

На правах рукописи



Богданов Илья Андреевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА
ПОЖАРОБЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

2.10.1. Пожарная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Научный руководитель: **Никифоров Александр Леонидович**

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Назарычев Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры электроэнергетики и электромеханики
Санкт-Петербургского горного университета

Варламкин Андрей Александрович

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского сектора кабельных изделий и силового электрооборудования отдела пожарной безопасности электрических изделий ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева»

Защита состоится 04 декабря 2025 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 04.2.005.02 на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по адресу: 153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33, ауд. 1101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России: <https://www.edufire37.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 04.2.005.02
кандидат технических наук, доцент

Колбашов Михаил Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Увеличение количества электрических бытовых приборов, используемых 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. 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 проводов 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.

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 пластика, учитывающие термическое старение кабельных изделий в условиях длительной эксплуатации.

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

Научная новизна:

- 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.

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.

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.

При решении поставленных задач 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.

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.

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

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).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, выносимых на защиту.

В первой главе «Анализ проблем обеспечения пожарной безопасности кабельных изделий» на основании научных данных, представленных в открытой печати: проанализированы статистические данные по пожарам, вызванным электротехническими причинами; проведен обзор кабельных изделий; рассмотрены физико-химические свойства и строение пластика на основе ПВХ, влияющие на его пожарную опасность; оценены процессы старения изоляции кабельных изделий в условиях эксплуатации; проведен обзор нормативного правового регулирования оценки влияния эксплуатационного старения на пожарную опасность кабельных изделий; рассмотрены подходы к прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации кабельных изделий.

Во второй главе «Методика и техника экспериментального исследования» представлена характеристика выборки образцов кабельных изделий для проведения исследования и описаны методики получения экспериментальных данных.

Для проведения исследования было отобрано 5 видов образцов кабельных изделий, основные сведения по которым приведены в таблице 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.

Таблица 1 – Характеристика образцов исследования

№ образца	Маркировка	Материал токопроводящей жилы	Кабель/ провод/ шнур	Материал изоляции	Материал оболочки	Количество жил	Сечение жил, мм
1	АПТВ 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

Для оценки деструктивных процессов, происходящих при термическом старении ПВХ изоляции кабельных изделий, была разработана методика ускоренного термического состаривания. Методом гравиметрического анализа определялись относительные значения потери массы и скорости потери массы при термическом воздействии разной интенсивности.

Методом термогравиметрического анализа определялась температура, при которой начинают происходить интенсивные процессы изменения химического состава в результате термической деструкции, а также оценивался характер процессов 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 и вероятности короткого замыкания (КЗ).

В третьей главе «Экспериментальные результаты и их обсуждение» обобщены и проанализированы основные результаты исследования. Гравиметрическим анализом было установлено, что с увеличением степени нагрева исследуемых образцов изоляции процент потери массы повышается. Опираясь на данные литературных источников и на полученные экспериментальные данные, были сделаны предположения о характере процессов деструкции, протекающих при термическом воздействии разной интенсивности. Корреляционным анализом определена весьма высокая и прямая связь между степенью нагрева и потерей массы образцов (линейный коэффициент корреляции является значимым и равен 0,944).

Для определения температуры, 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 1.

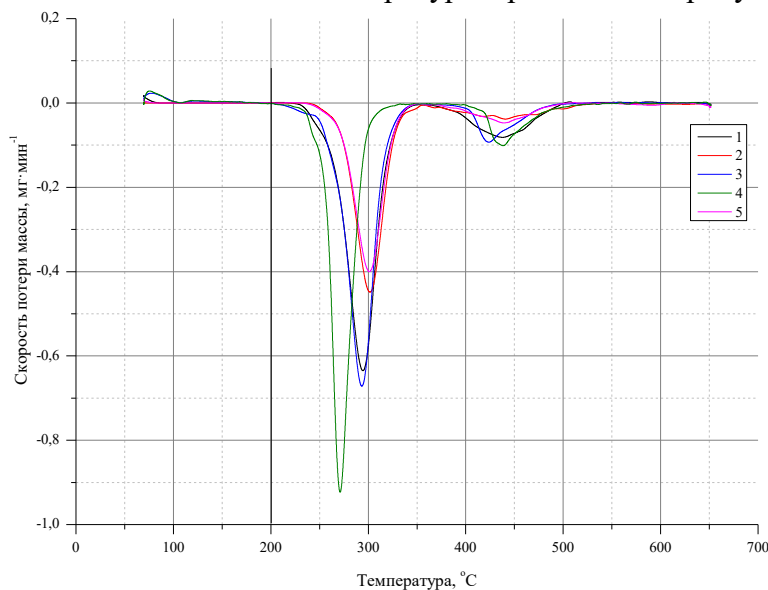
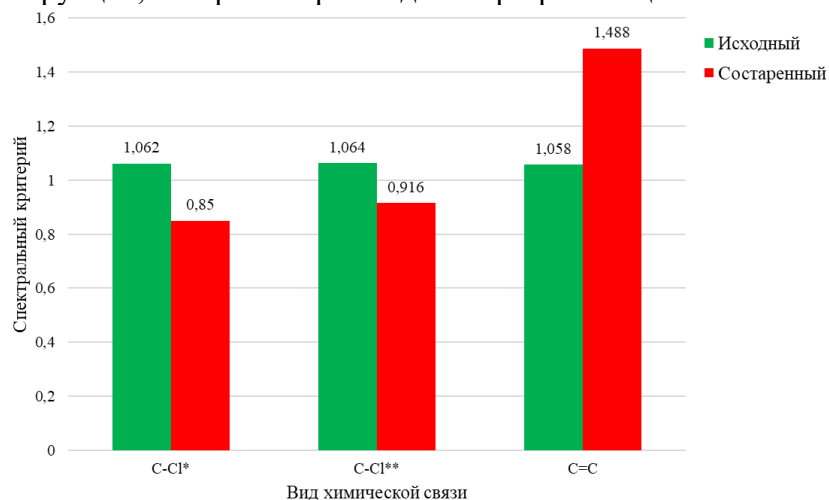


Рисунок 1 – Зависимость скорости потери массы образцов изоляции кабельных изделий от температуры

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.



* - волновое число – 607 см⁻¹; ** - волновое число – 688 см⁻¹

Рисунок 2 – Значения среднего выборочного спектрального критерия рассматриваемых химических связей для всех видов образцов

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

Для количественной и качественной оценки изменений химического состава изоляции образцов были проведены исследования методом инфракрасной спектроскопии. На рисунке 2 приведены значения среднего выборочного спектрального критерия химических связей C-Cl и C=C 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 %.

Оценка влияния термического старения на общую горючесть ПВХ изоляции кабельных изделий была проведена на основании экспериментальных данных, полученных методом определения предельного кислородного индекса. Методика оценки общей горючести изоляции кабельных изделий должна 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 приведены результаты эксперимента по оценке влияния способа зажигания образца на значение предельного кислородного индекса ПВХ изоляции кабельных изделий.

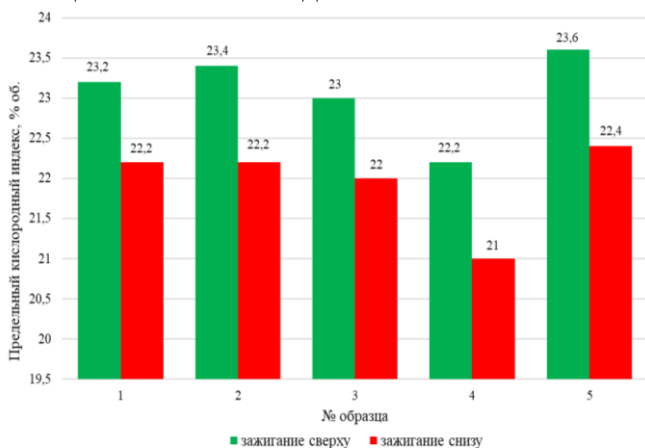


Рисунок 3 – Значения показателя предельного кислородного индекса для исходных образцов при различном способе зажигания

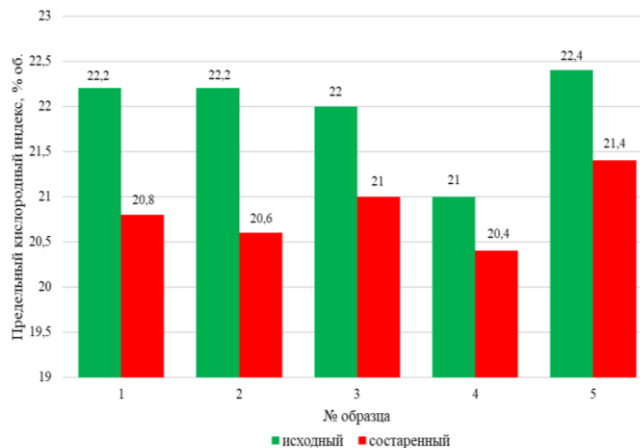


Рисунок 4 – Значения показателя предельного кислородного индекса для исходных и состаренных образцов при зажигании образцов снизу

Установлено, что при зажигании образцов снизу средний показатель предельного кислородного индекса на 1,8 % ниже, чем при зажигании сверху. Согласно методике ГОСТ 12.1.044-89 сходимость метода не должна превышать 0,5 % об., что позволяет говорить о влиянии способа зажигания образца на показатель предельного кислородного индекса. На рисунке 4 приведены значения 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 при условиях эксплуатации. 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.

Для оценки влияния термического старения на электроизоляционные свойства ПВХ изоляции кабельных изделий были проведены исследования методами: определения электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь и межпроводной емкости. При измерении тангенса угла диэлектрических потерь, установлено, что для всех видов образцов частотой электрического тока, на которой значения диэлектрических потерь в исследуемом

диапазоне максимальны, является частота 35000 кГц. На рисунке 5 приведена добротность изоляции исходных и состаренных образцов на данной частоте электрического тока.

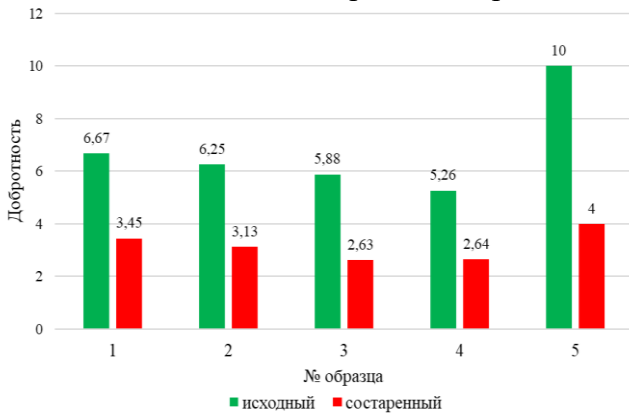


Рисунок 5 – Добротность изоляции исходных и состаренных образцов на частоте электрического тока 35000 кГц

снизилось с 10 ГОм до 25, 37 и 43 МОм соответственно, что отвечает действующим нормам. В среднем сопротивление изоляции образцов снизилось на 99,79 %. О снижении электроизоляционных свойств в результате термического старения свидетельствуют также экспериментальные данные по измерению межпроводной емкости исходных и состаренных образцов. Емкость образцов в результате термического старения увеличилась в среднем на 55,8 %.

Ключевым параметром, по которому можно оценить возможность возникновения пожароопасного аварийного режима работы кабельного изделия, является вероятность короткого замыкания. На рисунках 6 и 7 представлены средние выборочные значения вероятности и времени наступления короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий.

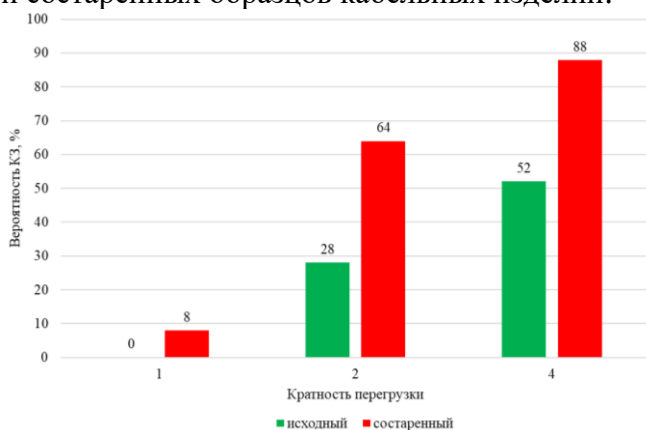


Рисунок 6 – Средние выборочные значения вероятности короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий

Все исходные образцы выдержали испытания электрическим током с длительно допустимыми значениями силы тока 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 электрическим током с длительно допустимыми значениями силы тока не выдержал образец 4 с вероятностью 40 %. При двукратной токовой перегрузке на всех образцах произошло короткое замыкание со средней

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 %.

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 опасность дальнейшей эксплуатации кабельных изделий. Сопротивление изоляции образцов 1, 2 и 5 в результате термического старения

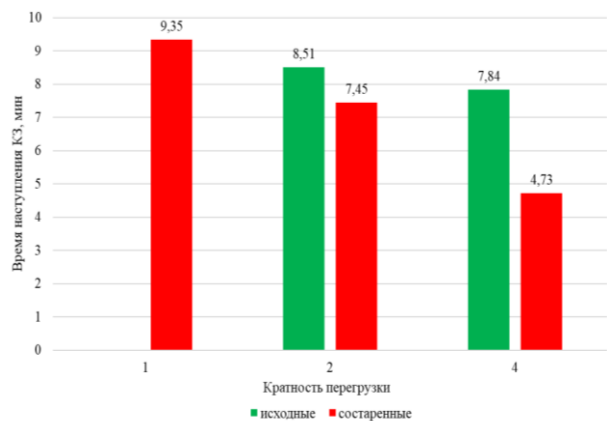


Рисунок 7 – Средние выборочные значения времени наступления короткого замыкания при различных уровнях токовой нагрузки исходных и состаренных образцов кабельных изделий

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 состаренных образцов по сравнению с исходными.

Для оценки взаимосвязи между процессами термического старения, снижения количества хлоридных групп и повышением общей горючести кабельных изделий был проведен статистический анализ экспериментальных данных и найдено уравнение регрессии:

$$y = 20,1967 + 0,9596x_1 + 0,7568x_2, \quad (1)$$

где x_1 , x_2 – значения факторных признаков (состояние образца и спектральный критерий связи C-Cl соответственно); y – значения результирующего признака (общая горючесть).

По результатам статистического анализа можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на общую горючесть оказывает состояние образца (исходный/состаренный). Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 65,34 % общей вариативности горючести объясняется изменением состояния образца и спектрального критерия связи C-Cl. Таким образом, доказано, что снижение количества хлоридных групп в составе материала ПВХ изоляции при термическом старении влияет на общую горючесть кабельных изделий.

Для оценки взаимосвязи между вероятностью короткого замыкания, добротностью изоляции и количеством полиеновых последовательностей углерода в ее составе был проведен статистический анализ экспериментальных данных. Для состаренных образцов оценку уровня регрессии осуществляли по уравнению:

$$y = 275,5489 + 77,1894x_1 + 21,7538x_2, \quad (2)$$

где x_1 , x_2 – значения факторных признаков (добротность изоляции и спектральный критерий связи C=C соответственно); y – значения результирующего признака (вероятность КЗ при двукратной токовой перегрузке).

В результате статистического анализа установлено, что коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно. В исследуемой ситуации 99,15 % общей вариативности вероятности короткого замыкания при двукратной токовой перегрузке объясняется изменением факторных признаков. 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, которым установлена высокая и обратная связь между показателем предельного кислородного индекса ПВХ изоляции кабельных изделий и вероятностью короткого замыкания (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.

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 8 представлена схема миграции пластификатора в поверхностный слой материала изоляции и разрыва полимерной цепи при термическом старении в условиях длительной эксплуатации, которые сопряжены со способами прокладки

электропроводок, препятствующими испарению пластификатора (закрытые способы, а также в гофротрубе, кабель-канале, лотке и пр.).

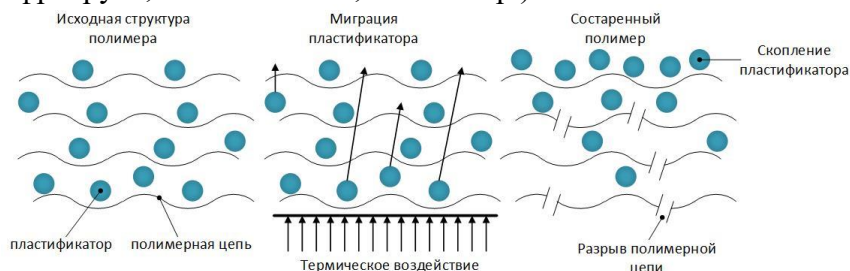


Рисунок 8 – Миграция пластификатора в поверхностный слой материала изоляции кабельного изделия в условиях термического старения

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. В настоящей диссертационной работе рассматривается реализация подхода при производстве кабельных изделий.

Как показали исследования, релевантной методикой определения общей горючести изоляции кабельного изделия является методика определения предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу. Для оценки электроизоляционных свойств изоляции наиболее подходящей является методика испытания токовой перегрузкой. Предлагаемый научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации схематично изображен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Предлагаемый научно обоснованный подход к определению ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации

В рамках реализации данного подхода были определены релевантные условия ускоренного термического состаривания кабельных изделий. Для материалов одного класса нагревостойкости срок ускоренного термического состаривания τ может быть определен по уравнению:

$$\tau = \tau_0 \exp \left(-B \frac{\Delta T}{T + 273} \right), \quad (3)$$

где τ_0 – срок службы изоляции при допустимой температуре T_0 , ч; B – безразмерный коэффициент, постоянный для материалов одного класса нагревостойкости; $\Delta T = T - T_0$ – превышение температуры нагрева изоляции над допустимой температурой, °C.

Уравнение 3 может быть применено для определения релевантных условий ускоренного термического состаривания кабельных изделий с ПВХ изоляцией, если температура ускоренного

На основании полученных данных, можно сделать вывод, что при оценке ресурса пожаробезопасной эксплуатации кабельных изделий при термическом старении в условиях длительной эксплуатации необходимо учитывать влияние процессов термической деструкции на

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.

термического состаривания не превышает температуры начала химических реакций деструкции, не носящих термофлуктуационный характер; а также – размягчения и плавления материала изоляции. На рисунке 10 приведена зависимость продолжительности ускоренного термического состаривания ПВХ изоляции кабельного изделия от температуры.

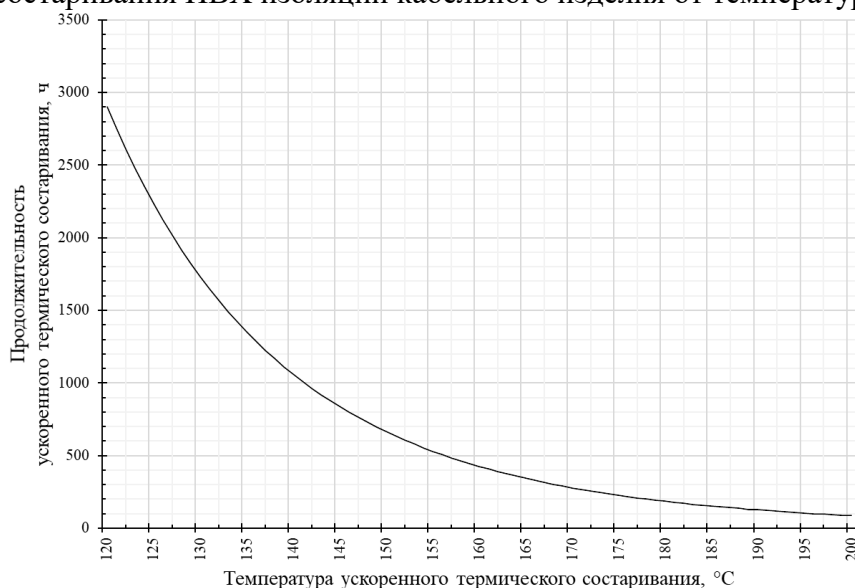
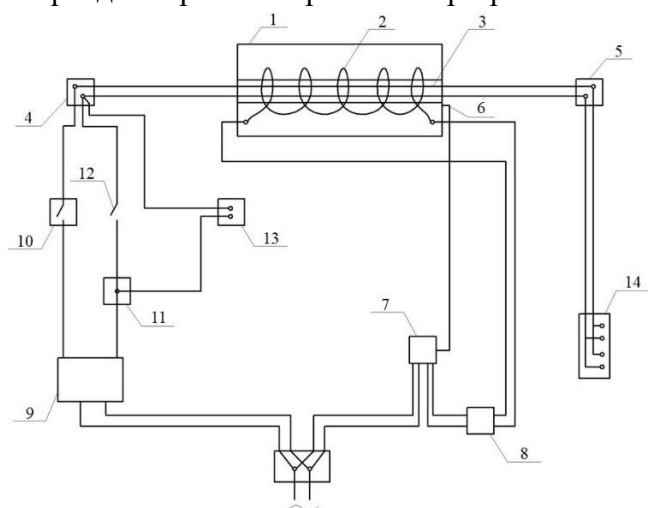


Рисунок 10 – Зависимость продолжительности ускоренного термического состаривания ПВХ изоляции кабельного изделия от температуры

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

основании вышеизложенного: 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 длительном значении температуры нагрева токопроводящих жил.

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. На рисунке 11 приведена схема экспериментальной установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий, на рисунке 12 – фото экспериментальной установки, на рисунке 13 – схема камеры для термостатирования в разрезе.



- 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

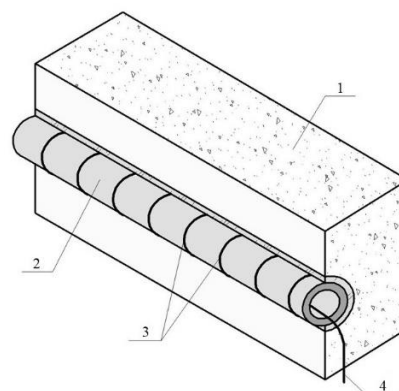
Рисунок 11 – Схема установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий

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.



Рисунок 12 – Фото экспериментальной установки для ускоренного термического состаривания кабельных изделий



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

Рисунок 13 – Схема камеры для термостатирования в разрезе

Анализ данных из открытых источников и результаты исследования выявили потребность в создании новой методики оценки общей горючести кабельных изделий с ПВХ изоляцией, которая учитывает термическое старение в условиях длительной эксплуатации. 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. Для возможности реализации предлагаемой методики была доработана установка для определения кислородного индекса. На рисунках 14 и 15 представлен общий вид и схема экспериментальной установки для оценивания общей горючести кабельных изделий.

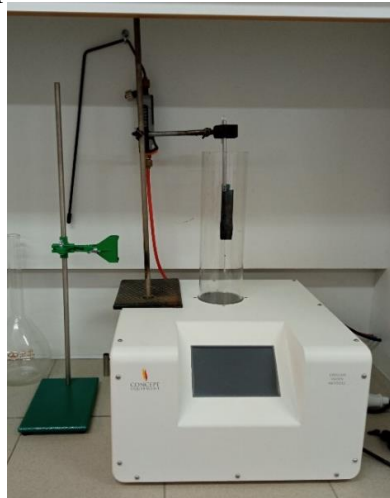
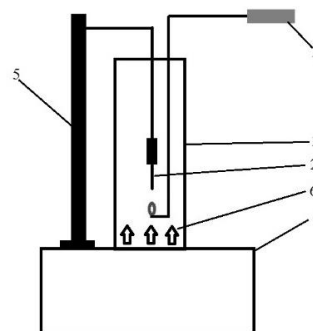


Рисунок 14 – Общий вид экспериментальной установки для определения показателя предельного кислородного индекса при зажигании образца снизу



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

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. 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.

Проведенный литературный обзор и результаты настоящего исследования выявили необходимость разработки методики оценки электроизоляционных свойств изоляции кабельных изделий, учитывающей термическое старение в условиях длительной эксплуатации. Наиболее релевантной условиям эксплуатации методикой является испытание токовой перегрузкой. На рисунке 16 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.

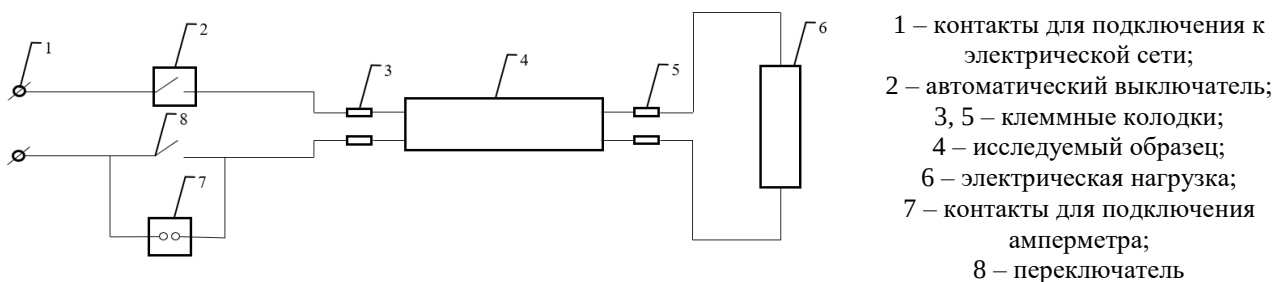


Рисунок 16 – Экспериментальный стенд
для испытания кабельных изделий токовой перегрузкой

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.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. 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**, С. А. Шабунин, С. Н. Ульева, А. Л. Никифоров // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 54-60.

3. Разработка научно-обоснованного подхода к оценке влияния термического старения ПВХ-изоляции на пожарную опасность кабельных изделий / **И. А. Богданов**, С. А. Шабунин, С. Н. Ульева, А. Л. Никифоров // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 18-24.

4. Оценка влияния старения полимеров на изменение их пожароопасных свойств / **И. А. Богданов**, С. Н. Ульева, А. Л. Никифоров, А. А. Краснов // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 5-11.

5. 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.

Научные публикации в изданиях, входящих в международные системы цитирования

6. Оценка влияния эксплуатационного старения теплоизоляции из пенополистирола на обеспечение пожаровзрывобезопасности текстильных предприятий / С. Н. Ульяева, А. Л. Никифоров, **И. А. Богданов**, А. А. Краснов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 2 (416). С. 310-318.

Монографии

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

Патенты и свидетельства

8. 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.

Публикации в иных научных изданиях

9. Оценка пожарной опасности электрической изоляции из поливинилхлорида / Е. А. Слободин, **И. А. Богданов**, С. Н. Ульяева, А. Л. Никифоров // 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.

10. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности изоляции и оболочек электрокабельной продукции, изготовленной из ПВХ / **И. А. Богданов**, С. А. Шабунин, А. Л. Никифоров, С. Н. Ульяева // 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.

11. Проблемы нормативного регулирования обеспечения пожарной безопасности кабельной продукции / **И. А. Богданов**, С. Н. Ульяева, С. А. Шабунин, А. Л. Никифоров // 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.

12. 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.

13. Исследование механизма термоокислительной деструкции ПВХ-изоляции кабельной продукции методом ИК-спектроскопии / **И. А. Богданов**, С. А. Шабунин, А. А. Кочетова [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.

14. Исследование термического старения ПВХ-изоляции кабельной продукции методом ИК-спектроскопии / **И. А. Богданов**, С. А. Шабунин, А. А. Кочетова [и др.] // Полимерные материалы пониженной горючести : Сборник материалов XI Международной конференции. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 36-39.

15. Оценка термического старения поливинилхлоридной изоляции электрокабельных изделий гравиметрическим методом / **И. А. Богданов**, С. Н. Ульяева, С. А. Шабунин, А. Л. Никифоров // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 23-28.

16. Оценка влияния термического старения поливинилхлоридной изоляции электрокабельных изделий на вероятность возникновения короткого замыкания / **И. А. Богданов**, С. А. Шабунин, А. С. Митрофанов, А. Л. Никифоров // 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.

17. **Богданов И. А.**, Никифоров А. Л., Ульяева 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.

18. **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.