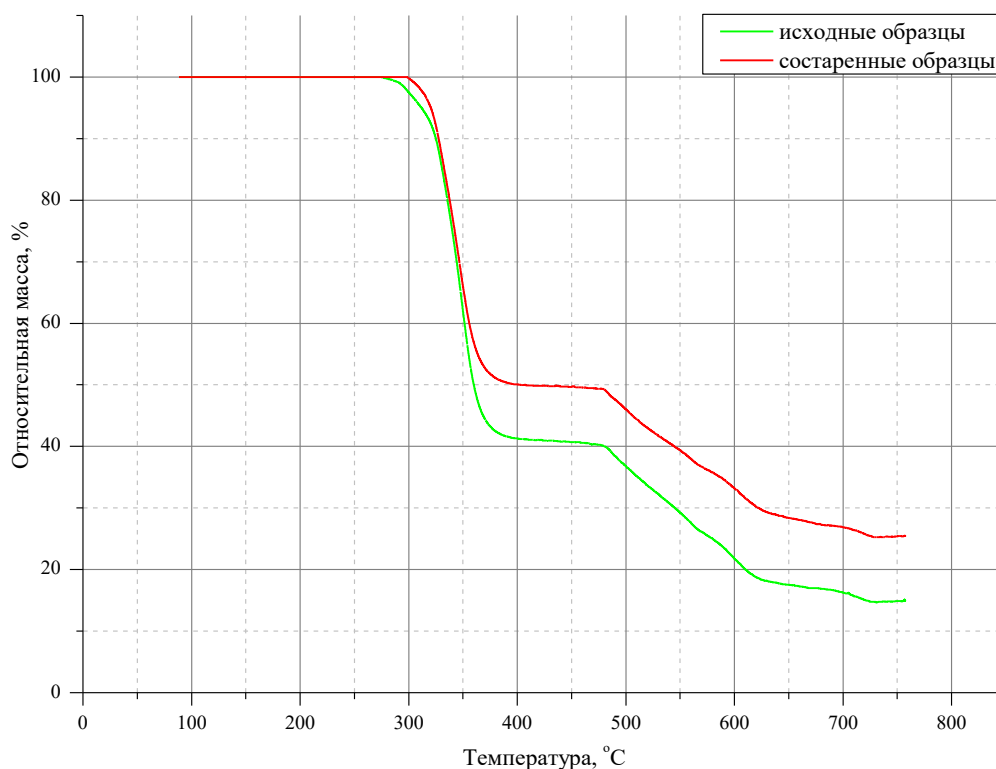


Рисунок 3.3 – Зависимость относительной массы исходных и состаренных образцов изоляции кабельных изделий от температуры

Термическое разложение исходных и состаренных образцов изоляции имеет схожий характер (одинаковые интервалы термического разложения, схожие наклоны кривой потери массы и положение максимумов на кривой теплового потока). Отличие заключается в проценте потери массы в интервале температур от 200 до 360 °C: у исходных образцов процент потери составил 58 %, у состаренных – 50 %.

Данные гравиметрического и термогравиметрического анализа позволяют говорить о том, что при термическом воздействии на образцы с температурой до 200 °C процессы термической деструкции носят термофлуктуационный характер.

Как известно, при дегидрохлорировании ПВХ атомы водорода и хлора, находящиеся рядом с атомами углерода, отделяются от молекулы и объединяются в молекулы хлористого водорода (HCl), которые затем удаляются из зоны химической реакции. Оставшиеся разорванные связи замыкаются на соседних атомах углерода. В результате в молекуле ПВХ образуются последовательности

чередующихся одинарных (C–C) и двойных (C=C) углеродных связей, которые называются полиеновыми. После этого могут образовываться смолы и другие растворимые продукты, а затем начинается вторичная деструкция, которая сопровождается разрывом цепей [72].

Для количественной и качественной оценки изменений химического состава изоляции образцов были проведены исследования методом инфракрасной спектроскопии, подробные результаты которых приведены в работе [37]. На рисунках 3.4-3.8 приведены спектральные характеристики исходных и состаренных образцов изоляции [36]. На графиках отмечены пики колебаний, характерные для определенных связей.

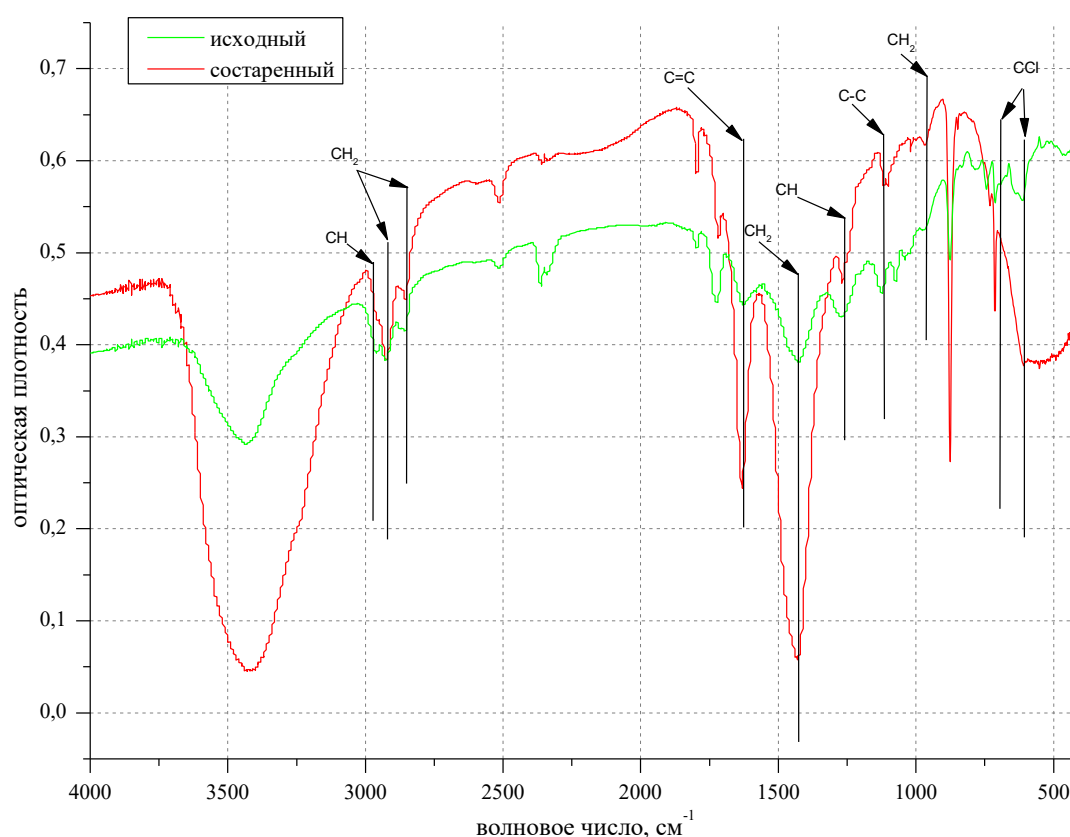


Рисунок 3.4 – Спектральные характеристики ПВХ изоляции первого образца

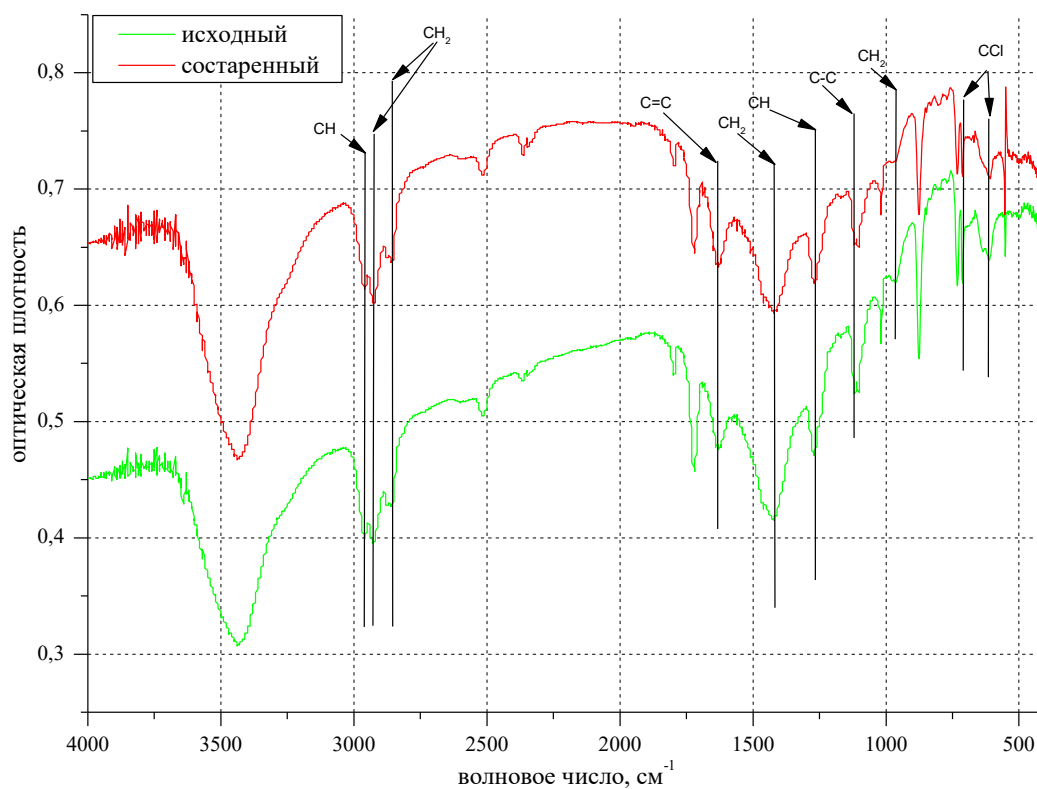


Рисунок 3.5 – Спектральные характеристики ПВХ изоляции второго образца

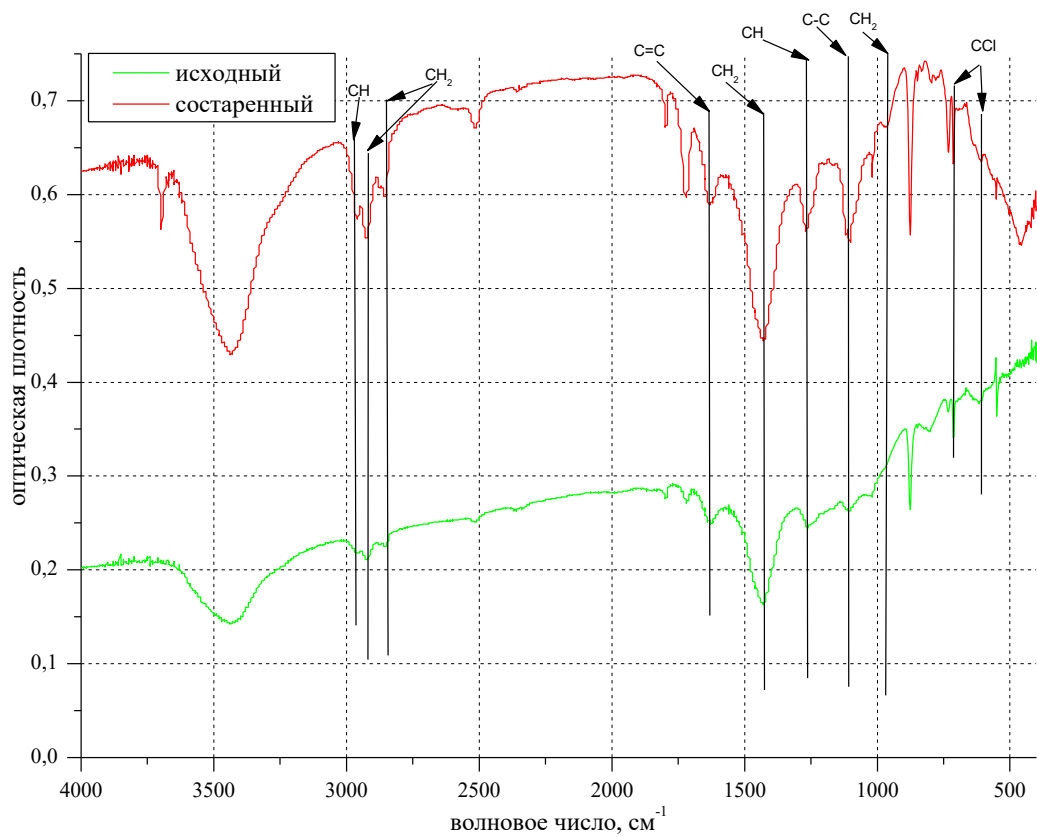


Рисунок 3.6 – Спектральные характеристики ПВХ изоляции третьего образца

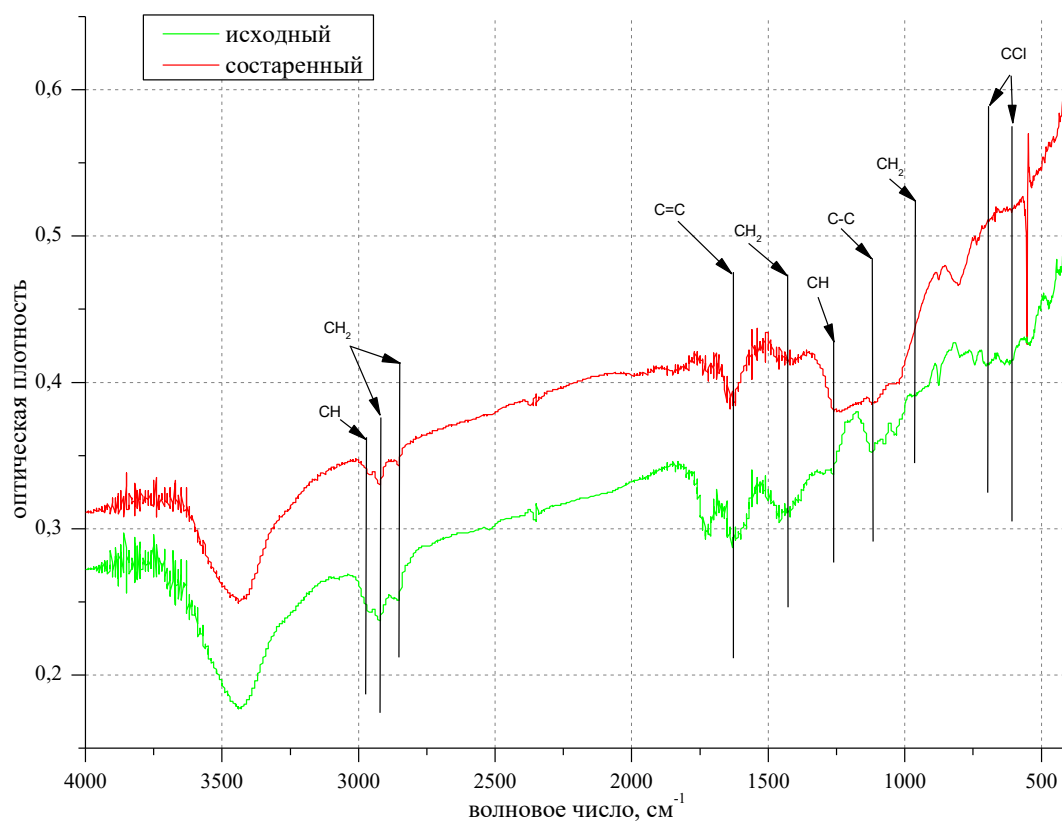


Рисунок 3.7 – Спектральные характеристики ПВХ изоляции четвертого образца

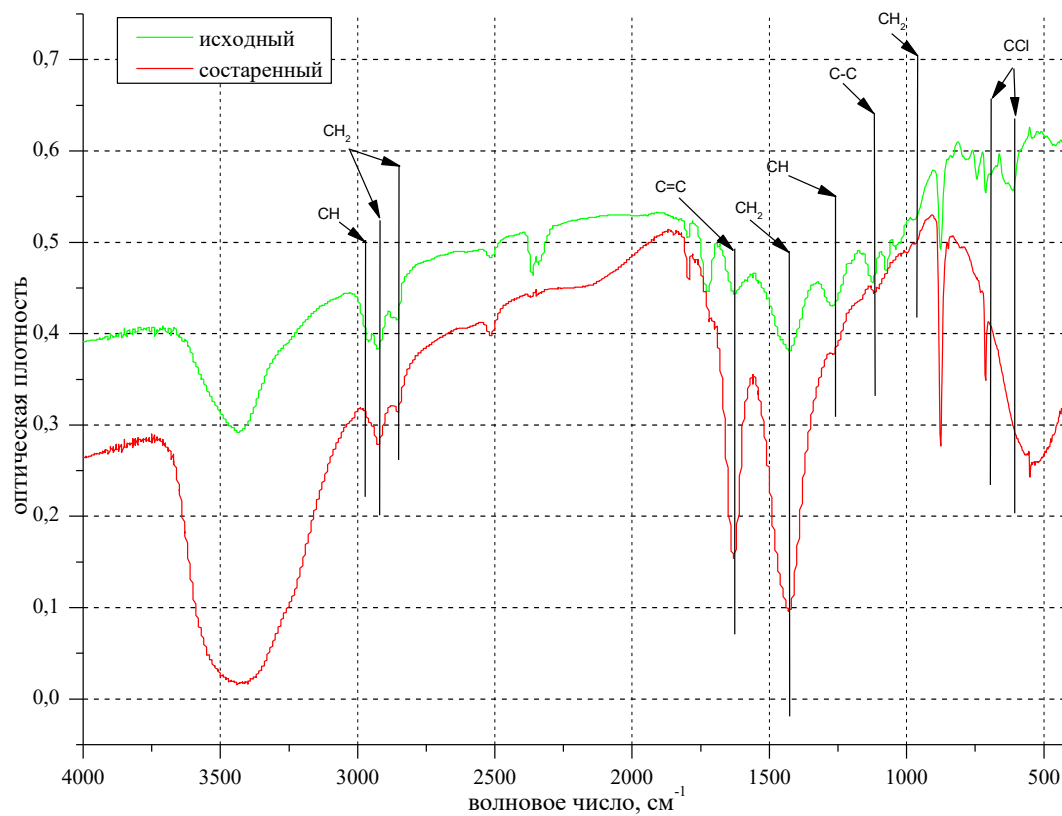


Рисунок 3.8 – Спектральные характеристики ПВХ изоляции для пятого образца

В таблице 3.3 приведены значения спектрального критерия, для валентных колебаний связей C-Cl и C=C. На рисунках 3.9-3.11 визуализированы значения спектрального критерия исходных и состаренных образцов для химических связей в интервале характерных частот ИК-спектра ПВХ изоляции для каждого из образцов.

На рисунке 3.12 приведены значения среднего выборочного спектрального критерия рассматриваемых химических связей для всех видов образцов. Интенсивность валентных колебаний связи C-Cl (волновое число – 607 см^{-1}) после ускоренного термического состаривания образцов снизилась на 19,96 %, валентных колебаний связи C-Cl (волновое число – 688 см^{-1}) – на 13,91 %. Суммарно интенсивность валентных колебаний связи C-Cl после ускоренного термического состаривания снизилась на 33,87 %. Интенсивность валентных колебаний связи C=C (волновое число – 1635 см^{-1}) у состаренных образцов увеличилась на 40,64 %.

Таблица 3.3 – Значения спектрального критерия для химических связей в интервале характерных частот

Номер образца	Исходный / состаренный	Спектральный критерий для химических связей в интервале характерных частот		
		D(551)/D(607), C-Cl вал.	D(675)/D(688), C-Cl вал.	D(1570)/D(1635), C=C вал.
1	исходный	1,11	1,02	1,07
	состаренный	0,52	0,92	1,84
2	исходный	1,04	1,08	1,06
	состаренный	1,02	1,04	1,08
3	исходный	1,02	1,12	1,06
	состаренный	1,01	1,10	1,08
4	исходный	1,02	1,08	1,05
	состаренный	0,78	0,56	1,15
5	исходный	1,12	1,02	1,05
	состаренный	0,92	0,96	2,29

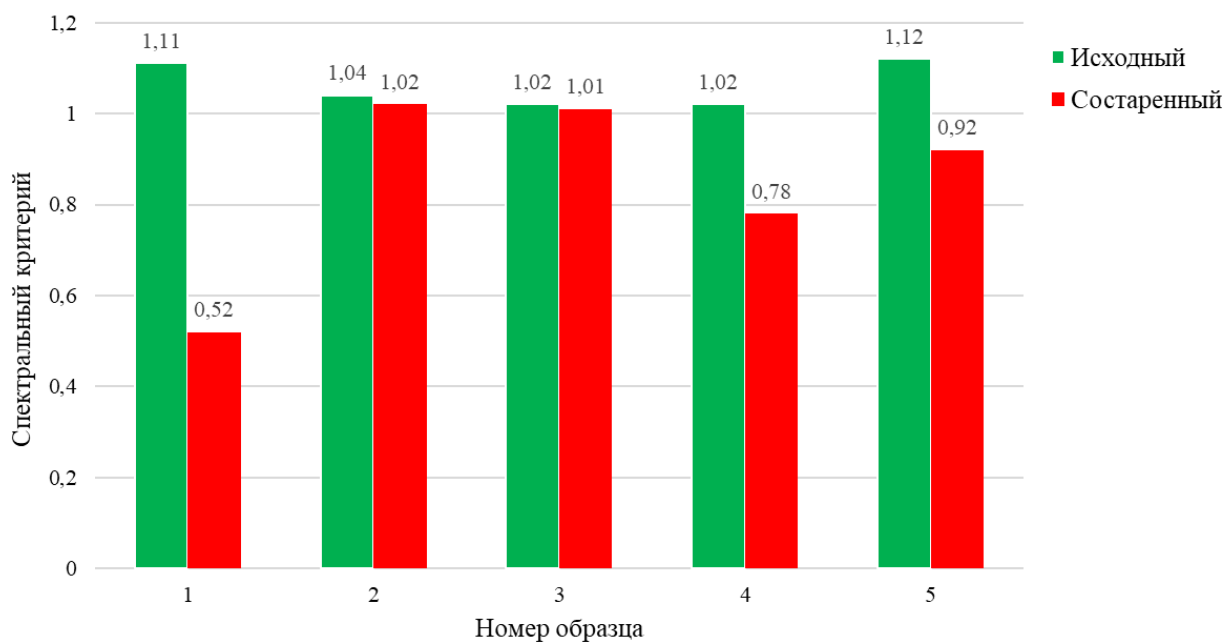


Рисунок 3.9 – Значения спектрального критерия для химической связи C-Cl_{вал.} (волновое число – 607 см⁻¹) исходных и состаренных образцов

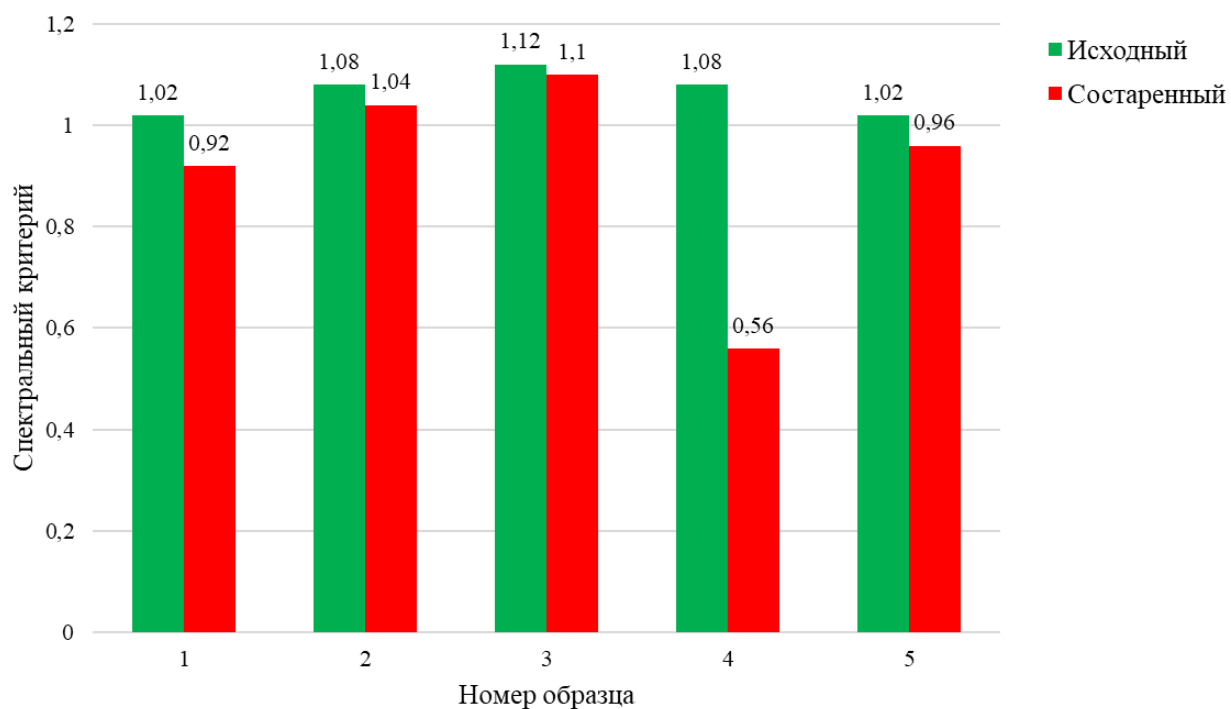


Рисунок 3.10 – Значения спектрального критерия для химической связи C-Cl_{вал.} (волновое число – 688 см⁻¹) исходных и состаренных образцов

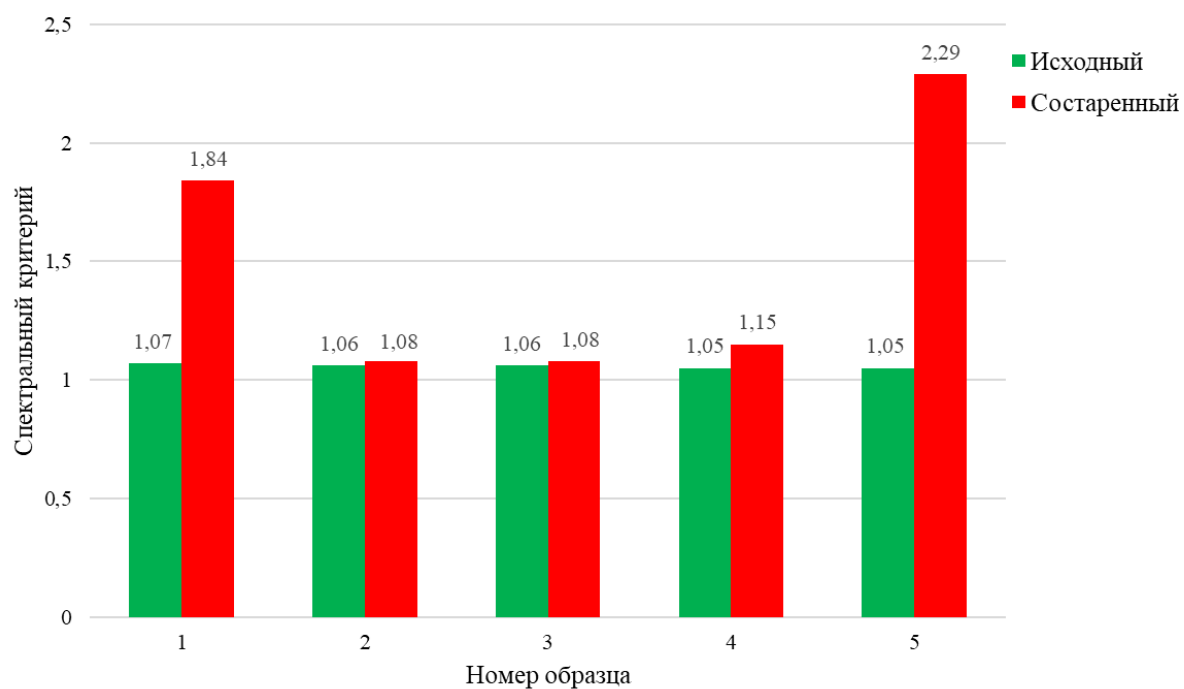
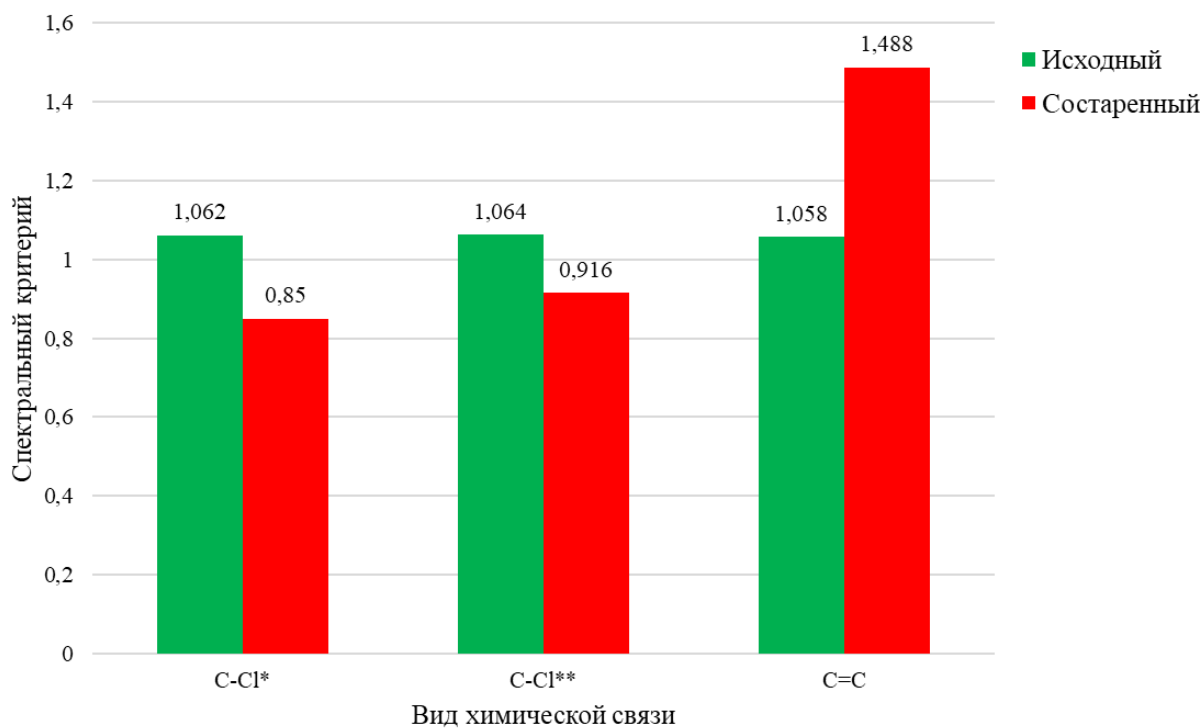


Рисунок 3.11 – Значения спектрального критерия для химической связи $C=C_{\text{вал.}}$ (волновое число – 1635 см^{-1}) исходных и состаренных образцов



* - волновое число – 607 см^{-1} ; ** - волновое число – 688 см^{-1}

Рисунок 3.12 – Значения среднего выборочного спектрального критерия рассматриваемых химических связей для всех видов образцов

Таким образом, по результатам, полученным методом ИК-спектроскопии, можно сделать вывод о том, что при термическом старении ПВХ изоляции кабельных изделий количество хлоридных групп в составе материала снижается в среднем на 33,87 %. Количество полиеновых последовательностей углерода в материале изоляции в результате термического старения возрастает в среднем на 40,64 %.

3.2. Влияние термического старения в условиях длительной эксплуатации на общую горючесть ПВХ изоляции кабельных изделий

Оценка влияния термического старения на общую горючесть ПВХ изоляции кабельных изделий была проведена на основании экспериментальных данных, полученных методом определения предельного кислородного индекса.

Метод оценки общей горючести изоляции кабельных изделий должен учитывать наиболее опасные условия эксплуатации. Стандартная методика определения предельного кислородного индекса предполагает подведение горелки к верхней горизонтальной поверхности вертикально расположенного образца.

В условиях эксплуатации наиболее опасным является сценарий пожара, при котором происходит распространение пламени снизу-вверх по вертикально расположенному кабельному изделию. При таком сценарии восходящие тепловые потоки, возникающие в результате реакции горения, подогревают горючее вещество, тем самым интенсифицируя реакцию, а также создаются более благоприятные условия для газообмена. На рисунке 3.13 приведены результаты испытаний на предельный кислородный индекс при различном способе зажигания [39].



1 – воспламенение сверху (концентрация кислорода в реакционной камере равна 22,6 % об.);
 2-6 – воспламенение снизу (2 – концентрация кислорода в реакционной камере равна 22,6 % об.; 3 – 22,4 % об.; 4 – 22,2 % об.; 5 – 22,1 % об.; 6 – 22,0 % об.)

Рисунок 3.13 – Результаты испытаний на предельный кислородный индекс при различном способе зажигания

На рисунке 3.14 приведены результаты эксперимента по оценке влияния способа зажигания образца на значение предельного кислородного индекса ПВХ изоляции кабельных изделий.

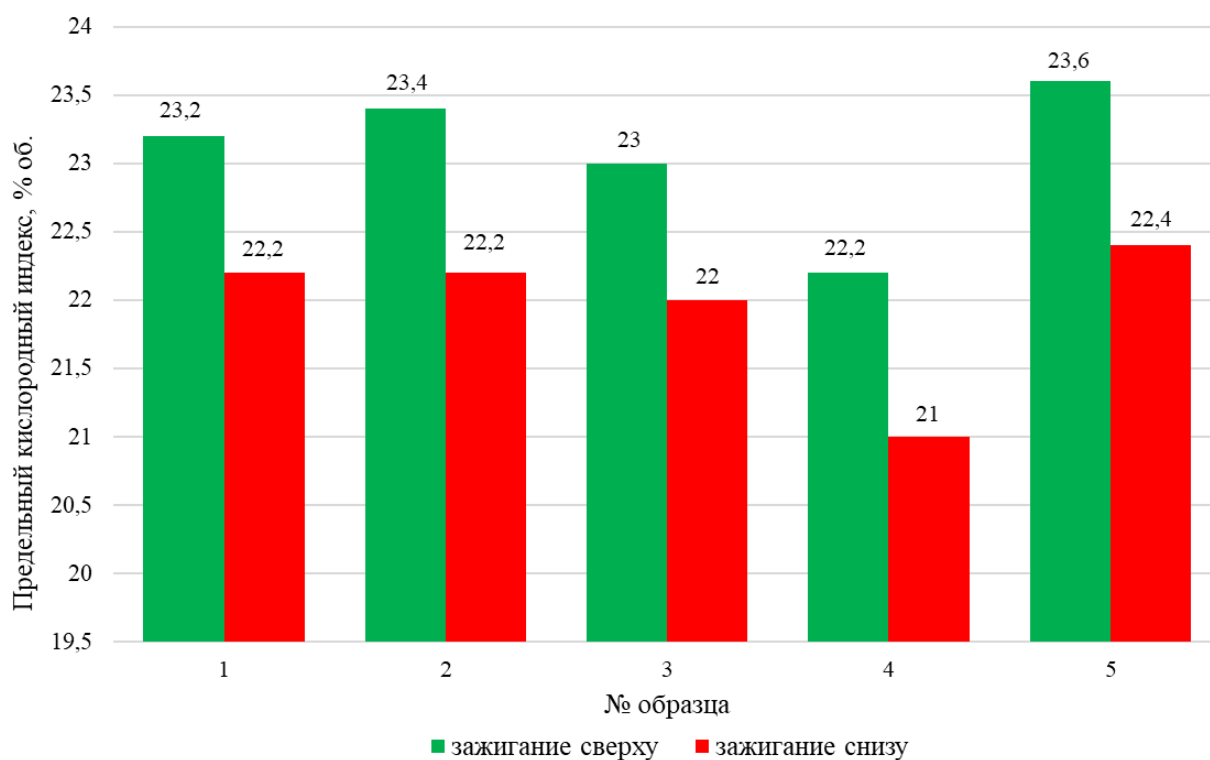


Рисунок 3.14 – Значения показателя предельного кислородного индекса для исходных образцов при различном способе зажигания

При зажигании образцов снизу средний показатель предельного кислородного индекса на 1,8 % ниже, чем при зажигании сверху. Согласно методике ГОСТ 12.1.044-89 [16] сходимость метода не должна превышать 0,5 % об., что позволяет говорить о том, что способ зажигания образца влияет на показатель предельного кислородного индекса.

На рисунке 3.15 приведены значения предельного кислородного индекса для исходных и состаренных образцов при зажигании образцов снизу.

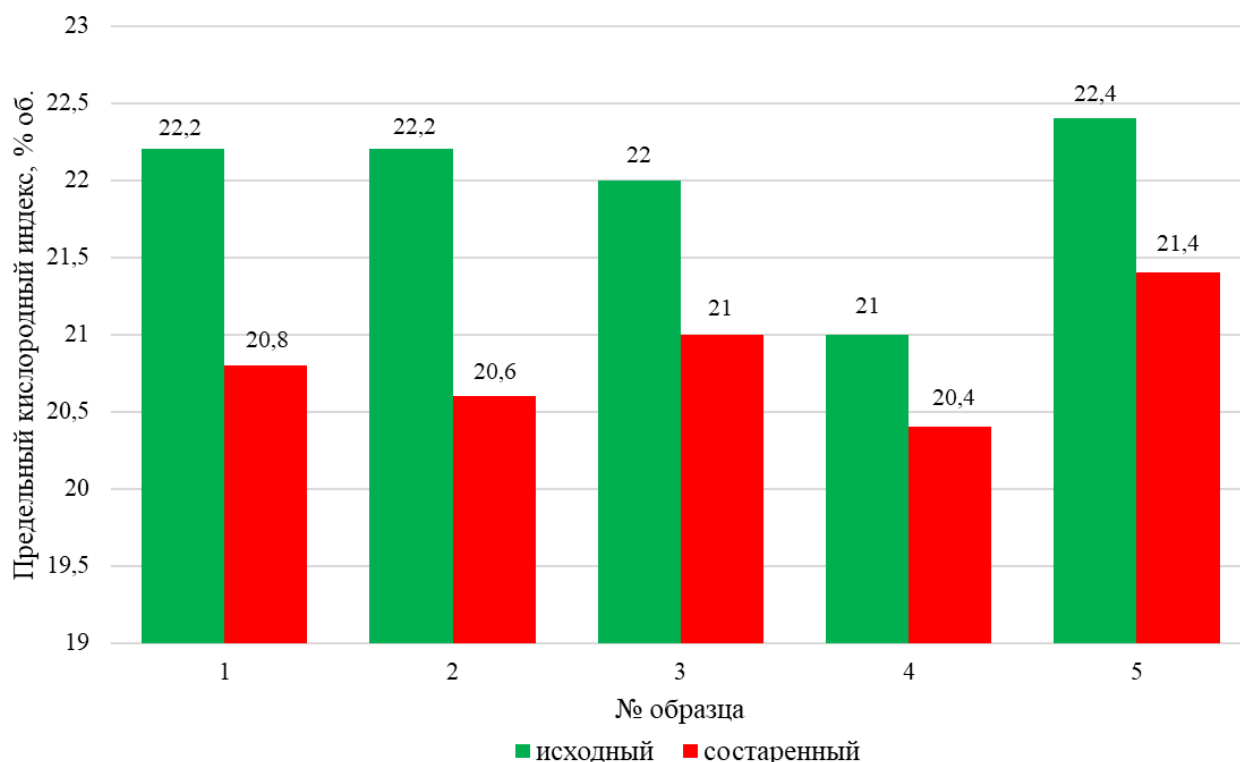


Рисунок 3.15 – Значения показателя предельного кислородного индекса для исходных и состаренных образцов при зажигании образцов снизу

Средний показатель предельного кислородного индекса образцов 1,2,4 стал ниже, а образца 3 – равен концентрации кислорода в атмосфере воздуха, что указывает на возможность самостоятельного горения кабельных изделий в условиях эксплуатации [69]. У образца 5 показатель снизился до 21,4 % об., что незначительно превышает концентрацию кислорода в воздухе по объему и указывает на возможность самостоятельного горения при сочетании определенных условий тепло- и газообмена на пожаре. Показатель предельного кислородного

индекса в результате термического старения образцов снизился в среднем на 1,1 % об.

3.3. Изменение диэлектрических свойств ПВХ изоляции кабельных изделий при термическом эксплуатационном старении

Для оценки влияния термического старения на диэлектрические свойства ПВХ изоляции кабельных изделий были проведены исследования методами: определения электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь и межпроводной емкости.

Сопротивление изоляции измеряли при напряжениях: 100, 250, 500 и 1000 В. Наиболее репрезентативными являются значения сопротивления изоляции при испытании напряжением 1000 В (таблица 3.4, рисунок 3.16).

Таблица 3.4 – Средние выборочные значения сопротивления изоляции исходных и состаренных образцов при испытании напряжением 1000 В

№ образца	Сопротивление, МОм	
	исходный	состаренный
1	≥ 10000	25
2	≥ 10000	37
3	≥ 10000	0,31
4	≥ 10000	0,23
5	≥ 10000	43

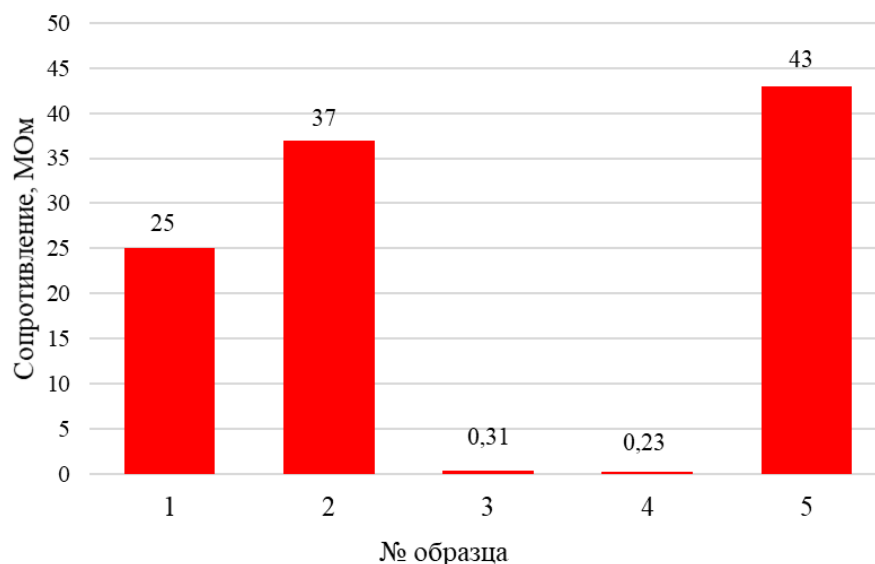


Рисунок 3.16 – Средние выборочные значения сопротивления изоляции состаренных образцов при испытании напряжением 1000 В

При испытании изоляции исходных образцов, значения сопротивления изоляции превышали порог максимального измеряемого прибором сопротивления (10 ГОм).

Известно, что для кабельных изделий сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм [81]. Сопротивление изоляции образцов 3 и 4 в результате термического старения снизилось с 10 ГОм до 0,31 и 0,23 МОм соответственно, что указывает на невозможность дальнейшей эксплуатации кабельных изделий. Сопротивление изоляции образцов 1, 2 и 5 в результате термического старения снизилось с 10 ГОм до 25, 37 и 43 МОм соответственно, что отвечает действующим нормам. В среднем сопротивление изоляции образцов снизилось на 99,79 %.

В таблице 3.5 приведены средние выборочные значения тангенса угла диэлектрических потерь для исходных и состаренных образцов на разных частотах электрического тока.

Таблица 3.5 – Средние выборочные значения тангенса угла диэлектрических потерь для исходных и состаренных образцов

f, кГц	tgδ									
	1		2		3		4		5	
	исх.	состар.	исх.	состар.	исх.	состар.	исх.	состар.	исх.	состар.
50	0,06	0,08	0,07	0,09	0,07	0,09	0,08	0,09	0,05	0,07
300	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,07	0,06	0,07	0,04	0,06
1000	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04
5000	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,02	0,04
13000	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,03	0,04
24000	0,04	0,06	0,04	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,03	0,05
27000	0,04	0,06	0,05	0,07	0,06	0,08	0,06	0,08	0,04	0,05
35000	0,15	0,29	0,16	0,32	0,17	0,38	0,19	0,38	0,10	0,25

На рисунках 3.17-3.21 приведены зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходных и состаренных образцов. В результате термического старения у всех образцов тангенс угла диэлектрических потерь увеличился.

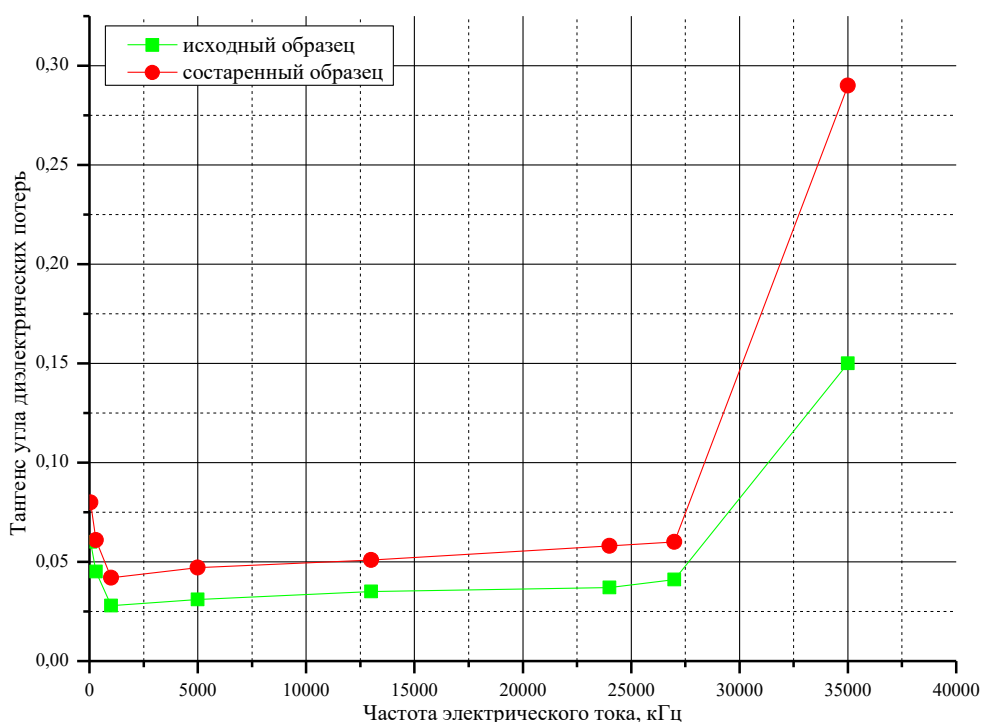


Рисунок 3.17 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходного и состаренного образца 1

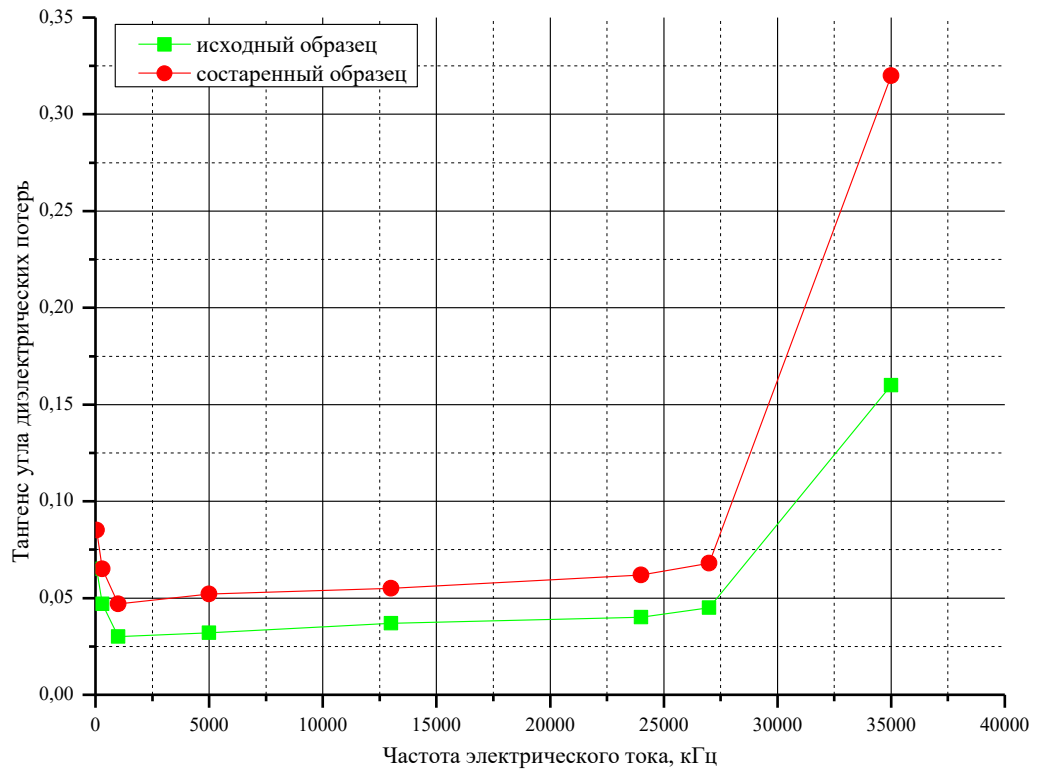


Рисунок 3.18 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходного и состаренного образца 2

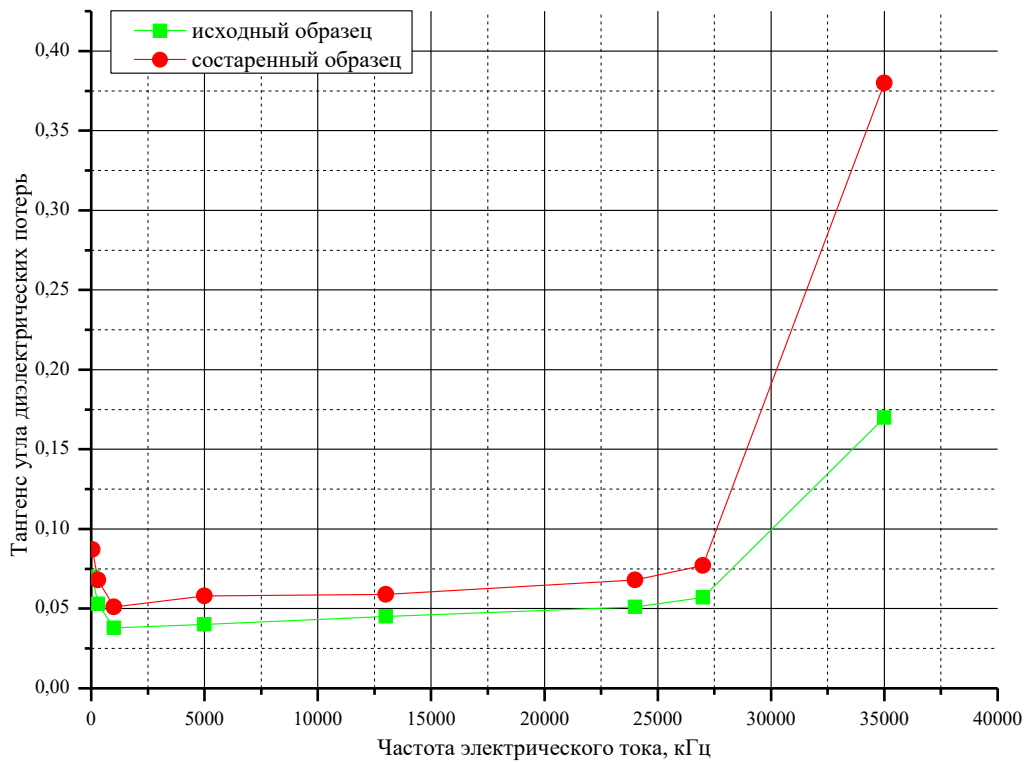


Рисунок 3.19 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходного и состаренного образца 3

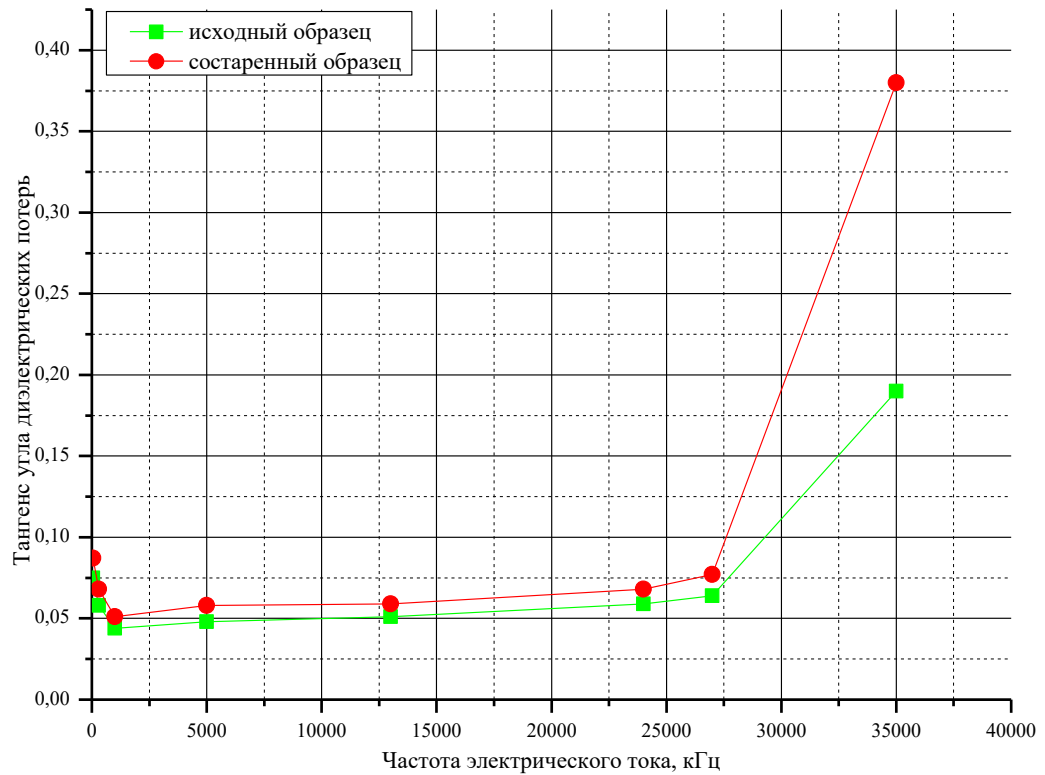


Рисунок 3.20 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходного и состаренного образца 4

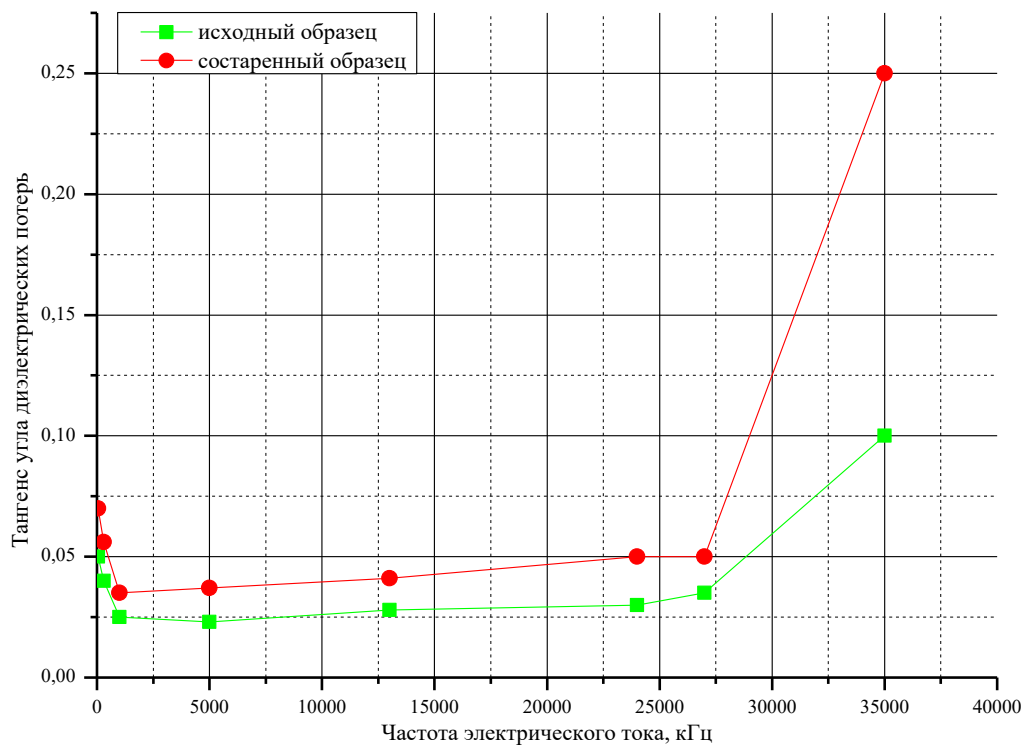


Рисунок 3.21 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического тока для исходного и состаренного образца 5

Добротность изоляции является величиной, обратной тангенсу угла диэлектрических потерь и показывает качество диэлектрика как изолятора. В таблице 3.6 приведены средние выборочные значения добротности изоляции для исходных и состаренных образцов на разных частотах электрического тока.

Для всех видов образцов частотой электрического тока, на которой значения диэлектрических потерь в исследуемом диапазоне максимальны, является частота 35000 кГц. На рисунке 3.22 приведена добротность изоляции исходных и состаренных образцов на частоте электрического тока 35000 кГц.

Таблица 3.6 – Средние выборочные значения добротности изоляции для исходных и состаренных образцов

Частота электрического тока (f), кГц	Добротность изоляции (Q)									
	1		2		3		4		5	
	исходный	состаренный	исходный	состаренный	исходный	состаренный	исходный	состаренный	исходный	состаренный
50	16,67	12,50	15,38	11,76	14,29	11,49	13,33	11,49	20,00	14,29
300	22,22	16,39	21,28	15,38	18,87	14,71	17,24	14,71	25,00	17,86
1000	35,71	23,81	33,33	21,28	26,32	19,61	22,73	19,61	40,00	28,57
5000	32,26	21,28	31,25	19,23	25,00	17,24	20,83	17,24	43,48	27,03
13000	28,57	19,61	27,03	18,18	22,22	16,95	19,61	16,95	35,71	24,39
24000	27,03	17,24	25,00	16,13	19,61	14,71	16,95	14,71	33,33	20,00
27000	24,39	16,67	22,22	14,71	17,54	12,99	15,63	12,99	28,57	20,00
35000	6,67	3,45	6,25	3,13	5,88	2,63	5,26	2,63	10,00	4,00

В результате термического старения у всех образцов снизились значения добротности, что указывает на ухудшение электроизоляционных свойств. В среднем в результате термического старения значения добротности изоляции на частоте электрического тока 35000 кГц снизились на 53,5 %.

Значения межпроводной емкости для исходных и состаренных образцов приведены на рисунке 3.23.

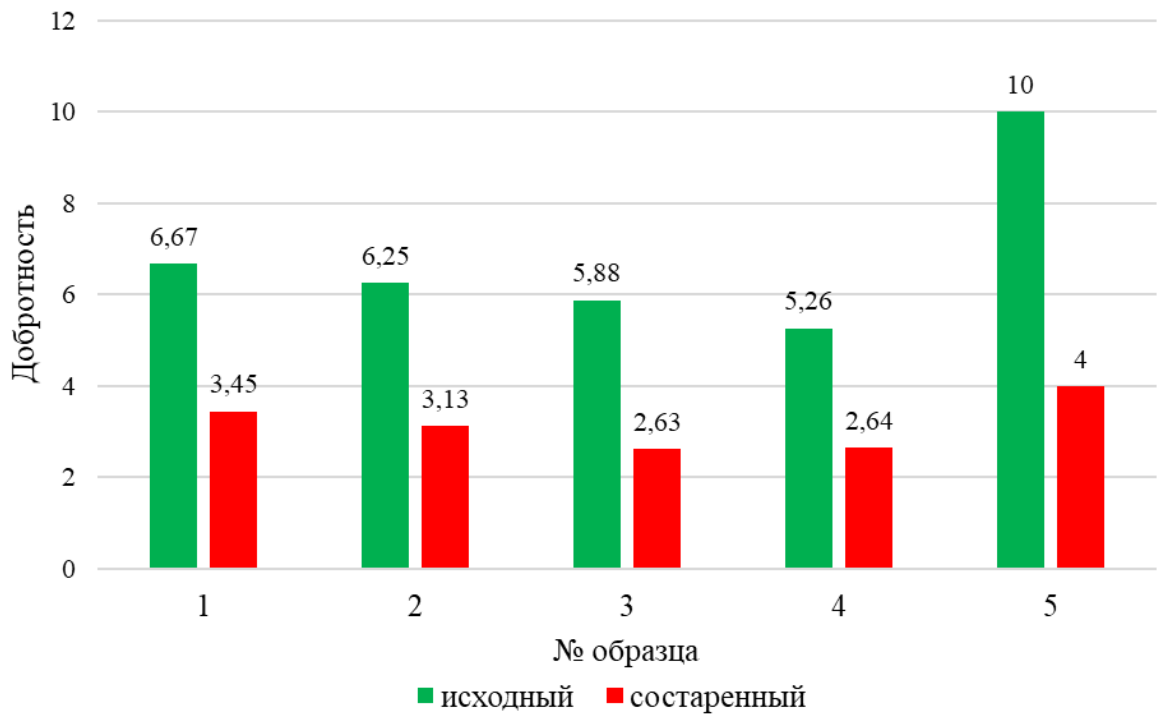


Рисунок 3.22 – Добротность изоляции исходных и состаренных образцов на частоте электрического тока 35000 кГц

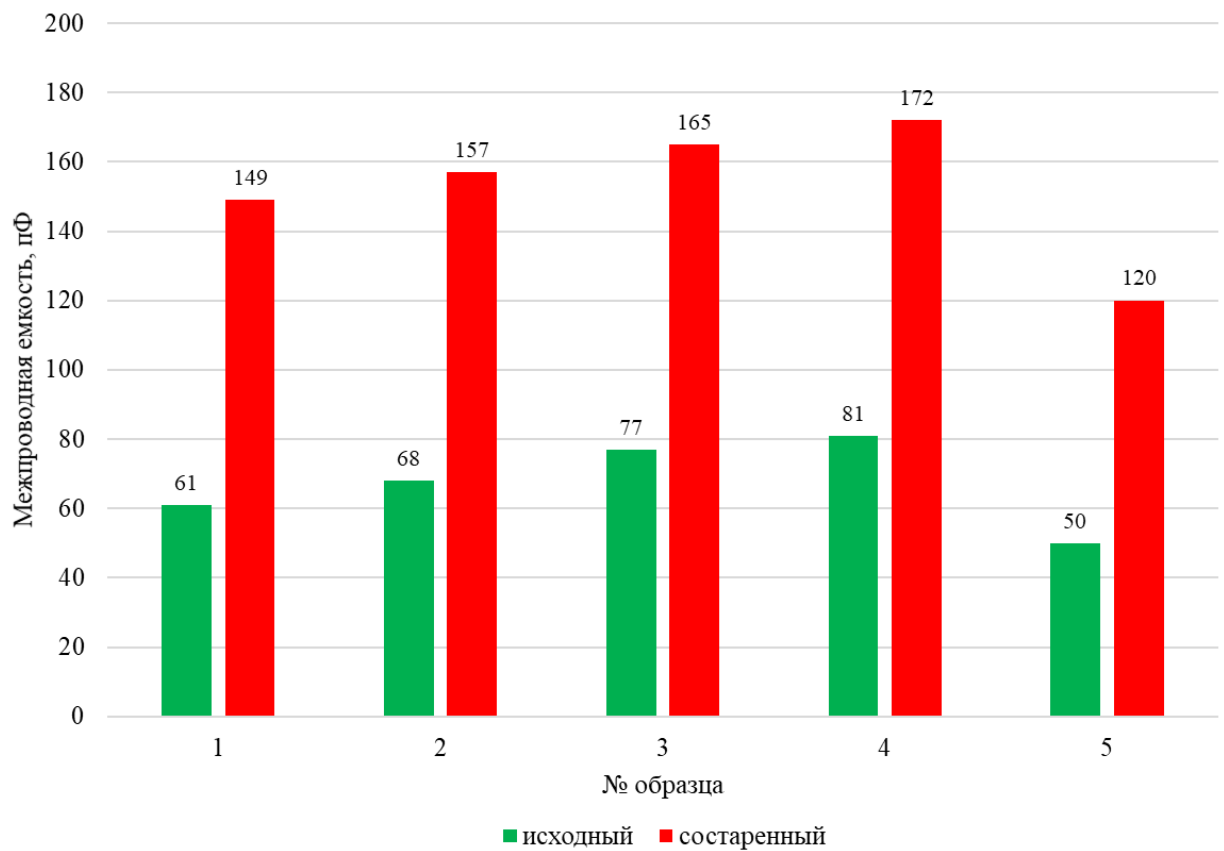


Рисунок 3.23 – Значения межпроводной емкости исходных и состаренных образцов

В процессе термического воздействия межпроводная емкость увеличилась у каждого из образцов, что свидетельствует о снижении диэлектрических свойств изоляции. В среднем межпроводная емкость увеличилась на 55,8 %.

Ключевым параметром, по которому можно оценить возможность возникновения пожароопасного аварийного режима работы кабельного изделия, является вероятность короткого замыкания [70]. В таблице 3.7 представлены значения времени наступления и вероятности короткого замыкания для исходных и состаренных образцов при различных уровнях токовой нагрузки.

Таблица 3.7 – Время наступления и вероятность короткого замыкания образцов при различных уровнях токовой нагрузки

Вид образца	№ образца	Время наступления КЗ, мин			Вероятность КЗ, %		
		длительно допустимый ток	2-х кратная перегрузка	4-х кратная перегрузка	длительно допустимый ток	2-х кратная перегрузка	4-х кратная перегрузка
исходный	1	-	-	9,2	0%	0%	20%
	2	-	-	9,05	0%	0%	40%
	3	-	8,9	6,1	0%	40%	100%
	4	-	8,12	5,06	0%	100%	100%
	5	-	-	9,8	0%	0%	0%
состаренный	1	-	9,1	6,1	0%	40%	100%
	2	-	9,07	5,1	0%	60%	100%
	3	-	5,1	3,26	0%	100%	100%
	4	9,35	4,26	1,16	40%	100%	100%
	5	-	9,7	8,03	0%	20%	40%

На рисунках 3.24 и 3.25 представлены средние выборочные значения вероятности и времени наступления короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий.

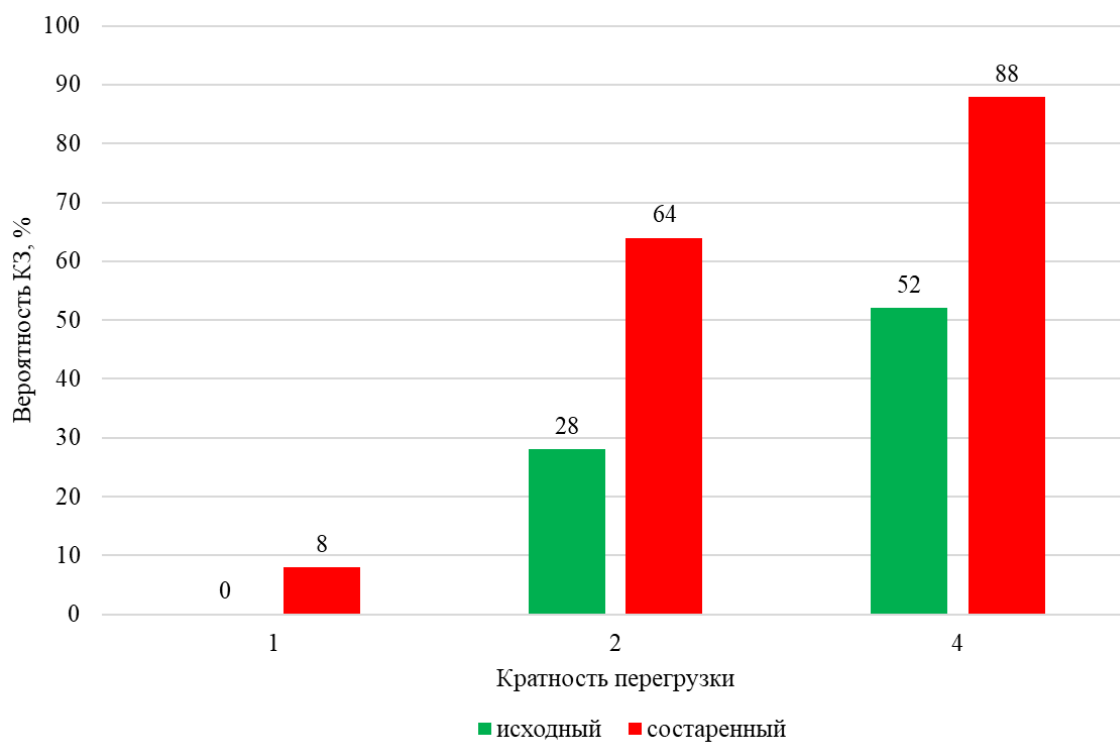


Рисунок 3.24 – Средние выборочные значения вероятности короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий

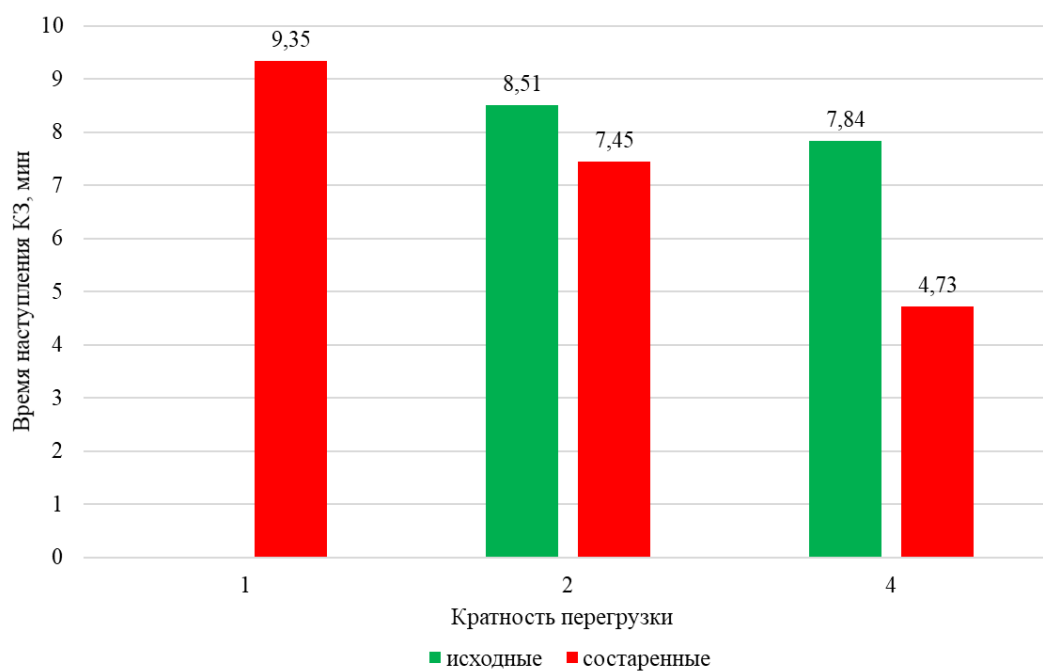


Рисунок 3.25 – Средние выборочные значения времени наступления короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий

Все исходные образцы выдержали испытания длительно допустимым электрическим током в течение 10 мин. При двукратной токовой перегрузке на исходных образцах 3 и 4 произошло короткое замыкание, вероятность которого составила 40 и 100 % соответственно. При четырехкратной токовой перегрузке короткое замыкание произошло на 1, 2, 3 и 4 исходных образцах с вероятностью 20, 40, 100 и 100 % соответственно.

После ускоренного термического состаривания испытание длительным допустимым электрическим током не выдержал образец номер 4 с вероятностью 40 %. При двукратной токовой перегрузке на всех образцах произошло короткое замыкание со средней вероятностью 64 %. При четырехкратной токовой перегрузке все образцы не выдержали испытание со средней вероятностью короткого замыкания 88 %. Время наступления короткого замыкания при разной токовой нагрузке снизилось для всех образцов.

3.4. Взаимосвязь между химическим составом, структурой ПВХ изоляции и пожарной опасностью кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации

Методом ИК-спектроскопии было установлено, что термическое старение приводит к снижению количества хлоридных групп в составе материала ПВХ изоляции кабельных изделий в среднем на 33,87 % за срок службы. Показатель предельного кислородного индекса в результате термического старения снижается в среднем на 1,1 % об. за срок службы. Для оценки взаимосвязи между процессами термического старения, снижением количества хлоридных групп и повышением общей горючести кабельных изделий был проведен статистический анализ экспериментальных данных и найдено уравнение регрессии:

$$y = 20,1967 + 0,9596x_1 + 0,7568x_2, \quad (3.5)$$

где x_1 , x_2 — значения факторных признаков (состояние образца и спектральный критерий связи C-Cl соответственно),

у – значения результативного признака (общая горючесть).

Парные коэффициенты корреляции были найдены по формуле 3.2:

$$r_{yx_1} = \frac{10,98 - 0,5 \cdot 21,4}{0,5 \cdot 0,704} = 0,795.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о сильной линейной связи между x_1 и у.

$$r_{yx_2} = \frac{20,532 - 0,956 \cdot 21,4}{0,172 \cdot 0,704} = 0,605.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x_2 и у.

$$r_{x_1x_2} = \frac{0,531 - 0,956 \cdot 0,5}{0,172 \cdot 0,5} = 0,617.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x_2 и x_1 .

Средняя ошибка аппроксимации определялась по формуле:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\epsilon}{y} \right|}{n} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

где n – количество выборки,

ϵ – несмещенная ошибка.

$$A = \frac{0,158}{10} \cdot 100 \% = 1,58 \%.$$

Несмещенная оценка дисперсии определялась по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{n-m-1} \cdot S_e^2, \quad (3.7)$$

где m - количество объясняющих переменных,

S_e^2 – оценка дисперсии.

$$S^2 = \frac{1}{10-2-1} \cdot 1,719 = 0,2456.$$

Среднеквадратичное отклонение оценивалось по формуле:

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (3.8)$$

$$S = \sqrt{0,2456} = 0,496.$$

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии была проведена по критерию Фишера. Коэффициент корреляции определялся по

формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{s_e^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{1,719}{4,96} = 0,6534.$$

Были выдвинуты и проверены гипотезы об общей значимости – гипотезы об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0;$$

$$H_1: R^2 \neq 0.$$

Проверка гипотез осуществлялась с помощью F-статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка) по формуле:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} \quad (3.10)$$

$$F = \frac{0,6534}{1-0,6534} \cdot \frac{10-2-1}{2} = 6,597.$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = n-m-1 = 7$, $F_{кр}(2;7) = 4.7374$. Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

По результатам статистического анализа можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на результат y оказывает фактор x_1 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 65,34 % общей вариабельности y объясняется изменением факторов x_j .

Таким образом, снижение количества хлоридных групп в составе материала ПВХ изоляции при термическом старении влияет на общую горючесть кабельных изделий.

По результатам исследования установлено, что в результате термического старения за срок службы: количество полиеновых последовательностей углерода возрастает в среднем на 40,64 %, добротность изоляции на частоте электрического тока 35000 кГц снижается в среднем на 53,5 %, вероятность короткого замыкания при двукратной перегрузке возрастает на 36 %. Для оценки взаимосвязи между

данными показателями был проведен статистический анализ экспериментальных данных по исходным и состаренным образцам.

Для исходных образцов оценку уровня регрессии осуществляли по уравнению:

$$y = 4144,3756 + 19,0312x_1 + 3676,6768x_2, \quad (3.11)$$

где x_1 , x_2 – значения факторных признаков (добротность изоляции и спектральный критерий связи $C=C$ соответственно),

y – значения результирующего признака (вероятность КЗ).

Парные коэффициенты корреляции были найдены по формуле 3.2:

$$r_{yx_1} = \frac{153,2 - 6,84 \cdot 28}{1,646 \cdot 39,192} = -0,594.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x_1 и y .

$$r_{yx_2} = \frac{29,48 - 1,058 \cdot 28}{0,00748 \cdot 39,192} = -0,491.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о не сильной линейной связи между x_2 и y .

$$r_{x_1x_2} = \frac{7,233 - 1,058 \cdot 6,84}{0,00748 \cdot 1,646} = -0,286.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x_2 и x_1 .

Средняя ошибка аппроксимации определялась по формуле 3.6:

$$A = \frac{0,167}{5} \cdot 100 \% = 3,33 \%.$$

Несмещенная оценка дисперсии определялась по формуле 3.7:

$$S^2 = \frac{1}{5-2-1} \cdot 1320,891 = 660,4454.$$

Среднеквадратичное отклонение оценивалось по формуле 3.8:

$$S = \sqrt{660,4454} = 25,699.$$

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии была проведена по критерию Фишера. Коэффициент корреляции определялся по формуле 3.9:

$$R^2 = 1 - \frac{1320,891}{7680} = 0,828.$$

Были выдвинуты и проверены гипотезы об общей значимости – гипотезы об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0;$$

$$H_1: R^2 \neq 0.$$

Проверка гипотез осуществлялась с помощью F-статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка) по формуле 3.10:

$$F = \frac{0,828}{1-0,828} \cdot \frac{5-2-1}{2} = 4,814.$$

Табличное значение $F_{кр}$ при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = 2$, $F_{кр}(2;2) = 19$. Поскольку фактическое значение $F < F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически не значим и уравнение регрессии статистически ненадежно. Вместе с тем, установлено, что в исследуемой ситуации 82,8 % общей вариабельности y объясняется изменением факторов x_j .

Для состаренных образцов оценку уровня регрессии осуществляли по уравнению:

$$y = 275,5489 + 77,1894x_1 + 21,7538x_2, \quad (3.12)$$

где x_1, x_2 – значения факторных признаков (добротность изоляции и спектральный критерий связи $C=C$ соответственно),

y – значения резульативного признака (вероятность КЗ).

Парные коэффициенты корреляции были найдены по формуле 3.2:

$$r_{yx_1} = \frac{185,2-3,16 \cdot 64}{0,539 \cdot 32} = -0,988.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о весьма сильной линейной связи между x_1 и y .

$$r_{yx_2} = \frac{81,44-1,488 \cdot 64}{0,493 \cdot 32} = -0,875.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о сильной линейной связи между x_2 и y .

$$r_{x_1x_2} = \frac{4,949-1,488 \cdot 3,16}{0,493 \cdot 0,539} = 0,931.$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о весьма сильной линейной связи между x_2 и x_1 .

Средняя ошибка аппроксимации определялась по формуле 3.6:

$$A = \frac{0,327}{5} \cdot 100 \% = 6,54 \%$$

Несмещенная оценка дисперсии определялась по формуле 3.7:

$$S^2 = \frac{1}{5-2-1} \cdot 43,606 = 21,8029.$$

Среднеквадратичное отклонение оценивалось по формуле 3.8:

$$S = \sqrt{21,8029} = 4,669.$$

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии была проведена по критерию Фишера. Коэффициент корреляции определялся по формуле 3.9:

$$R^2 = 1 - \frac{43,606}{5120} = 0,9915.$$

Были выдвинуты и проверены гипотезы об общей значимости – гипотезы об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0;$$

$$H_1: R^2 \neq 0.$$

Проверка гипотез осуществлялась с помощью F-статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка) по формуле 3.10:

$$F = \frac{0,9915}{1-0,9915} \cdot \frac{5-2-1}{2} = 116,416.$$

Табличное значение $F_{кр}$ при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = 2$, $F_{кр}(2;2) = 19$. Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно. В исследуемой ситуации 99,15 % общей вариабельности y объясняется изменением факторов x_j .

Таким образом, статистический анализ данных показал, что образование полиеновых последовательностей углерода в процессе термического старения материала ПВХ изоляции приводит к снижению добротности и повышению

вероятности короткого замыкания кабельных изделий. Уравнение регрессии статистически надежно только для состаренных образцов. Поэтому по значениям добротности изоляции и спектрального критерия двойной связи углерода ускоренно состаренных образцов можно прогнозировать вероятность короткого замыкания для кабельных изделий в условиях эксплуатации.

Для оценки взаимосвязи между общей горючестью и вероятностью короткого замыкания исследуемых образцов был проведен корреляционный анализ. Ковариация определялась по формуле 3.1, где x – значения факторного признака (вероятность короткого замыкания), y – значения результативного признака (предельный кислородный индекс):

$$\text{cov}(x, y) = 961,6 - 46 \cdot 21,4 = -22,8.$$

Показателем тесноты связи является выборочный линейный коэффициент корреляции, который рассчитывался по формуле 3.2:

$$r_{xy} = \frac{961,6 - 46 \cdot 21,4}{40,05 \cdot 0,704} = -0,808.$$

Исходя из значения выборочного линейного коэффициента, связь между признаком x и фактором y по шкале Чеддока высокая и обратная.

Для оценки значимости коэффициента корреляции были выдвинуты гипотезы:

$H_0: r_{xy} = 0$, нет линейной взаимосвязи между переменными;

$H_1: r_{xy} \neq 0$, есть линейная взаимосвязь между переменными.

Для того чтобы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверить нулевую гипотезу о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции нормальной двумерной случайной величины при конкурирующей гипотезе $H_1 \neq 0$, было вычислено наблюдаемое значение критерия ($t_{\text{набл.}}$) по формуле 3.3:

$$t_{\text{набл.}} = 0,808 \cdot \frac{\sqrt{28}}{\sqrt{1-0,944^2}} = 15,207.$$

По таблице Стьюдента с уровнем значимости $\alpha=0,05$ и степенями свободы $k=8$ была найдена критическая точка двусторонней критической области $t_{\text{крит}}$ по формуле 3.4:

$$t_{\text{крит}}(8; 0,025) = 2,752.$$

Поскольку $|t_{\text{набл}}| > t_{\text{крит}}$, то гипотеза о равенстве 0 коэффициента корреляции была отклонена. Другими словами, коэффициент корреляции статистически значим.

Таким образом, связь между показателем предельного кислородного индекса ПВХ изоляции кабельных изделий и вероятностью короткого замыкания высокая и обратная, т.к. линейный коэффициент корреляции является значимым и равен – 0,808.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что повышение общей горючести изоляции при термическом старении в условиях длительной эксплуатации кабельных изделий обусловлено снижением количества хлоридных групп в составе материала изоляции и миграцией пластификатора в поверхностный слой изоляции [158].

Снижение диэлектрических свойств изоляции при термическом старении в условиях длительной эксплуатации кабельных изделий обусловлено:

- образованием полиеновых последовательностей углерода в структуре полимерной цепи;
- разрывом (укорачиванием) полимерной цепи;
- миграцией и удалением пластификатора;
- образованием дефектов физической структуры изоляции.

На рисунке 3.26 представлена схема миграции пластификатора в поверхностный слой материала изоляции и разрыва полимерной цепи при термическом старении в условиях длительной эксплуатации сопряженных со способами прокладки электропроводок, которые препятствуют испарению пластификатора (закрытые способы, а также в гофротрубе, кабель-канале, лотке и пр.) [133].

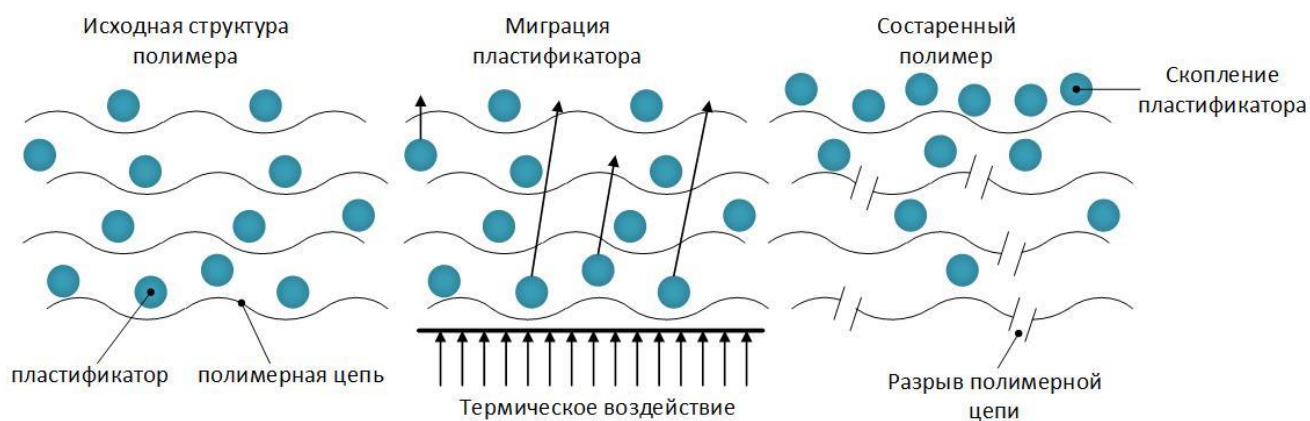


Рисунок 3.26 – Миграция пластификатора в поверхностный слой материала изоляции кабельного изделия в условиях термического старения

3.5. Способ оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ, учитывающий термическое старение в условиях длительной эксплуатации

3.5.1. Оценка ресурса пожаробезопасной эксплуатации

Пожарную опасность кабельных изделий определяют следующие факторы: наличие источника зажигания в виде пожароопасных проявлений электрического тока и наличие горючей среды в виде горючих электроизоляционных материалов (рисунок 3.27).

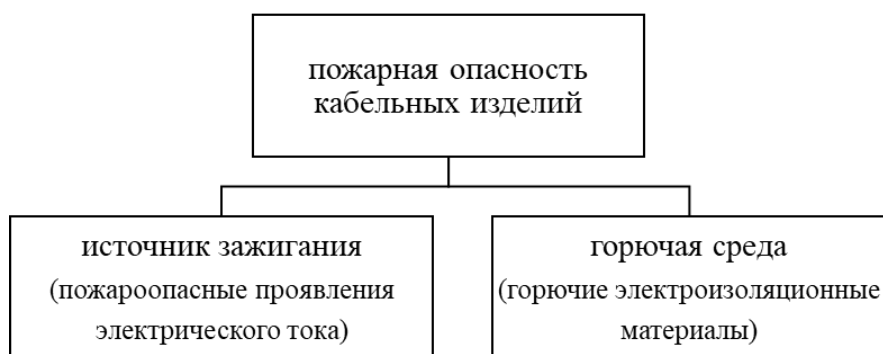


Рисунок 3.27 – Пожарная опасность кабельных изделий

Проведенные исследования показали, что в результате термического старения в условиях длительной эксплуатации происходит ухудшение диэлектрических свойств и повышение общей горючести ПВХ изоляции. Данные изменения приводят к снижению пожарной опасности кабельных изделий, которая зависит от указанных факторов в совокупности [68].

Таким образом, при оценке ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации, необходимо учитывать влияние процессов термической деструкции на диэлектрические свойства изоляции и общую горючесть кабельных изделий.

Оценка ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий практически может быть реализована на двух стадиях жизненного цикла кабельного изделия: при производстве и при эксплуатации [84]. В настоящей диссертационной работе рассматривается реализация подхода при производстве кабельных изделий.

Как показали исследования, релевантным методом определения общей горючести изоляции кабельного изделия является метод определения предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу. Для оценки электроизоляционных свойств изоляции наиболее подходящим является метод испытания токовой перегрузкой [7].

Предлагаемый научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации схематично изображен на рисунке 3.28.



Рисунок 3.28 – Предлагаемый научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации

Таким образом, наряду с требованиями пожарной безопасности кабельных изделий, которые предъявляются к возможности распространять горение, огнестойкости, коррозионной активности продуктов дымогазовыделения при горении и тлении полимерных материалов кабельного изделия, токсичности продуктов горения и дымообразованию при горении и тлении, необходимо предъявлять и требования, позволяющие обеспечить пожарную безопасность кабельного изделия в условиях длительной эксплуатации [8].

3.5.2. Релевантные условия ускоренного термического состаривания

На основании данных, опубликованных в открытой печати, можно сделать вывод о том, что исследование процессов термического старения основывается на использовании законов кинетики химических реакций применительно к изоляционным материалам [148, 149, 150].

Согласно уравнению Вант-Гоффа–Аррениуса срок ускоренного термического состаривания ПВХ изоляции кабельных изделий τ при температуре T может быть определен по выражению:

$$\tau = \tau_0 \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_0+273} \right) \right] = \tau_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R} \frac{T-T_0}{(T+273) \cdot T_0+273} \right], \quad (3.12)$$

где τ_0 – срок службы изоляции при допустимой температуре T_0 , ч;

E_a – энергия активации, Дж·моль⁻¹;

$R=8,317$ – универсальная газовая постоянная, Дж·(К·моль)⁻¹.

Для материалов одного класса нагревостойкости уравнение 3.12 может быть приведено в уравнение [105]:

$$\tau = \tau_0 \exp \left(-B \frac{\Delta T}{T+273} \right), \quad (3.13)$$

где B – безразмерный коэффициент, постоянный для материалов одного класса нагревостойкости;

$\Delta T=T-T_0$ – превышение температуры нагрева изоляции над допустимой температурой, °C.

В таблице 3.8 приведены значения коэффициента B для наиболее распространенных классов изоляции. Изоляция исследуемых образцов кабельных изделий относится к классу В [12].

Таблица 3.8 – Значения коэффициента B для изоляционных материалов разных классов нагревостойкости [105]

Класс изоляции	А	Е	В	Ф	Н
В	25,1	25,1	25,3	29,7	34,2

На рисунке 3.29 приведена зависимость срока службы кабельного изделия с ПВХ изоляцией от превышения температуры нагрева изоляции над допустимой.

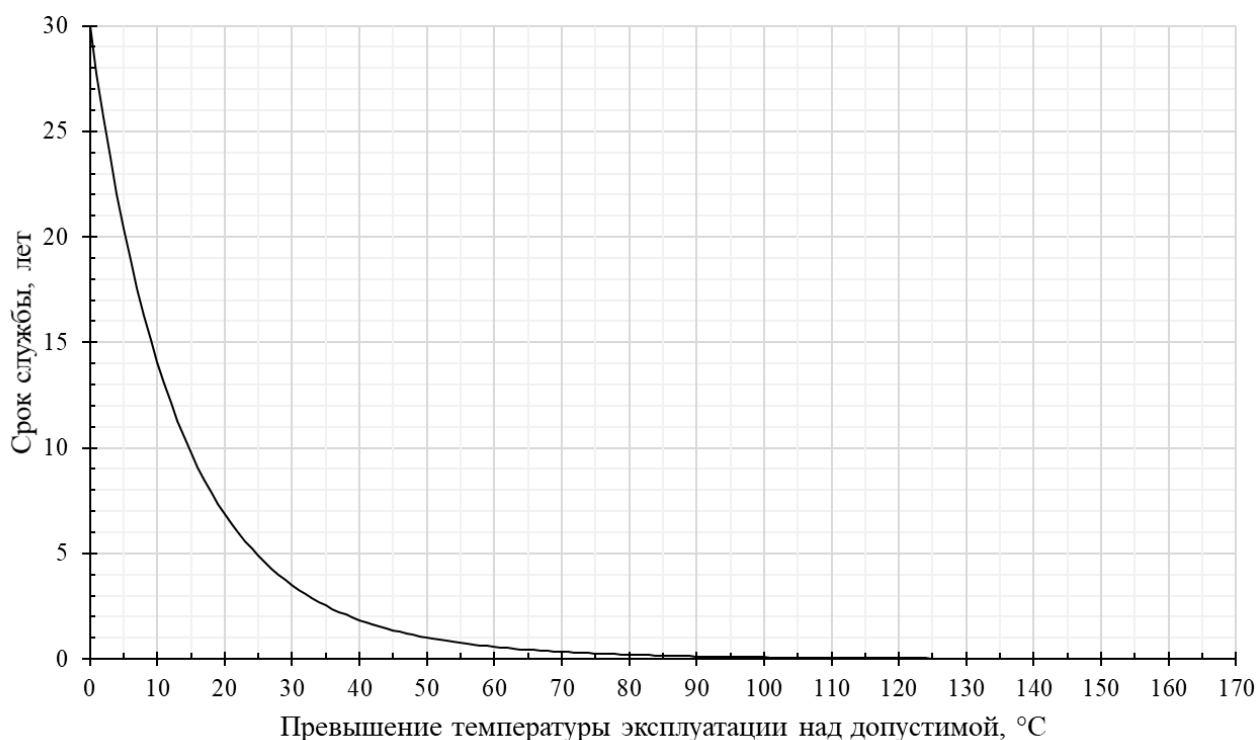


Рисунок 3.29 – Зависимость срока службы кабельного изделия с ПВХ изоляцией от превышения температуры нагрева изоляции над допустимой

Уравнение 3.13 может быть применено для определения релевантных условий ускоренного термического состаривания кабельных изделий с ПВХ изоляцией, если температура ускоренного термического состаривания не превышает температуры:

- начала химических реакций деструкции, не носящих термофлуктуационный характер;
- размягчения и плавления материала изоляции.

На рисунке 3.30 приведена зависимость продолжительности ускоренного термического состаривания ПВХ изоляции кабельного изделия от температуры.

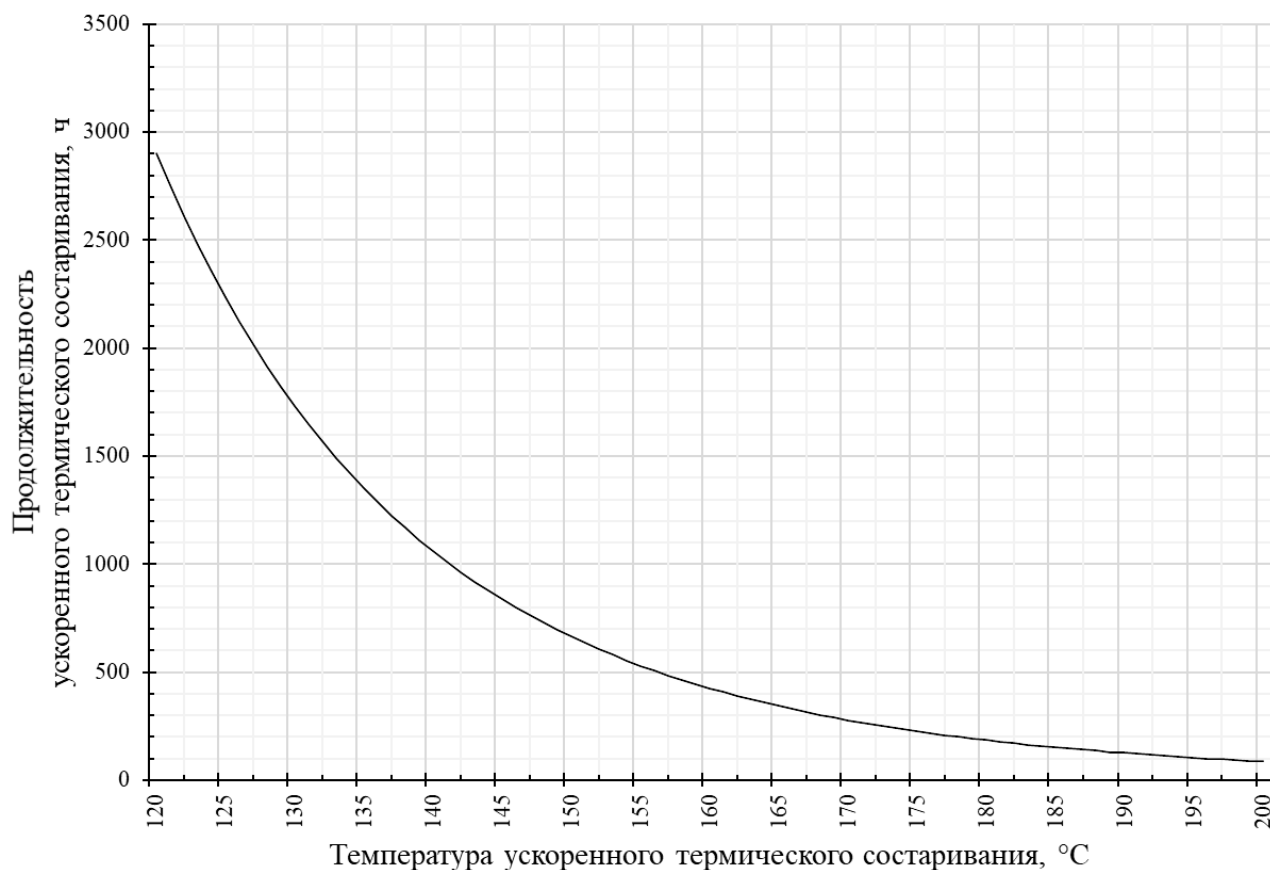


Рисунок 3.30 – Зависимость продолжительности ускоренного термического состаривания ПВХ изоляции кабельного изделия от температуры

Методом термогравиметрического анализа была определена минимальная температура протекания химических реакций деструкции, которые не носят термофлуктуационных характер (200 °C). Минимальная температура размягчения ПВХ пластикаторов, используемых для производства кабельных изделий равна 175 °C [24]. Допустимая температура нагрева проводников в кабельных изделиях с ПВХ изоляцией при коротком замыкании равна 150 °C [81].

Исходя из цели исследования, наиболее релевантными являются следующие условия ускоренного термического состаривания: 664 часа при 150 ± 3 °C и прохождении электрического тока с длительно допустимыми значениями, что эквивалентно 30 годам эксплуатации при предельно допустимом значении температуры нагрева токопроводящих жил.

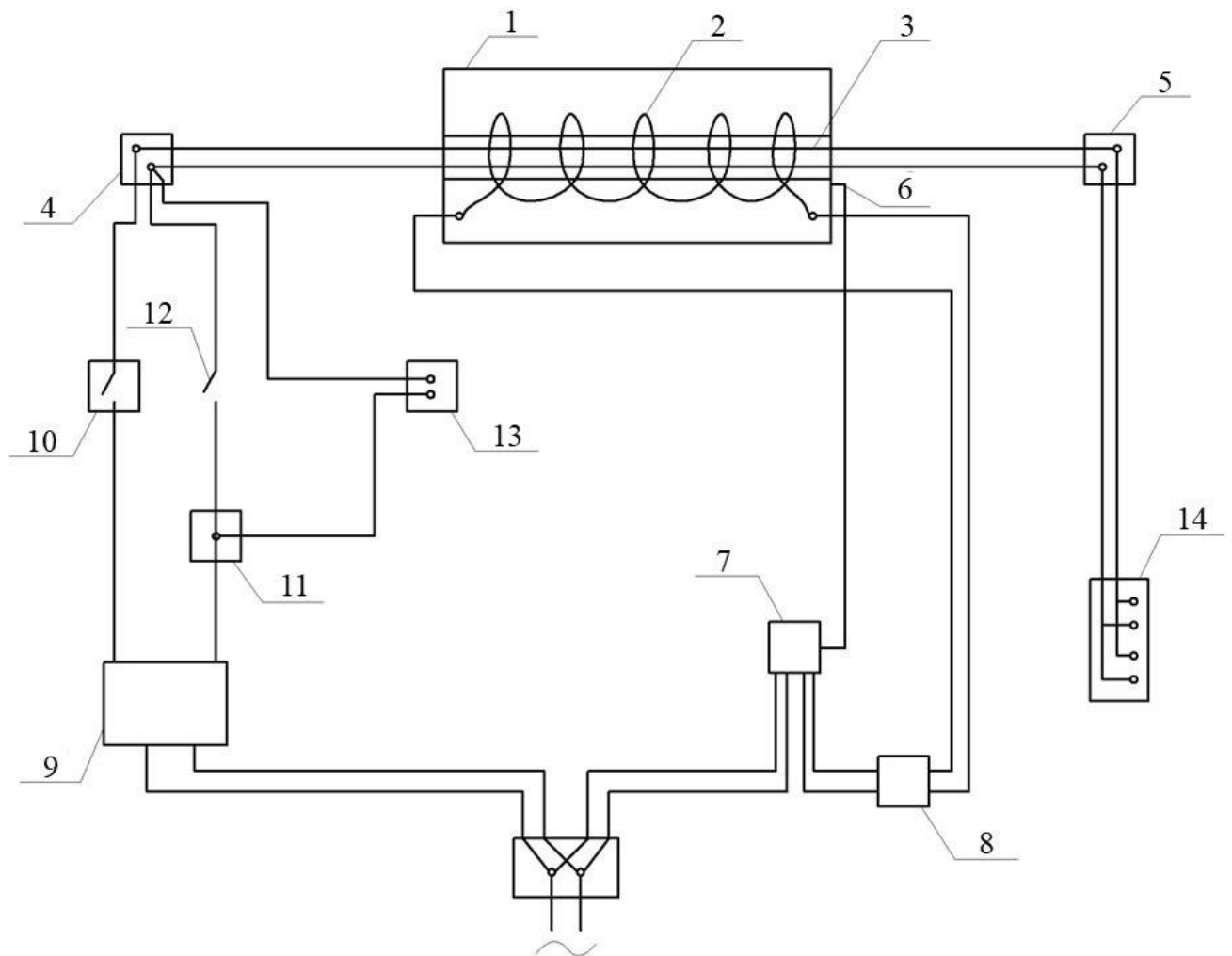
3.5.3. Метод и экспериментальная установка для ускоренного термического состаривания

Для ускоренного термического состаривания кабельных изделий была разработана и введена в эксплуатацию экспериментальная установка с возможностью создания термического воздействия и электрической нагрузки различных уровней на кабельные изделия [101].

Техническим результатом, является создание устройства для ускоренного термического состаривания кабельных изделий с целью адекватной оценки и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий с изоляцией на основе ПВХ.

Технический результат достигается тем, что устройство содержит установленные на общем основании камеру для термостатирования с цилиндрической проходной камерой нагрева для горизонтального размещения образца электрического кабеля, в виде отрезка, и подключения его к электрической цепи, включающей контур управления термостатирующей камерой, содержащий термодатчик, термореле и регулятор мощности, и контур для подключения испытуемого образца, содержащий регулятор напряжения, подсоединенные в параллель автоматический выключатель и переключатель режимов работы, выполненный с возможностью подключения контрольно-измерительного прибора и подключения потребителей электроэнергии, а цепь выполнена с возможностью подключения к источнику переменного тока.

На рисунке 3.31 приведена схема экспериментальной установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий, на рисунке 3.32 – фото экспериментальной установки.



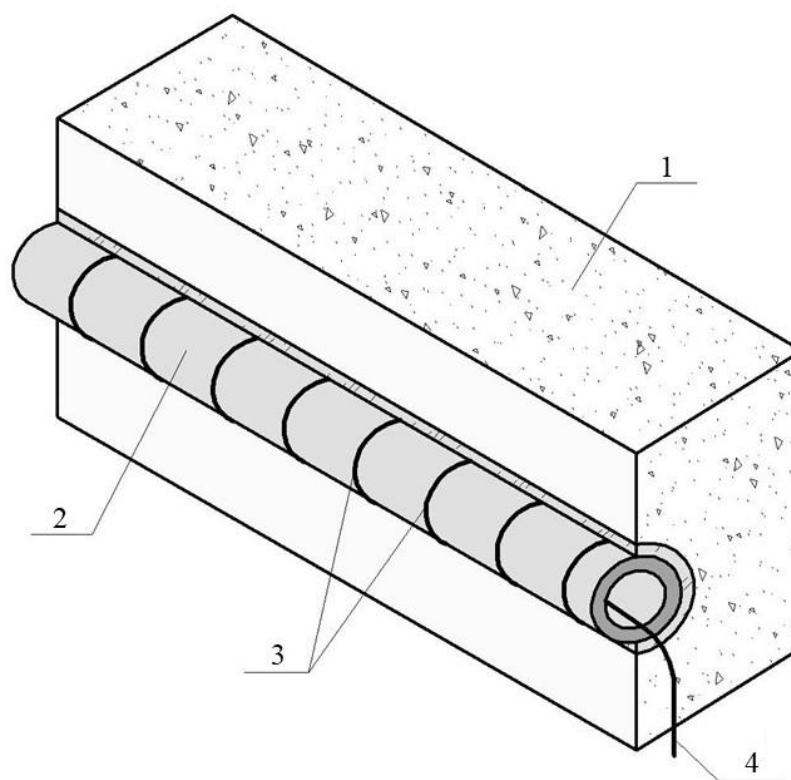
- 1 – камера для термостатирования; 2 – нихромовая спираль; 3 – образец кабельного изделия;
 4, 5, 11 – распределительные колодки с клеммами; 6 – термодатчик; 7 – термореле;
 8 – регулятор мощности; 9 – регулятор напряжения; 10 – автоматический выключатель;
 12 – переключатель режимов работы; 13 – разъем для подключения контрольно-измерительного прибора; 14 – разъем для подключения потребителей электроэнергии

Рисунок 3.31 – Схема установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий



Рисунок 3.32 – Фото экспериментальной установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий

Экспериментальная установка содержит общее основание, на котором установлена камера для термостатирования. На рисунке 3.33 приведена схема камеры для термостатирования в разрезе. Она представляет собой цилиндрическую проходную камеру в виде керамической трубы, с размещенной на её поверхности нихромовой спиралью и помещенную в разъёмный монолитный термоизолирующий корпус. Камера для термостатирования с цилиндрической проходной камерой нагрева предназначена для горизонтального размещения испытуемого образца электрического кабеля, в виде отрезка, и подключения его к клеммам распределительных коробок. Термореле снабжено устройством вывода показаний термодатчика. В качестве термодатчика использовалась термопара.



1 – керамическая труба; 2 – нихромовая спираль; 3 – монолитный термоизолирующий корпус;
4 – образец кабельного изделия

Рисунок 3.33 – Схема камеры для термостатирования в разрезе

Электрическая цепь устройства включает контур управления камерой для термостатирования, содержащий термодатчик, в качестве которого используют термопару, подключенный к термореле, снабженному устройством вывода (например, в виде дисплея) показаний термодатчика, и регулятор мощности, соединенный с концами нихромовой спирали. Электрическая цепь экспериментальной установки включает контур для подключения испытуемого образца, содержащий регулятор напряжения, подсоединенный через автоматический выключатель с первой клеммой распределительной коробки.

Регулятор напряжения последовательно через распределительную коробку и переключатель режимов работы подключен ко второй клемме распределительной коробки в параллель автоматическому выключателю. К распределительной коробке и второй клемме распределительной коробки в параллель переключателю

режимов работы подключен блок с разъёмом для подключения контрольно-измерительного прибора, например, мультиметра или амперметра. С распределительной коробкой соединен блок с разъёмами для подключения потребителей электроэнергии. Электрическая цепь выполнена с возможностью подключения к источнику переменного тока.

Работает устройство следующим образом. Испытуемый образец (отрезок кабельного изделия) располагают внутри камеры для термостатирования, концы испытуемого образца подключают к клеммам распределительных коробок. К разъёмам блока подключают потребителей электроэнергии для создания нагрузки в электрической цепи.

Экспериментальную установку подключают к источнику переменного тока. Регулятор мощности позволяет изменять напряжение в контуре цепи с подключенным испытуемым образцом. Автоматический выключатель обеспечивает отключение питания электрической цепи при аварийном режиме работы. Переключатель режимов работы позволяет переключать устройство между режимами «измерение/штатная работа».

В режиме «измерение» с подключенным к разъёмам блока мультиметром обеспечивается возможность измерения силы тока в цепи. Мощность нагрева камеры для термостатирования нихромовой спиралью устанавливают регулятором мощности, температурный режим в термостатирующей камере по показаниям термодатчика поддерживают и регулируют с помощью термореле.

Ускоренное термическое состаривание испытуемого образца электрического кабеля осуществляется при заданном нагреве в камере для термостатирования, заданной токовой нагрузке и в течение заданного периода времени, так же возможно осуществление указанного процесса при воздействии высоких температур различных значений и вариативной токовой нагрузки.

По результатам испытаний изготовленный экспериментальный образец устройства показал работоспособность предложенной конструкции. Результаты

испытаний устройства в целом подтвердили его эффективность. Получен патент на полезную модель [103].

3.5.4. Методика оценки общей горючести

Анализ данных из открытых источников и результаты исследования выявили потребность в создании методики оценки общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией, которая учитывает термическое старение в условиях длительной эксплуатации [107]. В связи с чем была предложена методика определения предельного кислородного индекса предварительно состаренных образцов при зажигании их снизу.

За основу предлагаемой методики взят стандартный способ определения предельного кислородного индекса, сущность которого заключается в нахождении минимальной концентрации кислорода в потоке кислородно-азотной смеси, при которой наблюдается самостоятельное горение вертикально расположенного образца, зажигаемого сверху, что позволяет проводить сравнительную оценку общей меры горючести полимерных материалов и огнезащитных композиций.

Отличие предлагаемой методики заключается в подготовке и способе зажигания образцов. В качестве образцов отбираются отрезки состаренного кабельного изделия (вместе с токопроводящими жилами) длиной 100 мм. На расстоянии 50 мм от поверхности образца, вступающей в контакт с источником зажигания, наносятся метки. Зажигание производится подведением пламени горелки к нижней горизонтальной поверхности образца, медленно перемещая так, чтобы пламя покрывало ее полностью и не касалось вертикальных поверхностей или граней образца.

На рисунках 3.34 и 3.35 представлен общий вид и схема экспериментальной установки для оценивания общей горючести кабельных изделий [39].

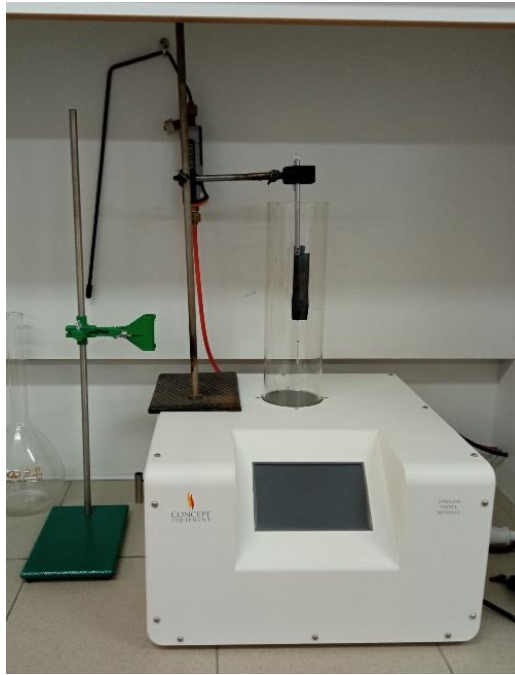
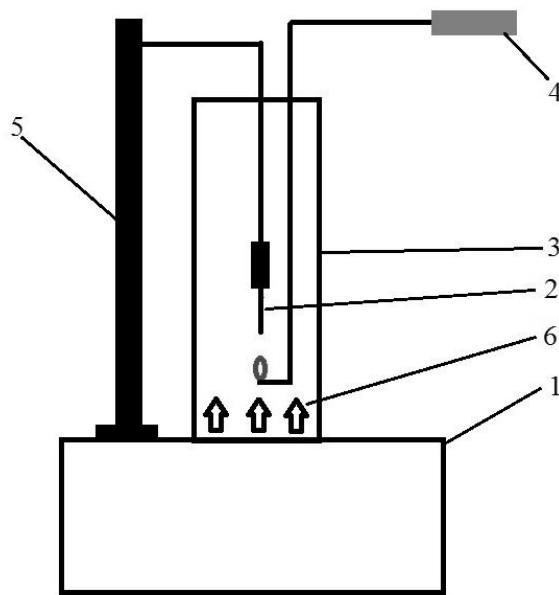


Рисунок 3.34 – Общий вид экспериментальной установки для определения показателя предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу



1 – установка для определения кислородного индекса Oxygen Module Index Concept Equipment;
 2 – образец; 3 – стеклянная колба; 4 – газовая горелка; 5 – держатель образца;
 6 – направление движения кислородно-азотной смеси

Рисунок 3.35 – Схема экспериментальной установки для определения показателя предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу

Положительным считается результат, когда показатель предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу больше концентрации кислорода в атмосфере воздуха по объему, с учетом погрешности метода (0,1 % об.).

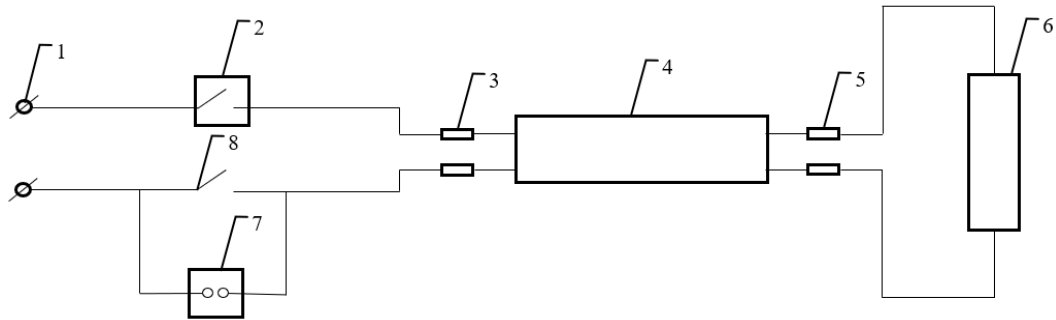
Разработанная методика позволяет проводить оценку общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

3.5.5. Методика оценки электроизоляционных свойств

Проведенный литературный обзор показал необходимость разработки методики оценки электроизоляционных свойств изоляции кабельных изделий, учитывающей термическое старение в условиях длительной эксплуатации.

Наиболее релевантным условиям эксплуатации методом является испытание токовой перегрузкой. На рисунке 3.36 приведена схема экспериментального стенда для испытания кабельных изделий токовой перегрузкой.

Методика заключается в следующем: 10 предварительно состаренных образцов длиной 500 мм подключаются к клеммным колодкам 3 и 5 и подвергаются 1,5-кратной перегрузке в течение 10 минут. Наступление короткого замыкания определяется по срабатыванию автоматического выключателя и визуальным осмотром образцов. Положительным результатом считается отсутствие образцов, потерявших работоспособность, вместе с тем не допускается видимых термических повреждений (потемнение, обугливание и пр.) изоляции образцов.



1 – контакты для подключения к электрической сети; 2 – автоматический выключатель;

3, 5 – клеммные колодки; 4 – исследуемый образец;

6 – электрическая нагрузка; 7 – контакты для подключения амперметра;

8 – переключатель

Рисунок 3.36 – Экспериментальный стенд для испытания кабельных изделий токовой перегрузкой

После испытания 1,5-кратной токовой перегрузкой, при условии сохранения работоспособности кабельного изделия, измеряется ток утечки. Результат считается положительным при значении тока утечки не более 1 мА на 1 кВт мощности потребителя, но не более 10 мА.

Температура окружающей среды должна составлять 20 ± 2 °С, напряжение переменного тока – 220 В, атмосфера – нормальная.

3.6. Выводы по главе 3

На основании результатов статистического анализа установлена весьма высокая и прямая связь между степенью нагрева и потерей массы образцов, т.к. линейный коэффициент корреляции является значимым и равен 0,944.

Доказано, что при термическом воздействии на образцы с температурой до 200 °С процессы термической деструкции носят термофлуктуационный характер.

Установлено, что при термическом старении в условиях длительной эксплуатации количество хлоридных групп в составе материала изоляции снижается в среднем на 33,87 %, а количество полиеновых последовательностей

углерода увеличивается в среднем на 40,64 % за срок службы.

В результате дегидрохлорирования и миграции пластификатора в поверхностный слой изоляции при термической деструкции в условиях эксплуатации показатель предельного кислородного индекса при зажигании снизу уменьшается в среднем на 1,1 % об. за срок службы, что для некоторых образцов приводит к возможности поддержания самостоятельного горения в атмосфере воздуха. Найдено статистически надежное уравнение регрессии, позволяющее оценить взаимосвязи между снижением количества хлоридных групп и повышением общей горючести кабельных изделий в процессе термического старения.

За счет разрыва полимерных цепей, образования полиеновых последовательностей углерода, образования дефектов физико-химической структуры материала ПВХ изоляции происходит снижение ее диэлектрических свойств при термическом старении в условиях эксплуатации. За срок службы сопротивление снижается в среднем на 99,79 %, добротность – на 53,5 %, межпроводная емкость увеличивается в среднем на 55,8 %, вероятность короткого замыкания при двукратной перегрузке возрастает на 36 %. Найдено статистически надежное уравнение регрессии, позволяющее прогнозировать вероятность короткого замыкания для кабельных изделий в условиях эксплуатации по значениям добротности изоляции и спектрального критерия двойной связи углерода ускоренно состаренных образцов.

Установлена высокая и обратная связь между показателем предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу и вероятностью короткого замыкания кабельных изделий с ПВХ изоляцией.

По результатам исследования предложен научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации. Определены релевантные условия и разработана экспериментальная установка для ускоренного термического состаривания кабельных изделий с целью оценки их пожарной

опасности при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

Разработана методика оценки общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией, которая учитывает термическое старение в условиях длительной эксплуатации и условия пожара. Методика основана на определении показателя предельного кислородного индекса предварительно состаренных образцов при зажигании снизу.

Также предложена методика оценки электроизоляционных свойств изоляции кабельных изделий, учитывающая термическое старение в условиях длительной эксплуатации. Методика основана на проведении испытания токовой перегрузкой предварительно состаренных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ оценивания и прогнозирования ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий в течение срока службы, основанный на моделировании ускоренного процесса термического состаривания выпускаемых кабельных изделий.

2. Установлено, что в результате термического старения ПВХ изоляции в течение гарантированного предприятием-изготовителем срока службы кабельного изделия, в полимере происходит снижение содержания хлоридных групп в среднем на 33,87 % при одновременном увеличении на 40,64 % количества полиеновых последовательностей углерода.

3. Показано, что за срок службы электропроводок происходит снижение значения предельного кислородного индекса ПВХ изоляции в среднем на 1,1 %, доказывающее возможность ее облегченного, по сравнению с исходными образцами кабельной продукции, самостоятельного горения в атмосфере воздуха.

4. Получено статистически надежное уравнение регрессии, описывающее взаимосвязь между снижением количества хлоридных групп в материале изоляции и повышением общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией при термическом старении в условиях длительной эксплуатации.

5. Установлено, что при термическом старении кабельных изделий с ПВХ изоляцией в условиях длительной эксплуатации наблюдается снижение сопротивления на 99,79 %, рост диэлектрических потерь на 53,5 %, увеличение межпроводной емкости на 55,8 %, что в итоге приводит к повышению вероятности короткого замыкания (при двукратной токовой перегрузке) на 36 %.

6. Получено статистически надежное уравнение регрессии, позволяющее прогнозировать вероятность возникновения короткого замыкания для кабельных изделий с ПВХ изоляцией по значениям спектрального критерия двойной связи углерода и добротности изоляции ускоренно состаренных образцов.

7. Установлена высокая и обратная связь между показателем предельного

кислородного индекса при зажигании образца снизу и вероятностью короткого замыкания кабельных изделий с ПВХ изоляцией.

8. Предложен научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении, который может быть реализован как на этапе производства кабельной продукции, так и после монтажа электропроводок.

9. Определены релевантные условия ускоренного термического состаривания кабельных изделий (термическое воздействие с $T = 150 \pm 3$ °C; пропускание электрического тока с длительно допустимыми значениями в течение 664 часов), необходимые для оценки изменения их пожарной опасности в процессе эксплуатации.

10. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить ускоренное термическое состаривание кабельных изделий для оценивания изменения их пожарной опасности, обусловленной термическим старением электроизоляционных материалов на протяжении срока службы.

11. Предложена усовершенствованная методика оценки общей горючести кабельных изделий, основанная на определении предельного кислородного индекса, которая заключается в замене свечеобразного поджигания электроизоляционного материала на поджигание нижнего края изделия, когда создаются условия, позволяющие адекватно оценить пожарную опасность.

12. Предложена методика оценки электроизоляционных свойств кабельных изделий, основанная на испытании состаренных образцов токовой перегрузкой и последующем измерении токов утечки, что позволяет определить вероятность возникновения аварийного пожароопасного режима работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности изоляции и оболочек электрокабельной продукции, изготовленной из ПВХ / И. А. Богданов [и др.] // Пожарная и аварийная безопасность : Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-й годовщине образования гражданской обороны. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 31-35.
2. Баранов М. И., Рудаков С. В. Пожарная опасность локального нагрева проводов и кабелей электрических сетей при сверхтоках // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23, № 10. С. 48-54.
3. Барановский Н. К., Романов С. В. Использование полимерных электроизоляционных материалов в электроснабжении // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. 2019. С. 776-780.
4. Барботько С. Л., Вольный О. С. Оценка тепловыделения при горении электрических кабелей // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 11. С. 35-44.
5. Бенинг П. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций. Л. : Госэнергоиздат, 1960. 216 с.
6. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения. М. : Энергоиздат, 1981. 376 с.
7. Богданов И. А., Никифоров А. Л. Разработка нового подхода к оценке влияния термического старения на пожарную опасность ПВХ-изоляции электрокабельных изделий с целью предупреждения пожаров // Сборник трудов Конкурса научно-исследовательских работ 2024 г. : Молодежная программа 28-ой Международной специализированной выставки – форума. Москва : Ассоциация «СИЗ», 2025. С. 11-14.
8. Богданов И. А., Никифоров А. Л., Ульева С. Н. Новый взгляд на обеспечение пожарной безопасности кабельных изделий в условиях эксплуатации // Пожарная и аварийная безопасность : Сборник материалов XIX Международной

научно-практической конференции, посвященной 375-летию пожарной охраны России. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 12-16.

9. Видеомикроскопия электрических и водных триингов / М. Ю. Шувалов [и др.] // Электричество. 1997. № 7. С. 68-74.

10. Влияние эксплуатационного старения кабельных изделий на их пожарную опасность / Г. И. Смелков [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXV Международной научно-практической конференции. Москва : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. С. 389-395.

11. Внутренние механические напряжения в изоляции высоковольтных кабелей и их влияние на электрическую прочность / В. Л. Овсиенко [и др.] // Электротехника. 1999. № 8. С. 28–33.

12. Герасев И. В., Золкина Е. С., Юрковец Н. В. Материалы, применяемые в электромашиностроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1, № 10. С. 187-188.

13. Гончаренко Г. А. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса электропроводки на объектах АПК в условиях неопределенности : автореф. дис. канд. техн. наук. Барнаул, 2013. 24 с.

14. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести / А. А. Берлин [и др.] // Соросовский образовательный журнал. 1996. Т. 2, № 9. С. 57.

15. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил [и др.] М. : Наука, 1972. 294с.

16. ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М. : Стандартиформ, 2006. 100 с.

17. ГОСТ 12423-2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и

испытания образцов (проб). М. : Стандартинформ, 2014. 11 с.

18. ГОСТ 15845-80. Кабельные изделия. Термины и определения. М. : Издательство стандартов, 1986. 27 с.

19. ГОСТ 21793-76. Пластмассы. Метод определения кислородного индекса. М. : Издательство стандартов, 1976. 14 с.

20. ГОСТ 25018-81. Кабели, провода и шнуры. Методы определения механических показателей изоляции и оболочек. М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. 8 с.

21. ГОСТ 28114-89. Кабели. Метод измерения частичных разрядов. М. : Стандартинформ, 2007. 12 с.

22. ГОСТ 31565-2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности. М. : Стандартинформ, 2019. 11 с.

23. ГОСТ 3345-76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции. М. : Издательство стандартов, 1982. 9 с.

24. ГОСТ 5960-72. Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия. М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. 28 с.

25. ГОСТ IEC 60811-401-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Часть 401. Разные испытания. Методы теплового старения. Старение в термостате. М. : Стандартинформ, 2016. 20 с.

26. ГОСТ МЭК 60085-2011. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам. М. : Стандартинформ, 2012. 8 с.

27. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. М. : Стандартинформ, 2011. 23 с.

28. ГОСТ Р МЭК 60331-23-2003. Испытания электрических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. М. : Издательство стандартов, 2003. 9 с.

29. Данилов Д. П., Соколовский Г. И., Авилина Л. М. Судебная пожарно-техническая экспертиза: пособие для экспертов, следователей и судей. ч. II, М. : РФЦСЭ МЮ РФ, 1995. 229 с.
30. Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляции / Б. Г. Набока [и др.] // Электротехника и электромеханика. 2011. № 2. С. 65-69.
31. Ермолин Н. П., Жерихин И. П. Надежность электрических машин. Л. : Энергия, 1976. 248 с.
32. Зыков В. И., Малашенков Г. Н. Моделирование пожарной опасности проводов и кабелей электрических сетей // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 3. С. 45-52.
33. Иерусалимов М. Е., Ильенко О. С., Виноградный А. Н. Оценка соотношения между кажущимся и фактическим зарядами частичных разрядов // Известия вузов. Энергетика. 1982. № 3. С. 113–116.
34. Ильина М. Е., Курочкин И. Н. Разработка полимерной композиции пониженной горючести на основе пластифицированного поливинилхлорида с использованием шламового отхода машиностроительного производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 12-1 (90). С. 65-68.
35. Исследование влияния термической деструкции на срок службы изоляции кабелей / В. Н. Пугач [и др.] // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 70-74.
36. Исследование механизма термоокислительной деструкции ПВХ-изоляции кабельной продукции методом ИК-спектроскопии / И. А. Богданов [и др.] // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 51-55.
37. Исследование термического старения ПВХ-изоляции кабельной продукции методом ИК-спектроскопии / И. А. Богданов [и др.] // Полимерные

материалы пониженной горючести : сборник материалов XI Международной конференции. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 36-39.

38. Исследование фотодеструкции поливинилхлорида методом спектроскопии комбинационного рассеяния света / С. М. Кузнецов [и др.] // Современные проблемы физики и технологий : VIII-я Международная молодежная научная школа-конференция. Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. С. 245-246.

39. К вопросу о разработке нового подхода к оценке влияния термического старения на пожарную опасность ПВХ-изоляции электрокабельных изделий на основе показателя кислородного индекса / И. А. Богданов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 54-60.

40. Каменский М. К. Термическое старение бумажной пропитанной изоляции силовых кабелей // Кабели и провода. 2001. № 5. С. 16–18.

41. Канискин В. А., Костенко Э. М., Таджибаев А. И. Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. 1995. Т. 5. С. 19-23.

42. Канискин В. А., Таджибаев А. И. Определение остаточного ресурса силовых кабелей неразрушающая диагностика // Новости электротехники. 2003. № 2. С. 34-41.

43. Коржов А. В., Сидоров А. И. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6 (10) кВ городских электрических сетей : монография // Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 252 с.

44. Кочкуров И. Н., Орлов А. В. Электроизоляционные материалы // Интеграционные процессы в науке в современных условиях : сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4 частях. Волгоград : Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. С. 78-80.

45. Кунце У. Р., Шведт Г. Основы качественного и количественного

анализа. М. : Мир, 1997. 424 с.

46. Курский Ю. А. Компьютерное моделирование влияния стереоизомерии на термораспад поливинилхлорида // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1997. Т. 39, № 4. С. 685-689.

47. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л. : Энергия, Ленингр. отд-е. 1979. 224 с.

48. Лебедев Г. М. Диагностика изоляции кабельных линий 6-10 кВ методом высокочастотной рефлектометрии // Электрика. 2005. № 5. С. 39-41.

49. Лебедев Г. М., Бахтин Н. А., Брагинский В. И. Определение дефектов изоляции кабельных линий высокочастотным методом контроля // Электрика. 2003. № 7. С. 37-40.

50. Малашенков Г. Н. Пожарная опасность проводов и кабелей в предаварийных режимах работы электрических сетей : автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2007. 23 с.

51. Марков А. В., Власов С. В. Принципы выбора полимерных материалов для изготовления изделий // Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии. 2004. № 6-8. С. 17-19.

52. Математическое моделирование срока службы полимерной изоляции кабелей / Д. А. Поляков [и др.] // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 69-73.

53. Материалы из вторичного ПВХ пониженной горючести / Н. А. Халтуринский [и др.] // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 8 (145). С. 120-124.

54. Механизм инициирования и роста полиеновых последовательностей при термической деструкции поливинилхлорида / С. С. Борисевич [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2005. Т. 47, № 8. С. 1478-1490.

55. Мещанов Г. И. Мировой кабельный рынок и его развитие // Кабели и провода. 2016. № 5. С. 4-9.

56. Минуллин Р. Г., Фардиев И. Ш. Диагностика локационным методом

состояния электрических кабельных линий при их прожиге // Электротехника. 2006. № 6. С. 50-58.

57. Миткевич А. С., Паверман Н. Г., Елагина А. Н. Кабельные композиции на основе полиэтилена и поливинилхлорида. Тенденции развития в России // Кабели и провода. 2007. № 1. С. 3-7.

58. Мусин А. Х. Модель процесса технического обслуживания систем электроснабжения 6-10 кВ городов // Промышленная энергетика. 1998. № 10. С. 20-22.

59. Мусин А. Х., Корхонен В. К. Статистическая модель повреждаемости городских кабельных линий 10 кВ // Промышленная энергетика. 1991. № 8. С. 81-90.

60. Мыльников М.Т. Общая электротехника и пожарная профилактика в электроустановках: учебник для пожарно-технических училищ. М. : Стройиздат, 1985. 311 с.

61. Никитин К. И., Поляков Д. А. Определение срока службы изоляции // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 129-132.

62. Никифоров А. Л. Использование энергии электромагнитных колебаний для интенсификации химико-текстильных процессов и создания на их основе энерго и ресурсосберегающих технологий : дис. д-ра техн. наук. Иваново, 2004. 32 с.

63. Николаев В. Г. Кабели на основе ПВХ пластикаторов: проблемы и решения // Вестник химической промышленности. 2017. № 5 (98). С. 34-40.

64. Новые методы измерения диэлектрических характеристик электроизоляционных материалов / В. В. Костромин [и др.] // Кабели и провода. 2006. № 5. С. 16-22.

65. Об утверждении перечня национальных стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и осуществления

оценки соответствия: Распоряжение Правительства Рос. Федерации от 10.03.2009 № 304-Р // Собрание законодательства Российской Федерации, № 11, 16.03.2009, ст.1363.

66. Особенности пробоя в электрических кабелях с полимерной изоляцией / В. И. Крыштоб [и др.] // Электротехника. 2014. № 5. С. 60-63.

67. Оценка влияния старения полимеров на изменение их пожароопасных свойств / И. А. Богданов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 5-11.

68. Оценка влияния старения полимеров на изменение их пожароопасных свойств / И. А. Богданов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 5-11.

69. Оценка влияния температурных воздействий на пожарную опасность изоляции на основе ПВХ-диэлектриков / И. А. Богданов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 64-70.

70. Оценка влияния термического старения поливинилхлоридной изоляции электрокабельных изделий на вероятность возникновения короткого замыкания / И. А. Богданов [и др.] // Естественные науки и пожаробезопасность : проблемы и перспективы исследований : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 138-142.

71. Оценка влияния эксплуатационного старения теплоизоляции из пенополистирола на обеспечение пожаровзрывобезопасности текстильных предприятий / С. Н. Ульева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 2 (416). С. 310-318.

72. Оценка пожарной опасности электрической изоляции из поливинилхлорида / Е. А. Слободин [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны. Иваново

: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 371-374.

73. Оценка термического старения поливинилхлоридной изоляции электрокабельных изделий гравиметрическим методом / И. А. Богданов [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. С. 23-28.

74. Павлова С. В. Причины пробоя изоляции силовых кабелей // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 6 (29). С. 92-95.

75. Паниковский П. А., Кривоногов П. А., Сафронова И. Г. Аппараты защиты электрооборудования и электрических сетей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 6. С. 85-87.

76. Пожарная безопасность электрических проводок: монография / А. Л. Никифоров, С. Н. Ульева, С. А. Шабунин, И. А. Богданов. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. 88 с.

77. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий : информационно-аналитический сборник. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.

78. Показатели пожарной опасности пластифицированного поливинилхлорида с добавками фосфорсодержащих замедлителей горения / Г. В. Плотникова [и др.] // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2004. № 2. С. 76-80.

79. Полимерные строительные материалы с пониженной пожарной опасностью / В. А. Ушков [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 9. С. 40-42.

80. Поляков Д. А. Математическая модель расчета остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 66-69.

81. Правила устройства электроустановок: 7-е изд. СПб. : Деан, 2008.

1168 с.

82. Применение аналитических микрометодов для контроля качества и оценки состояния изоляции кабелей высокого напряжения / Л. Н. Газизова [и др.] // Кабели и провода. 2000. № 3. С. 17-20.

83. Проблемы нормативного регулирования обеспечения пожарной безопасности кабельной продукции / И. А. Богданов [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 73-76.

84. Разработка научно-обоснованного подхода к оценке влияния термического старения ПВХ-изоляции на пожарную опасность кабельных изделий / И. А. Богданов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 18-24.

85. РД 16. К 00-006-99. Определение показателей долговечности кабелей и проводов с оболочкой (изоляцией) из композиций на основе поливинилхлорида.

86. Редько В. В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий : автореф. дис. д-ра техн. наук. Томск, 2013. 40 с.

87. Рюденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. Л. : Энергия. Ленингр. отделение, 1980. 578 с.

88. Середина М. А. Снижение пожарной опасности полимерных материалов различной химической природы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5 (395). С. 126-132.

89. Ситников В. Ф., Скопинцев В. А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // Электричество. 2007. № 11. С. 9-16.

90. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с.

91. Смелков Г. И., Чешко И. Д., Плотников В. Г. Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 3. С. 121-128.
92. Смирнов К. П. Из опыта определения причин, связанных с эксплуатацией электроустановок. М. : Изд. МКХ РСФСР, 1963. 72 с.
93. Снижение пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией и оболочками из ПВХ материалов / Г. И. Смелков [и др.] // Пожарная безопасность. 2011. № 2. С. 66-72.
94. Снижение пожарной опасности пластифицированного ПВХ / Р. А. Андрианов [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. 2002. № 2. С. 54-57.
95. Структура смесей полимеров на основе поливинилхлорида / К. Р. Хузиахметова [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 3 (61). С. 82-89.
96. Структурные изменения в смесях линейных полимеров в процессе их физического старения / Н. В. Бабкина [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2012. Т. 54, № 2. С. 256-256.
97. Суворин А. В. Современный справочник электрика. Ростов-на-Дону : Феникс, 2014. 510 с.
98. Теория вероятностей и математическая статистика / А. Ф. Долгополова [и др.] // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 11. С. 51-52.
99. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон Российской Федерации: от 22.07.2008 № 123-ФЗ. М. : Кодекс, 2021. 144 с.
100. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниэлс Ч. Поливинилхлорид // пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова. СПб. : Профессия, 2007. 728 с.
101. Ульева С. Н., Богданов И. А., Никифоров А. Л. Установка для моделирования термического старения изоляционных материалов кабельных

изделий // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 2 (55). С. 68-74.

102. Ульева С. Н., Никифоров А. Л., Шабунин С. А. Возможности термических методов анализа при определении пожарной опасности полимерных изоляционных материалов электрокабельных изделий // Современные проблемы гражданской защиты. 2021. № 4 (41). С. 132-139.

103. Устройство подготовки образцов электрических кабелей к испытаниям на общую горючесть : пат. на полезную модель 229217 U1 Рос. Федерация. № 2024119326 ; заявл. 09.07.24 ; опубл. 26.09.2024 , Бюл. № 27. 8 с.

104. Фатоев И. И., Мавланов Б. А., Муродова И. Н. Структура и свойства пластифицированного поливинилхлорида // Пластические массы. 2007. № 11. С. 15-17.

105. Федоров М. М., Лужнев А. И., Боев А. Е. Оценка сроков службы изоляции электрических машин // Научные труды Донецкого национального технического университета. 2011. № 10. С. 180.

106. Хасанов И. Р., Варламкин А. А. Влияние конструкции кабельных проходок на их огнестойкость // Пожарная безопасность. 2019. № 3. С. 57-63.

107. Шабунин С. А., Богданов И. А., Никифоров А. Л. Особенности определения показателя кислородного индекса при оценке пожароопасных свойств // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Иваново. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 534-537.

108. Шалыт Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях // М. : Энергоиздат, 1982. 310 с.

109. Шаталова Т. Б., Шляхтин О. А., Веряева Е. Методы термического анализа // М. : МГУ им. Ломоносова, 2011. 72 с.

110. Шувалов М. Ю. Моделирование процесса старения кабельных диэлектриков на основе данных спектрального анализа // Электричество. 2006. № 2. С. 55-63.

111. Шувалов М. Ю., Овсиенко В. Л., Колосков Д. В. Исследование

надежности силовых кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабели и провода. 2007. № 5. С. 24-36.

112. Шувалов М. Ю., Овсипенко В. Л. Анализ структуры экструдированной изоляции высоковольтных кабелей методом видеомикроскопии // Электричество. 1999. № 7. С. 51-58.

113. Шувалов М. Ю., Ромашкин А. В., Овсиенко В. Л. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. 2000. Т. 5. С. 49-57.

114. Экспрессметод определения ресурса кабелей с полимерной изоляцией / Б. И. Сажин [и др.] // Электричество. 1997. № 7. С. 27-30.

115. Электроизоляционная композиция : пат. 2488608 С1 Рос. Федерация. № 2011154172/05 ; заявл. 29.12.11 ; опубли. 27.07.13, Бюл. № 21. 10 с.

116. Электроизоляционная композиция : пат. 2494125 С2 Рос. Федерация. № 2011154175/05 ; заявл. 29.12.11 ; опубли. 27.09.13, Бюл. № 27. 6 с.

117. Электроизоляционная композиция : пат. 2495890 С1 Рос. Федерация. № 2012108315/05 ; заявл. 05.03.12 ; опубли. 20.10.13, Бюл. № 29. 5 с.

118. Электроизоляционная полимерная композиция : пат. 2501108 С2 Рос. Федерация. № 2012108753/07 ; заявл. 07.03.2012 ; опубли. 10.12.13, Бюл. № 34. 6 с.

119. Электроизоляционный материал : пат. 2629175 С2 Рос. Федерация. № 2015141060 ; заявл. 25.09.15 ; опубли. 25.08.17, Бюл. № 12. 7 с.

120. Энциклопедия полимеров / В. А. Каргин (гл. ред.) [и др.]. М. : Сов. энциклопедия, 1972. 1202 с.

121. Юрченко Е. Ю., Коржов А. В. Использование вероятностно-статистических методов при оценке текущего состояния изоляции кабельных линий // Охрана труда и социальная защита работников: сб. материалов Международной научной конференции. Киев: НТУУ «КПИ», 2008. С. 501-504.

122. Юрченко Е. Ю., Коржов А. В. Статистические показатели надёжности элементов кабельных линий напряжением 6–10 кВ // Современная техника и технологии: материалы XIV международной научно-практической конференции

студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2008. С. 24-28.

123. Яманов С. А., Яманова Л. В. Старение, стойкость и надёжность электрической изоляции. М. : Энергоатомиздат, 1990. С. 61-62.

124. Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system / E. Gulski [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2000. T. 16, № 2. С. 17-25.

125. Analysis by Raman and infrared spectroscopy combined with theoretical studies on the identification of plasticizer in PVC films / V. Ludwig [et al.] // Vibrational Spectroscopy. 2018. T. 98. С. 134-138.

126. Anti-fungal performance and mechanical–morphological properties of PVC and wood/PVC composites under UV-weathering aging and soil-burial exposure / A. Kositchaiyong [et al.] // International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. T. 91. С. 128-137.

127. Assessment of PVC stabilisation using hydrotalcites–Raman spectroscopy and other techniques / M. Gilbert [et al.] // Polymer degradation and stability. 2013. T. 98, № 8. С. 1537-1547.

128. Auzanneau F. Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives // Progress In Electromagnetics Research B. 2013. T. 49. С. 253-279.

129. Boggs S., Densley J. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing // IEEE Electrical insulation magazine. 2000. T. 16, № 5. С. 13-18.

130. Classification of defects in HV components by fractal analysis of PD measurements / E. Gulski [et al.] // Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena-CEIDP'96. IEEE, 1996. T. 2. С. 484-487.

131. Ekelund M., Edin H., Gedde U. W. Long-term performance of poly (vinyl chloride) cables. Part 1: Mechanical and electrical performances // Polymer degradation and stability. 2007. T. 92, № 4. С. 617-629.

132. Electrical treeing behavior at high temperature in XLPE cable insulation samples / X. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.

2015. T. 22, № 5. C. 2841-2851.

133. Emanuelsson V., Simonson M., Gevert T. The effect of accelerated ageing of building wires // *Fire and Materials: An International Journal*. 2007. T. 31, № 5. C. 311-326.

134. Influence of fiber filler on the structure and properties of polyvinyl chloride/acrylonitrile-butadiene-styrene blends / K. R. Khuziakhmetova [et al.] // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2016. № 4. C. 291.

135. Investigation of resistance toward water tree growth in XLPE insulated MV cables produced in the Arabian Gulf region / M. I. Qureshi [et al.] // *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. IEEE, 2008. C. 1195-1198.

136. Ito M., Nagai K. Analysis of degradation mechanism of plasticized PVC under artificial aging conditions // *Polymer Degradation and Stability*. 2007. T. 92, № 2. C. 260-270.

137. Mazzanti G. Life and reliability models for high voltage DC extruded cables // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. T. 33, № 4. C. 42-52.

138. Mazzanti G. Life estimation of HVDC cables under the time-varying electrothermal stress associated with load cycles // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. T. 30, № 2. C. 931-939.

139. Mazzanti G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. T. 16, № 4. C. 1168-1179.

140. Montanari G. C., Mazzanti G., Simoni L. Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2002. T. 9, № 5. C. 730-745.

141. Motori A., Sandrolini F., Montanari G. C. Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models // *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. IEEE, 1988. C. 764-768.

142. On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables / E. Gulski [et

al.] // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation. 2008. T. 15, № 6. C. 1691-1700.

143. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers / J. Deng [et al.] // Optics & Laser Technology. 2001. T. 33, № 5. C. 305-311.

144. Optical sensor film for metribuzin pesticide detection / S. M. Saleh [et al.] // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2020. T. 229. C. 117971.

145. Partial discharge characteristics till breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect / S. Tokunaga [et al.] // Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. IEEE, 2003. T. 3. C. 1206-1209.

146. Partial discharge. VIII. PD testing of solid dielectric cable / J. C. Chan [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1991. T. 7, № 5. C. 9-16.

147. Partial discharge. XVIII. Errors in the location of partial discharges in high voltage solid dielectric cables / F. H. Kreuger [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. T. 9, № 6. C. 15-22.

148. Polyakov D. A., Yurchuk D. A., Nikitin K. I. Cables XLPE-insulation Residual Life Monitoring // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE, 2018. C. 1-4.

149. Pommerenke D., Jobava R., Heinrich R. Numerical simulation of partial discharge propagation in cable joints using the finite difference time domain method // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. T. 18, № 6. C. 6-11.

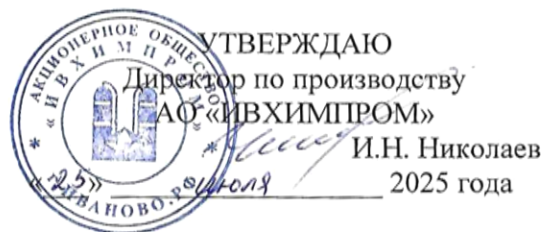
150. Raman spectroscopic detection of polyene-length distribution for high-sensitivity monitoring of photo-and thermal degradation of polyvinylchloride / S. M. Kuznetsov [et al.] // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. T. 252, № 119494. C. 1-8.

151. Space charge behavior of XLPE after long-term aging under temperature gradient and under DC stress / W. Xia [et al.] // Proceedings of the CSEE. 2016. T. 36, № 19. C. 5365-5372.

152. Starnes W. H. Structural and mechanistic aspects of the thermal degradation of poly (vinyl chloride) // Progress in polymer science. 2002. T. 27, № 10. C. 2133-2170.
153. Stone G. C. Partial discharge. XXV. Calibration of PD measurements for motor and generator windings-why it can't be done // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1998. T. 14, № 1. C. 9-12.
154. Study of the electrical properties of ion irradiated polymer materials / A. Kosińska [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2020. T. 388. C. 125562.
155. Studying DEHP migration in plasticized PVC used for blood bags by coupling Raman confocal microscopy to UV spectroscopy / H. Al Salloum [et al.] // Materials Science and Engineering C. 2016. T. 61. C. 56-62.
156. The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns / A. Krivda [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. T. 2, № 5. C. 889-892.
157. Thermal degradation of PVC cable insulation studied by simultaneous TG-FTIR and TG-EGA methods / M. Beneš [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2004. T. 78. C. 621-630.
158. Tüzüm Demir A. P., Ulutan S. Migration of phthalate and non-phthalate plasticizers out of plasticized PVC films into air // Journal of applied polymer science. 2013. T. 128, № 3. C. 1948-1961.
159. Walcott E. E. Partial discharge factory test requirements and in-field partial discharge testing of medium voltage cables // IEEE electrical insulation magazine. 2005. T. 21, № 5. C. 29-30.
160. Wester F. J., Gulski E., Smit J. J. Detection of partial discharges at different AC voltage stresses in power cables // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007. T. 23, № 4. C. 28-43.
161. Yousif E., Hasan A. Photostabilization of poly (vinyl chloride) – Still on the run // Journal of Taibah University for Science. 2015. T. 9, № 4. C. 421-448.
162. Zhou Y., Qin Y., Chappell P. Cost-effective on-line partial discharge of measurements for cables // IEEE electrical insulation magazine. 2006. № 2. C. 31-38.

Приложение 1

Акты о внедрении результатов диссертационного исследования



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Богданова Ильи Андреевича
на тему: «Оценка и прогнозирование ресурса пожаробезопасной
эксплуатации кабельных изделий» в деятельность АО «ИВХИМПРОМ»

Комиссия АО «ИВХИМПРОМ» в составе Начальника ПТО Кудряшова М.Е.; начальника инновационно-технологического центра, кандидата технических наук Н.А. Дементьевой; начальника участка №1 технологического производства Егорова Д.И. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Богданова Ильи Андреевича используются при организации и проведении работ по обеспечению пожарной и электрической безопасности объектов защиты, находящихся в эксплуатации АО «ИВХИМПРОМ».

Председатель комиссии:
Начальник ПТО АО «ИВХИМПРОМ»

М.Е. Кудряшов

Члены комиссии:

Начальник инновационно-технологического центра
АО «ИВХИМПРОМ», кандидат технических наук

Н.А. Дементьева

Начальник участка №1 технологического производства
АО «ИВХИМПРОМ»

Егоров Д.И.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника

Ивановской пожарно-спасательной
академии ГПС МЧС России

по учебной работе

полковник внутренней службы

А.С. Федоринов

2025 года



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Богданова Ильи Андреевича

«Оценка и прогнозирование ресурса пожаробезопасной эксплуатации
кабельных изделий» в образовательный процесс

Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе начальника учебно-научного комплекса «Государственный надзор» полковника внутренней службы кандидата технических наук, доцента Самойлова Д.Б., начальника кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор») полковника внутренней службы кандидата технических наук, доцента Комелькова В.А., начальника кафедры правового обеспечения надзорной деятельности (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор») полковника внутренней службы кандидата технических наук, кандидата педагогических наук, доцента Лазарева А.А., заместителя начальника кафедры государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор») подполковника внутренней службы кандидата химических наук, доцента Таратанова Н.А. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Богданова Ильи Андреевича, а именно экспериментально полученные данные по оценке влияния изменения химического состава и структуры ПВХ изоляции на пожарную опасность кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации, используются при организации и проведении учебных занятий по темам:

т. 3 «Пожарная опасность силового и осветительного оборудования» дисциплины «Пожарная безопасность электроустановок» (направление подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиль «Пожарная безопасность»);

т. 4 «Выбор электрооборудования по условиям технологической среды» дисциплины «Пожарная безопасность электроустановок» (направление подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиль «Пожарная безопасность»);

т. 3 «Основы обеспечения пожарной безопасности электроустановок» дисциплины «Пожарная безопасность электроустановок» (специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность» профиль «Пожарная безопасность государства»);

т. 4 «Пожарная безопасность электроустановок и электрических сетей» дисциплины «Пожарная безопасность электроустановок» (специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность» профиль «Пожарная безопасность государства»);

т. 1 «Основы обеспечения пожарной безопасности электроустановок» дисциплины «Электротехника и пожарная безопасность электроустановок» (специальность 40.05.03 «Судебная экспертиза» специализация «Инженерно-технические экспертизы»);

т. 2 «Пожарная безопасность электроустановок и электрических сетей» дисциплины «Электротехника и пожарная безопасность электроустановок» (специальность 40.05.03 «Судебная экспертиза» специализация «Инженерно-технические экспертизы»);

т. 2 «Основы обеспечения пожарной безопасности электроустановок» дисциплины «Правовое регулирование пожарной безопасности электроустановок» (специальность 40.05.01 Правовое обеспечение национальной безопасности специализация «Уголовно-правовая»).

Председатель комиссии:

Начальник УНК «Государственный надзор»

кандидат технических наук, доцент

полковник внутренней службы

 Д.Б. Самойлов

Приложение 2

«Устройство подготовки образцов электрических кабелей
к испытаниям на общую горючесть»Свидетельство о государственной регистрации
патента на полезную модель №229217