

На правах рукописи



Фрик Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ КАБЕЛЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕЗГАЛОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 05.09.02 – «Электротехнические материалы и изделия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»).

Научный руководитель: **Шувалов Михаил Юрьевич**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заведующий отделением «Кабели и
провода энергетического назначения»
ОАО «ВНИИКП»

Официальные оппоненты: **Сытников Виктор Евгеньевич**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заместитель научного руководителя
АО «Научно-технический центр Федеральной
сетевой компании Единой энергетической
системы»

Крупенин Николай Владимирович
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, заместитель директора ФГУП
«Всероссийский электротехнический институт
им. В.И. Ленина»

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России»

Защита диссертации состоится 05 октября 2016 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 520.026.02 при Открытом акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»), 111024, Москва, ш. Энтузиастов, д.5, ауд. 908.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «ВНИИКП» и на сайте: http://vniikp.ru/files/Dissertaciya_Frik.pdf.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 520.026.02, к.т.н.

 И.А. Овчинникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с расширением применения электронной аппаратуры и микропроцессорной техники и высокой насыщенностью кабельных коммуникаций кабелями различного функционального назначения увеличилась вероятность повреждения электронных систем и оборудования коррозионноактивными газообразными продуктами, образующимися при горении кабелей общепромышленного исполнения. Выделяющиеся в случае возникновения пожара газы галогеновых кислот могут привести также и к повреждению несущих металлоконструкций, увеличивая вторичный ущерб от пожара. В этой связи создание пожаробезопасных силовых и контрольных кабелей, не распространяющих горение, на основе безгалогенных полимерных композиций, не выделяющих при горении коррозионно-активных газов, является актуальной задачей.

Цель работы: Выполнить комплекс исследований, направленных на создание пожаробезопасных кабелей с повышенными характеристиками пожарной безопасности, в том числе сохраняющих работоспособность при пожаре (огнестойких), на основе полимерных композиций, не содержащих галогенов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить исследования высоконаполненных полимерных безгалогенных материалов в реальных условиях их горения (пламенное горение в атмосфере воздуха при воздействии внешнего теплового потока) для оценки показателей пожарной опасности и на основе результатов исследования осуществить выбор материалов для конструирования кабелей пожаробезопасного исполнения.

2. Для исследования закономерностей процесса горения высоконаполненных полимерных композиций, не содержащих галогенов, разработать модель горения этого типа материалов для выработки рекомендаций по конструированию пожаробезопасных кабелей.

3. Исследовать механизм пробоя изоляционной системы огнестойких кабелей на основе поливинилхлоридных (ПВХ) пластикатов пониженной пожарной опасности и кабелей на основе полимерных композиций, не содержащих галогенов, при воздействии пламени с целью обоснования выбора типа полимерных композиций для изоляции огнестойких кабелей с термическим барьером из слюдосодержащих лент.

4. На основании результатов исследований разработать усовершенствованные конструкции силовых кабелей на основе полимерных композиций, не содержащих галогенов, на низкое и среднее напряжение, удовлетворяющих полному комплексу современных требований по пожарной безопасности.

5. На основании выбора типа полимерных композиций для изоляции огнестойких кабелей с термическим барьером из слюдосодержащих лент разработать силовые огнестойкие кабели, в том числе на среднее напряжение, удовлетворяющие полному комплексу современных требований пожарной безопасности и сохраняющих работоспособность в условиях воздействия пламени при дополнительных ударных механических воздействиях (для кабелей на напряжение до 1 кВ).

6. Исследовать влияние пламени и одновременных механических ударных нагрузок на функционирование кабелей с термическим барьером из керамиكوобразующих кремнийорганических резин и выработать рекомендации по применению тех или иных типов огнестойких кабелей в зависимости от назначения кабеля и области применения.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель физико-химических процессов, происходящих в полимерном материале, не содержащем галогенов, под воздействием пламени, учитывающая нестационарный нагрев материала и его терморазложение (пиролиз), сопровождающееся уменьшением массы образца.

2. Исследован механизм пробоя изоляционной системы огнестойких кабелей с термическим барьером из стеклослюдосодержащих лент и полимерной изоляцией и выработаны рекомендации по конструированию огнестойких кабелей как на низкое напряжение, так и на напряжение до 10 кВ.

3. Методом кон-калориметрии выполнены исследования по оценке пожароопасных характеристик высоконаполненных безгалогенных полимерных материалов в условиях их пламенного горения, аналогичных условиям горения материалов в составе кабельного изделия.

4. Разработана методология оценки показателя нераспространения горения на стадии конструирования пожаробезопасных кабелей на основе рассчитываемого по характеристикам материалов, определенных методом кон-калориметрии, Индекса распространения пламени.

Практическая ценность заключается в следующем:

1. Показана возможность использования разработанной математической модели для осуществления рационального выбора материалов для целей конструирования пожаробезопасных кабелей. Описанный подход целесообразно также применять на стадии разработки новых материалов, когда

есть необходимость анализировать поведение при горении большого числа экспериментальных рецептур.

2. Экспериментально определенные методом кон-калориметрии показатели пожарной опасности полимерных материалов использованы для целей конструирования кабельных изделий различного функционального назначения.

3. Предложенный метод оценки применимости полимерных материалов в конструкциях пожаробезопасных кабелей может быть использован для оценки применения новых безгалогенных материалов при замене полимерных материалов в имеющихся конструкциях кабелей.

4. Предложены основные пути реализации требования по огнестойкости кабелей с полимерной изоляцией, в т.ч. кабелей среднего напряжения.

5. Выработаны рекомендации для применения огнестойких кабелей с изоляцией из керамикообразующих кремнийорганических резин, а также обоснована необходимость проведения испытаний таких кабелей на огнестойкость с одновременным воздействием ударных механических нагрузок при оценке возможности их функционирования при пожаре.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы математического моделирования и экспериментальные методы исследования.

Реализация и внедрение результатов исследований:

1. Создана серия пожаробезопасных кабелей, не распространяющих горение, на базе полимерных композиций, не содержащих галогенов, исполнения «нг(А)-HF» и огнестойких исполнения «нг(А)-FRHF». Технические требования и конструктивные исполнения кабелей включены в межгосударственный стандарт ГОСТ 31996-2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия». Промышленное производство освоено более чем на 20 кабельных заводах НП «Ассоциации «Электрокабель».

2. Создана серия кабелей на напряжение 6 и 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), не распространяющих горение, на базе полимерных композиций, не содержащих галогенов, сохраняющих функционирование при воздействии пламени и предназначенных для использования в метрополитене и на Объектах использования атомной энергии. Промышленное производство освоено на ОАО «Иркутсккабель».

3. Создана серия огнестойких кабелей на напряжение до 1 кВ, не распространяющих горение, с изоляцией из керамикообразующей кремнийорганической резины и оболочкой из полимерной композиции, не содержащей галогенов, сохраняющих работоспособность в пламени с

одновременным воздействием ударных механических нагрузок. Промышленное производство освоено на ОАО «Электрокабель «Кольчугинский завод».

Основные положения, представляемые к защите:

1. Математическая модель физико-химических процессов, происходящих в полимерном материале, не содержащем галогенов, под воздействием пламени.

2. Разработка на основе анализа показателей пожарной опасности полимерных материалов, определенных методом кон-калориметрии, Индекса распространения пламени, применяемого для конструирования пожаробезопасных кабелей.

3. Результаты исследований механизма пробоя изоляционной системы огнестойких кабелей с термическим барьером из стеклослюдосодержащих лент и полимерной изоляцией.

4. Усовершенствованные конструкции пожаробезопасных силовых кабелей на низкое и среднее напряжение, не распространяющих горение, в т.ч. огнестойких, на основе полимерных композиций, не содержащих галогенов.

5. Результаты испытаний разработанных конструкций кабелей.

6. Рекомендации по применению различных типов огнестойких кабелей в зависимости от назначения кабеля и области применения.

Достоверность. Проведена апробация разработанной математической модели физико-химических процессов, происходящих в полимерном безгалогенном материале (как в материале для наружной оболочки, так и более сложном по составу материале для внутренней оболочки) под воздействием пламени, путём сравнения результатов вычислений с данными измерений, осуществленных средствами кон-калориметрии, показавшая, что модель обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Достоверность результатов исследований материалов методом кон-калориметрии и эффективность применения разработанного индекса распространения пламени для целей конструирования пожаробезопасных кабельных изделий подтверждена результатами испытаний разработанных конструкций кабелей.

Личный вклад автора состоял в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в анализе и обобщении полученных результатов, разработке критериев конструирования и конструкций кабелей.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. V Международной конференции «Электротехнические материалы и компоненты». Украина, Алушта, 2004.

2. XIV Международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». Украина, Алушта, 2012.

3. Jicable'15. 9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France. 2015.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ (из которых 5 в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК РФ) и получены в соавторстве 15 патентов на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка литературы из 129 наименований. Материал изложен на 163 страницах текста и иллюстрирован 60 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе проведен аналитический обзор требований и методов испытаний материалов и кабелей по показателям пожарной опасности. Показана значимость характеристик, определяемых современным общепризнанным методом кон-калориметрии по стандарту ISO 5660-1, среди которых наиболее важными являются скорость тепловыделения и скорость потери массы при горении. На основе анализа методов испытаний кабелей показана необходимость проводить оценку огнестойкости кабелей по методам ГОСТ IEC 60331 ч.1 и 2, предусматривающим воздействие ударных механических нагрузок одновременно с воздействием пламени, как отражающим реальные условия горения кабельных коммуникаций.

Рассмотрены известные технические решения в области конструирования трех типов кабелей с улучшенными характеристиками пожарной безопасности: кабелей на основе ПВХ пластикуатов пониженной пожарной опасности (исполнение «нг(A)-LS»), при горении которых выделяется HCl, кабелей на основе полимерных композиций, не содержащих галогенов, (исполнение «нг(A)-HF») и огнестойких кабелей. С учетом того, что к производственным помещениям, оснащённым микропроцессорной и компьютерной техникой, предъявляются требования по отсутствию в газообразных продуктах горения коррозионноактивных газов, которые могут вызывать разрушение электронных плат и приводить к коррозионному разрушению металлоконструкций, применение кабелей исполнения «нг(A)-HF» является предпочтительным.

Определено, что нераспространение горения является базовой характеристикой пожаробезопасных кабелей, которая прежде всего обеспечивается применением трудногорючих полимерных материалов, обладающих низкой теплотой сгорания и скоростью тепловыделения, а также невысокой массовой скоростью выгорания. Понимание процессов, происходящих при горении полимеров, необходимо для разработки современных конструкций пожаробезопасных кабелей. Несмотря на обилие работ, посвященных теории горения полимеров и моделированию процессов горения, в этих работах отсутствуют модели, позволяющие оценить динамику процесса горения высоконаполненных полимерных безгалогенных материалов, используемых в конструкциях указанных кабелей.

Во втором разделе проведено исследование физико-химических процессов в двухслойной изоляции огнестойкого кабеля при воздействии пламени. Установлено, что существенное влияние на процесс пробоя двухслойной изоляции при неустановившемся режиме горения оказывает наличие электропроводящих газообразных продуктов горения. Этот вывод подтверждается не только теоретическим расчетом процесса газификации, но и экспериментальным определением электрического сопротивления изоляционного слоя (Рисунок 1).

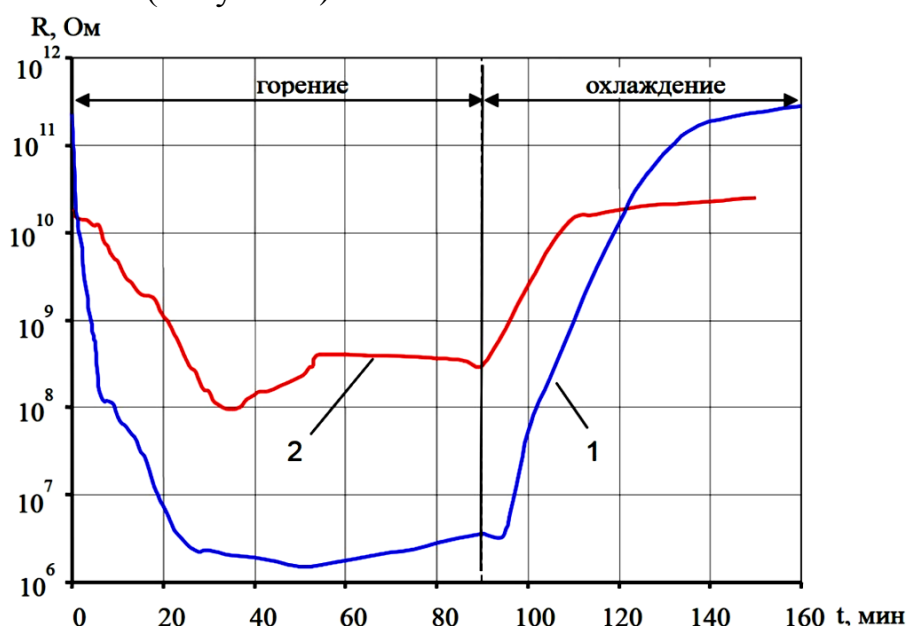


Рисунок 1. Зависимость сопротивления изоляции от времени в процессе испытания на огнестойкость: 1–ВВГнг(А)-FRLS 4x95; 2–ПвПнг(А)-FRHF 4x70

Было доказано, что кроме значений удельного объемного сопротивления лент термического барьера в области температур 750 – 800°C, на величину тока утечки и уровень электрической прочности изоляции существенное влияние оказывает тип материала полимерного слоя изоляции. Разница в падении электрического сопротивления кабелей разных исполнений связана с разной

проводимостью газообразных продуктов пиролиза, которая для кабелей исполнения «нг(A)-FRLS» на основе ПВХ существенно выше, чем для кабелей безгалогенных.

В третьем разделе осуществлена разработка математической модели физико-химических процессов, происходящих в полимерном безгалогенном материале, применяемом для наружной оболочки, под воздействием пламени, которая одновременно описывает нестационарный нагрев материала и его терморазложение, которое приводит к уменьшению массы образца. Реализация математической модели стала возможной после экспериментального определения методами термического анализа кинетических параметров терморазложения исследуемых материалов: энергий активации, констант скорости реакций для разных стадий пиролиза, тепловых эффектов. Хорошая сходимость измеренных в процессе кон-калориметрических опытов временных зависимостей массы, толщины полимерной части и температуры нижней поверхности образца с рассчитанными по разработанной модели свидетельствует об адекватности сделанных допущений и модели в целом.

Практическое использование модели для выбора полимерных материалов, а также её развитие для моделирования термолита материалов для внутренней оболочки (заполнения), имеющих более сложный состав, приведено в разделе 4.

В четвертом разделе был осуществлен выбор кабельных безгалогенных материалов и разработка пожаробезопасных кабелей с их применением. С этой целью был проведен сравнительный анализ материалов на основе результатов экспериментальных исследований методом кон-калориметрии и математического моделирования процесса горения. Показатели пожарной опасности были определены для наиболее широко применяемых полимерных композиций трех производителей¹, присутствующих на российском рынке: Проминвест Пластик, AlphaGary, Condor Compounds. Результаты сравнительных испытаний позволили осуществить обоснованный выбор материалов марки Винтес® производства ф. Проминвест Пластик.

Для сравнительных исследований путем моделирования процесса горения были выбраны материалы для заполнения Винтес® 3020 и Megolon FB119, значительно отличающиеся по пожаробезопасным свойствам.

Кинетические параметры трёх стадий термолита (энергии активации и коэффициенты скорости) оценивались с помощью программы Kinetic Trunk®. Полученные таким образом значения затем уточнялись с использованием

¹ На момент начала и в процессе выполнения данной работы материалы отечественного производства отсутствовали. Разработка рецептур композиций Винтес® велась производителем совместно с ВНИИКП

математического пакета Mathcad 15. Сравнение опытных ТГА-данных и результатов их аппроксимации приведено на Рисунке 2.

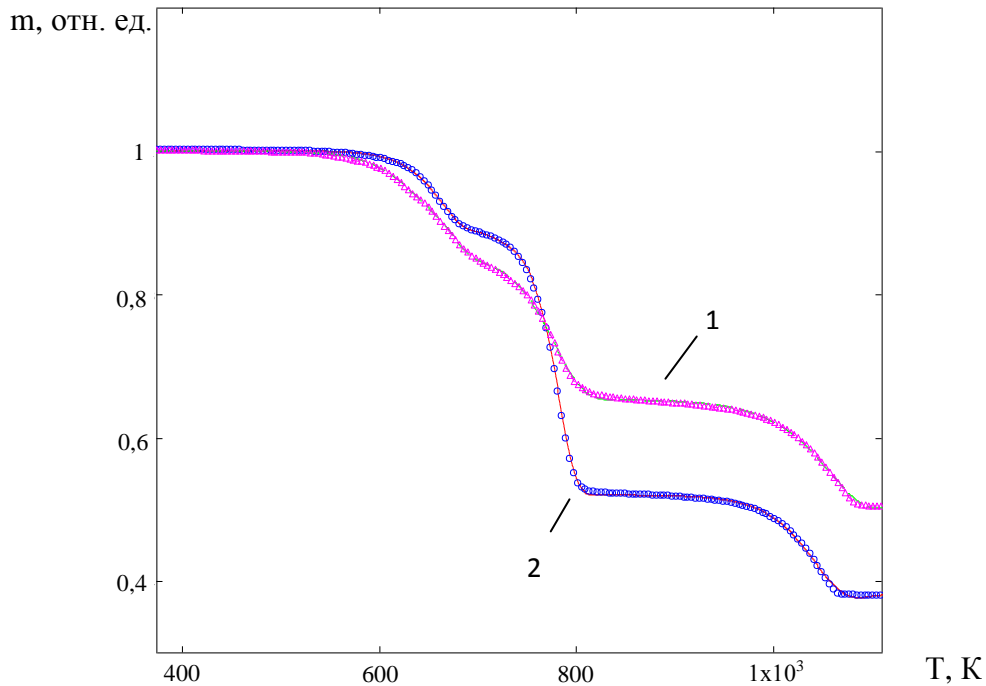


Рисунок 2. Экспериментальные термограммы (кружки и треугольники) и результаты расчета процесса пиролиза в соответствии с математической моделью (сплошная линия): 1 – Винтес® 3020; 2 – Megolon FB119

Предложенную в Разделе 3 систему дифференциальных уравнений совместно с начальными и граничными условиями (ГУ) можно представить в виде следующей математической модели, одинаковой для исследуемых материалов для заполнения:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho(x,t)} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{c \cdot \rho(x,t)} \sum_j Q_j \cdot K_j \cdot \exp \left[\frac{E_j(T(x,t) - T_j)}{R \cdot T_j^2} \right] \cdot C_j(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{dC1(x,t)}{dt} = -K1 \cdot \exp \left[\frac{E1 \cdot (T(x,t) - 593)}{R \cdot 593^2} \right] \cdot C1(x,t) \quad (2)$$

$$\frac{dC2(x,t)}{dt} = -K2 \cdot \exp \left[\frac{E2 \cdot (T(x,t) - 748)}{R \cdot 748^2} \right] \cdot C2(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{dC3(x,t)}{dt} = -K3 \cdot \exp \left[\frac{E3 \cdot (T(x,t) - 1023)}{R \cdot 1023^2} \right] \cdot C3(x,t) \quad (4)$$

$$\frac{dC4(x,t)}{dt} = K4 \cdot \exp \left[\frac{E4 \cdot (T(x,t) - 593)}{R \cdot 593^2} \right] \cdot (C4_{fin} - C4(x,t)) \quad (5)$$

$$\frac{dC5(x,t)}{dt} = K5 \cdot \exp \left[\frac{E3 \cdot (T(x,t) - 1023)}{R \cdot 1023^2} \right] \cdot (C5_{fin} - C5(x,t)) \quad (6)$$

$$T(x, 0) = (T_u - T_l) \cdot \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 + T_l \quad (7)$$

$$C_i(x, 0) = C_{i_{init}}, \quad i=1 \dots 5 \quad (8)$$

$$T(0, t) = G(t) \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} \equiv 0 \quad (10)$$

$$\rho(x, t) = \sum_{i=1}^5 C_i(x, t) \quad (11)$$

$$m(t) = S \cdot \int_0^L \sum C_i(x, t) dx = S \cdot \int_0^L \rho(x, t) dx \quad (12)$$

где T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная; x – пространственная координата (значение $x=0$ соответствует верхней поверхности образца); t – время; L – толщина образца; $C_i(x, t)$ – концентрация i -го ингредиента; E_i – энергия активации i -го процесса; K_i – коэффициент скорости реакции, определяемый для соответствующего значения температуры, стоящего под знаком экспоненты; λ – удельная теплопроводность; c – удельная теплоёмкость; Q_j – тепловой эффект j -ой стадии термоллиза ($j = 1 \dots 3$); $T_j = 593, 748$ и 1023K для $j = 1, 2$ и 3 соответственно; $C_{i_{\text{init}}}$ – начальное значение концентрации i -го ингредиента; $C_{4_{\text{fin}}}$ и $C_{5_{\text{fin}}}$ – конечные концентрации 4-го и 5-го ингредиентов, соответственно; $\rho(x, t)$ – плотность материала; $m(t)$ – текущая масса образца; S – его площадь; T_u и T_l – значения температуры верхней и нижней поверхности образца при $t=0$. При этом начальное распределение температуры в образце задаётся формулой (7), температура верхней поверхности измеряется и как заданная функция времени $G(t)$ используется как ГУ (9), и ГУ на нижней поверхности в адиабатическом приближении определяется формулой (10).

Решение системы уравнений (1)÷(6) выполнялось методом прямых с использованием Mathcad 15. На Рисунке 3 приведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчёта, из которого видно приемлемое соответствие измеренных и смоделированных кривых изменения масс образца в процессе горения.

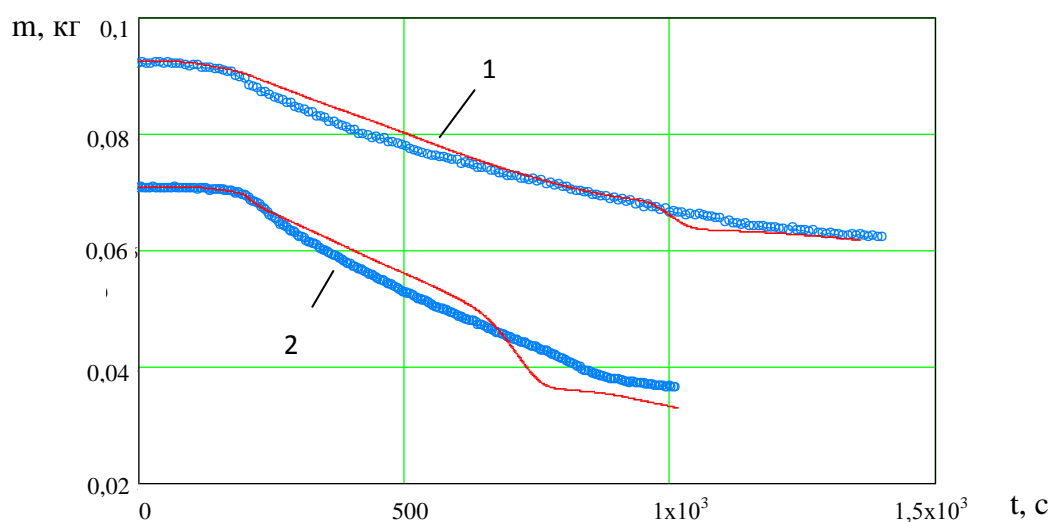


Рисунок 3. Зависимость массы образца от времени испытаний на конкалориметре (кружки – опытные данные, сплошная линия – результат моделирования): 1 – Винтес® 3020; 2 – Megolon FB119

Точность моделирования можно повысить, если адиабатическое граничное условие 2-го рода (10) на нижней поверхности заменить граничным условием 1-го рода, т.е. задать температуру нижней поверхности как функцию времени $F(t)$, по аналогии с температурой верхней поверхности $G(t)$. Результаты моделирования изменения массы образцов на основании измеренных температур обеих поверхностей в сравнении с опытными данными показывают, что совпадение расчетных значений с экспериментальными лучше, чем у приведённых на Рисунке 3 (расхождение расчётных и опытных данных находится в пределах 3% для Винтес® 3020 и 5% для Megolon FB119), что можно объяснить тем, что условие (10) на нижней поверхности выполняется недостаточно точно: в действительности имеет место отток тепла через нижнюю границу.

Основываясь на результатах математического моделирования пиролиза, показывающих большие различия в пожаробезопасных свойствах сравниваемых материалов, можно осуществить выбор материала для заполнения. По графику потери массы можно сделать вывод, что как меньшей скоростью, так и величиной потери массы обладает материал Винтес® 3020, что делает его применение предпочтительным.

Показано, что можно использовать разработанную модель для выполнения сравнительного «априорного» моделирования поведения материалов одного типа и функционального назначения, но различных по химическому составу, задавая ГУ на верхней поверхности в следующей упрощённой форме:

$$T_s(t) = T(0, t) = \left(1 - 1(t - t_{ig})\right) \cdot \left(T_{amb} + \frac{T_{ig} - T_{amb}}{t_{ig}} \cdot t\right) + 1(t - t_{ig}) \cdot T_{ig}, \quad (13)$$

где T_{ig} и t_{ig} – температура и время воспламенения соответственно (приближённо принимаем постоянными); T_{amb} – температура окружающей среды.

Для оценки возможности применения выбранных материалов для конструирования пожаробезопасных кабелей, особенно кабелей с изоляцией из СПЭ, как наиболее горючего изоляционного материала, а также выработки рекомендаций по конструированию этого типа кабелей, были испытаны «пакетные» образцы, состоящие из последовательно расположенных слоев материалов и имитирующие конструкцию кабеля. Это позволило оценить способность материалов внутренней и наружной оболочек минимизировать вклад СПЭ в общее тепловыделение и снизить скорость тепловыделения. Испытания «пакетных» образцов сочетаний СПЭ+Винтес® 3020+Винтес® 2010 выявили значительное уменьшение пикового значения тепловыделения СПЭ (третий пик на кривой 1, Рисунок 4), составлявшего для пластины СПЭ

значения $2371,7 \text{ кВт/м}^2$, до величины $72,2 \text{ кВт/м}^2$. Материалы Megolon снизили пиковое тепловыделение СПЭ до $154,0 \text{ кВт/м}^2$.

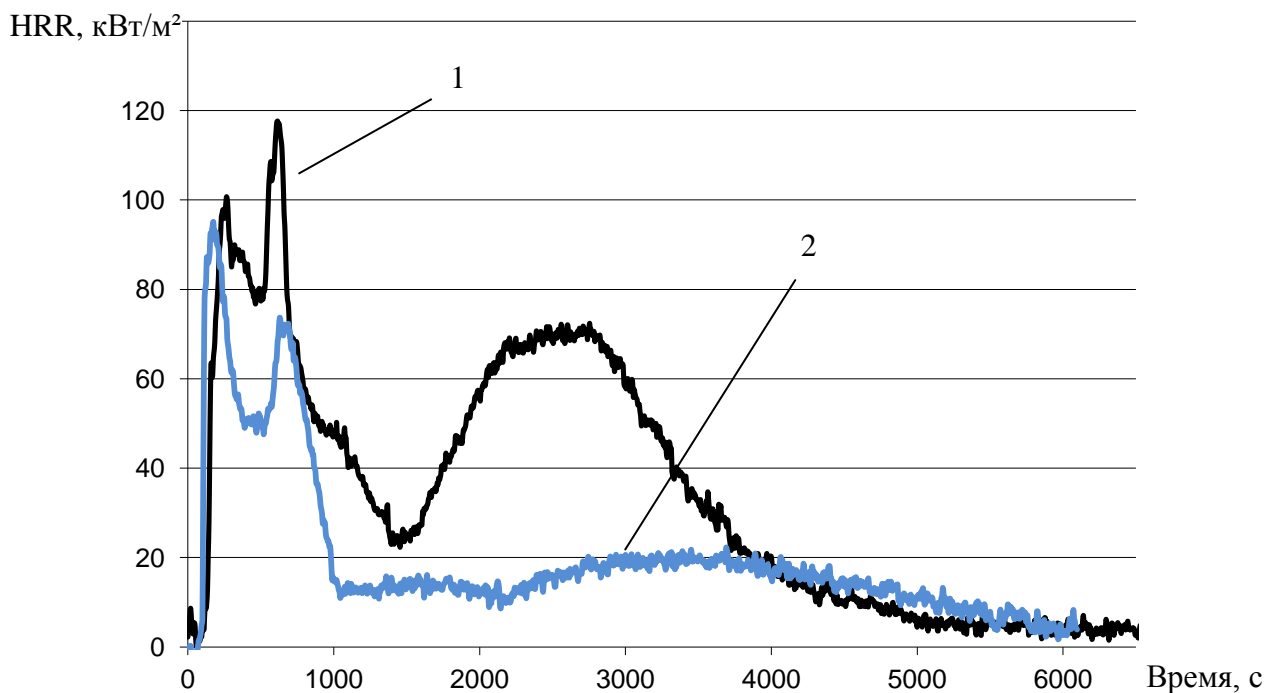


Рисунок 4. Зависимость скорости тепловыделения при горении «пакетных» образцов сочетаний материалов: 1 – СПЭ+Винтес®3020+Винтес® 2010; 2 – СПЭ+Винтес® 3020+ЛЭС+Винтес® 2010

Установлено, что применение термического барьера, удерживающего от осыпания заполнение и препятствующего выходу продуктов пиролиза СПЭ в зону пламени, является необходимым конструктивным решением, что было доказано проведением испытания сочетаний, в которых пластины изоляции и заполнения были обмотаны стеклолентой марки ЛЭС толщиной 0,2 мм с перекрытием 50 %. Результаты испытаний (Рисунок 4) показывают снижение пика скорости тепловыделения СПЭ, а также увеличение времени до его появления. В случае применения материалов Винтес® снижение пика более значительно, что подтверждает правильность ранее сделанного выбора материалов и целесообразность применения стеклоленты для обмотки сердечника пожаробезопасных кабелей с изоляцией из СПЭ.

Были разработаны критерии оценки применимости материалов в конструкциях пожаробезопасных силовых кабелей. В качестве вспомогательного критерия предложено воспользоваться индексом скорости развития пожара FIGRA (Fire Growth Rate), который рассчитывается путем деления пикового значения скорости тепловыделения на время до достижения этого значения и характеризует степень пожарной опасности материала. На основании анализа результатов испытаний сочетаний материалов определены критические значения индекса за период времени 300с материалов внутренней

и наружной оболочки кабеля с изоляцией из СПЭ, при которых обеспечивается требование по нераспространению горения: $FIGRA_{300} < 0,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

В качестве более точного критерия оценки был разработан Индекс распространения пламени ($I_{рп}$) на основе выведенного соотношения для скорости самостоятельного распространения пламени ($v_{рп}$, $\text{м}^2/\text{Дж}^{2/3} \cdot \text{кг}^{1/3} \cdot \text{с}$) по вертикально расположенным кабелям:

$$v_{рп}^{1/2} = \frac{[0,4 \sum_{i=1}^3 (\Delta h_{ci} \cdot \dot{m}_i'' \cdot FIGRA_{300i} \cdot r \cdot m_i \pi D_i) n]^{1/3}}{\Delta T (\lambda_m \rho_m c_m m_m n + \lambda_p \rho_p c_p m_p n)^{1/2}} \quad (14)$$

где n – число кабелей для испытания по ГОСТ ИЕС 60332-3-22; λ_p, ρ_p, c_p равны принятым ранее при разработке модели; m_p – сумма масс полимерных материалов, кг; индекс m обозначает металл токопроводящих жил (ТПЖ); p – полимерные материалы конструкции кабеля, для которых определены Δh_{ci} – эффективная теплота сгорания, МДж/кг; D_i – диаметр поверхности пиролиза, м; m_i – масса, кг; \dot{m}_i'' – средняя скорость потери массы, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; r – коэффициент, учитывающий снижение пикового тепловыделения изоляции и присутствующий только в слагаемом, характеризующим вклад изоляции.

Индекс $I_{рп}$ ($\text{м}^2/\text{Дж}^{2/3} \cdot \text{кг}^{1/3}$) может быть рассчитан как:

$$I_{рп} = v_{рп} \cdot \tau \cdot 10^7 \quad (15)$$

где τ – время воздействия пламени, с ($\tau=40$ мин по ГОСТ ИЕС 60332-3-22); 10^7 – коэффициент, используемый для удобства анализа.

Слагаемые, стоящие под знаком суммы в (14), определяют вклад каждого полимерного материала в конструкции кабеля в итоговую интенсивность горения кабеля. При этом необходимо использовать коэффициент (r) для составляющей, учитывающей вклад изоляции. Численно этот коэффициент равен отношению пика скорости тепловыделения СПЭ при испытаниях сочетаний материалов к величине пика, наблюдаемого при испытании только СПЭ. Так, для испытанных сочетаний пластин Винтес® этот коэффициент равен $r = 21,8/2371,7 = 0,009$. При расчете $v_{рп}$ для конструкции кабеля, не содержащего стеклоленту, коэффициент r принимается равным 1.

Рекомендовано использовать следующую классификацию для оценки способности кабеля выдерживать испытание на нераспространение горения при групповой прокладке:

$I_{рп} < 1$ – кабель горение не распространяет, длина поврежденной части (l) находится в зоне воздействия пламени горелки;

$1 \leq I_{рп} < 2,5$ – кабель выдерживает испытание на нераспространение горения, l не более 2,5 м;

$I_{рп} \geq 2,5$ соответствует $l > 2,5$ м, т.е. кабель не удовлетворяет ГОСТ ИЕС 60332-3-22.

Исследование теплового старения композиции Винтес® 2010, выбранной для использования в качестве наружной оболочки, показало, что материал обладает высокой стойкостью к термическому старению и соответствует требованиям, предъявляемым к сроку службы электрических кабелей с пластмассовой изоляцией.

На основании осуществленного выбора безгалогенных материалов были разработаны конструкции силовых кабелей марок ППГнг(А)-НФ и ПБПнг(А)-НФ на напряжение 1 кВ, а также контрольных кабелей марок КППГнг(А)-НФ и КППГЭнг(А)-НФ. Проведенные испытания показали, что разработанные конструкции кабелей удовлетворяют современным требованиям пожарной безопасности, предъявляемым к кабелям исполнения «нг(А)-НФ»: снижение светопропускания в режимах горения и тления не превышает 40 %; кабели не распространяют горение при групповой прокладке при испытании по категории «А»; коррозионная активность газов, выделяющихся при горении материалов, соответствует показателю ПКА 1 по классификации ГОСТ 31565-2012 «Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности».

При разработке конструкций кабелей на низкое и среднее напряжение с изоляцией из СПЭ наряду с использованием трудногорючих композиций для внутренней и наружной оболочек, был применен термический барьер в виде обмотки из стеклоленты поверх заполнения. Однако, применение стеклоленты обосновано только для кабелей с сечением ТПЖ более 35 мм², испытываемых на нераспространение горения с зазором, равным половине диаметра кабеля.

Для кабеля марки ПвППнг(А)-НФ 4х70-1, являющегося наиболее опасным маркоразмером с точки зрения распространения пламени, был рассчитан по (15) Индекс распространения пламени, значение которого составило менее 2,0 м²/Дж^{2/3}·кг^{1/3}. Результаты испытаний опытных образцов кабелей и рассчитанные Индексы распространения пламени приведены в Таблице 1. Как видно из приведенных данных, разработанные конструкции силовых кабелей с применением материалов Винтес® и со стандартными толщинами внутренней и наружной оболочек удовлетворяют требованию по нераспространению горения. Опытным путем подтвердились выводы, сделанные при испытаниях сочетаний материалов, о невозможности использования для поставленных целей композиций Megolon, а также использования материала наружной оболочки для применения в качестве заполнения, несмотря на достоинства такого решения.

Удовлетворительное соответствие расчетных значений разработанного Индекса распространения пламени и фактических результатов испытаний кабелей говорит о возможности использования разработанного подхода для

оценки распространения пламени по кабелям на основе показателей пожарной опасности материалов на стадии разработки конструкций кабелей.

Таблица 1

Марко-размер кабеля	Применяемые материалы				Кол-во отрезков для испытаний	Длина поврежденной пламенем части при испытаниях, м	Индекс распр-я пламени, $\frac{м^2}{(Дж^2 кг)^{\frac{1}{3}}}$
	изоляция	внутренней оболочки	обмотки	наружной оболочки			
ПвПнг(А)-НФ							
4x95	СПЭ	Винтес® 2010	ЛЭС	Винтес® 2010	8	3,5	3,57
4x95	СПЭ	СС-5212	ЛЭС	S 6645	9	1,02	1,92
4x70	СПЭ	S 6645	ЛЭС	S 6645	10	3,5	3,19
4x70	СПЭ	FB119	ЛЭС	S642	10	3,5	2,67
4x120	СПЭ	S642	ЛЭС	S642	9	3,5	2,94
4x95	СПЭ	Винтес® 3020	ЛЭС	Винтес® 2010	11	0,79	0,78
4x70	СПЭ	Винтес® 3020	ЛЭС	Винтес® 2010	9	1,66	1,22
ППнг(А)-НФ							
4x95	Винтес® 1110	Винтес® 3020	-	Винтес® 2010	10	0,76	0,83
4x95	СС-7760	СС-5212	-	S 6645	9	1,06	1,24
4x70	Винтес® 1110	Винтес® 3020	-	Винтес® 2010	10	0,71	0,92

Результаты испытаний разработанных конструкций кабелей марок ППнг(А)-НФ 4x70-1 и ПвПнг(А)-НФ 4x70-1 подтвердили соответствие кабелей требованиям ГОСТ 31996-2012. По уровню требований по показателю нераспространения горения разработанная серия кабелей превышает требования стандарта IEC 60502-1.

С использованием выбранных материалов были разработаны кабели марки ПвПнг(А)-НФ на напряжение 6 и 10 кВ с изоляцией из СПЭ, с наружной оболочкой из полимерной композиции, не содержащей галогенов.

Накопленный положительный опыт разработки кабелей на напряжение 1, 6 и 10 кВ был использован при разработке серии кабелей исполнения «нг(А)-НФ» для применения в метрополитенах, содержащих броню из стальных оцинкованных лент или проволок. Одножильные кабели для сетей переменного тока имеют проволочную броню из сплава алюминия.

Разработка конструкций огнестойких кабелей была проведена с использованием в качестве материалов изоляции и оболочек выбранных полимерных композиций, не содержащих галогенов. В качестве слюдосодержащих лент использовались ленты Элмикатекс 54509 (ОАО "Элинар"), представляющие собой электроизоляционную ткань из стеклонитей

в качестве подложки, кремнийорганические связующие и слой бумаги из слюды флогопит. Отработка конструкций огнестойких кабелей показала, что степень перекрытия лент и технологические режимы наложения лент термического барьера также влияют на огнестойкость кабеля. Так, перекрытие лент для обеспечения требования по огнестойкости должно быть не менее 40%, количество лент – не менее двух, а наложение лент на кабели малых сечений, производимое на вертикальных обмоточных машинах, должно осуществляться при скорости, не превышающей 2000 об/мин, при которой не происходит отслоения слюдяного слоя.

При создании кабелей был использован подход, ранее успешно апробированный при разработке кабелей исполнения «нг(A)-HF», включающий в себя расчет Индекса распространения пламени, значения которого для разработанных конструкций не превысили 2,5. Все группы разработанных безгалогенных огнестойких кабелей не распространяют горение по категории А, сохраняют работоспособность при пожаре не менее 3-х часов и обладают низкой дымообразующей способностью.

Необходимо также отметить, что при использовании термического барьера в виде обмотки из слюдосодержащих лент поверх ТПЖ, который имеет место в указанных группах кабелей, осыпание слюды при испытании по методам ГОСТ ИЕС 60331 ч.1 и 2, предусматривающим воздействие ударных механических нагрузок одновременно с воздействием на образец пламени температурой не менее 830 °С, отсутствует. Стеклолента, входящая в состав слюдосодержащей ленты, удерживает частицы слюды и не дает возможности ей осыпаться при воздействии ударных нагрузок, что позволяет кабелю сохранять функционирование в течение времени не менее 120 мин.

Создание огнестойких кабелей на напряжение 10 кВ предусматривало комплексный подход, включающий, наряду с требованиями по огнестойкости, выполнение также требований по нераспространению горения при групповой прокладке, пониженному дымовыделению при горении и тлении и низкой коррозионной активности продуктов дымовыделения, а также обеспечение высокого уровня электрических характеристик. При разработке конструкций были реализованы два технических решения:

1. Для изделий с минимальной огнестойкостью (30 мин) в качестве прототипа использовалась «базовая» конструкция кабеля, не распространяющего горение, требования по огнестойкости в которой были достигнуты путем выбора оптимальных толщин оболочек безгалогенных материалов, что обеспечило требуемую задержку во времени до начала термической деструкции изоляционной системы. Такая задержка связана, главным образом, с особенностями горения безгалогенных высоконаполненных

материалов, выбранных в результате описанных в Разделе 4 исследований. Разработанная конструкция позволила сохранить все электрические характеристики кабелей без изменений в связи с тем, что реализация требования по огнестойкости не затрагивала изоляционную систему.

2. Для кабелей с огнестойкостью 180 мин была разработана конструкция, отличающаяся от предыдущей слоем в виде обмотки из слюдосодержащих лент марки Элмикатекс толщиной 0,14 мм, наложенным поверх ТПЖ.

Проведенные испытания показали, что кабели марок ПвПнг(А)-FRHF(30) и ПвПнг(А)-FRHF(180) соответствуют ГОСТ 31565-2012, а также удовлетворяют требованиям по испытанию переменным напряжением 40 кВ в течение 4 ч; уровню ЧР в исходном состоянии (значение ЧР на строительной длине не превышает 3 пКл при испытательном напряжении 15 кВ); требованию по огнестойкости при испытательном напряжении 7 кВ.

Испытания кабелей с изоляцией из керамикообразующей резины позволили выработать рекомендации по областям их применения: использование таких резин для изоляции огнестойких кабелей можно рекомендовать для кабелей малых сечений на напряжение до 300 В, т.е. преимущественная область применения таких кабелей – системы пожарной сигнализации, причем прокладка кабелей должна по возможности происходить в местах с минимальной вероятностью возникновения механических ударных нагрузок в случае пожара.

Для изоляции разработанных конструкций огнестойких силовых и контрольных кабелей для стационарной прокладки на напряжение до 1 кВ были выбраны следующие марки керамикообразующих кремнийорганических резин: LP9275ARE18 (Momentive Performance Materials Inc, США), Юнисил®PC 20-8465 (ООО «БМП Кемикал») и Bluesil®MF84654U (Blue Star Silicones, Франция). В качестве материалов внутренней и наружной оболочек были применены композиции марок Винтес® 3020 и Винтес® 2010. Указанная серия пожаробезопасных безгалогенных кабелей удовлетворяет требованию по огнестойкости как при испытании по ГОСТ IEC 60331-21, так и при испытании на огнестойкость с воздействием открытого пламени одновременно с механическими ударными нагрузками в течение времени не менее 30 мин для контрольных кабелей и 120 мин для кабелей силовых.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана математическая модель, позволяющая количественно описать физико-химические процессы, происходящие в некоксуемом высоконаполненном полимерном материале, не содержащем галогенов, при его горении.

2. Смоделирован процесс пиролиза безгалогенных материалов, предназначенных для наружных оболочек, а также для внутренних оболочек (имеющих более сложный состав компонентов, чем материалы для наружной оболочки). Разработанная модель использована при создании конструкций пожаробезопасных кабелей.

3. Методом кон-калориметрии выполнены экспериментальные исследования по оценке пожароопасных характеристик высоконаполненных полимерных материалов в реальных условиях их горения. Полученные результаты позволили классифицировать материалы по степени пожарной опасности и осуществить выбор материалов для конструирования пожаробезопасных кабелей, основываясь как на анализе измеренных количественных характеристик, так и используя предложенные критические значения индекса FIGRA.

4. Для оценки применимости безгалогенных материалов в конструкциях кабелей разработан Индекс распространения пламени, позволяющий судить о степени распространения пламени по вертикально расположенному пучку кабелей при испытании на нераспространение горения.

5. На основании проведенных исследований механизма пробоя двухслойной изоляционной системы огнестойких кабелей, состоящей из термического барьера из стеклослюдосодержащих лент и полимерной изоляции, выработаны рекомендации по конструированию огнестойких кабелей как на низкое напряжение, так и на напряжение до 10 кВ включительно.

6. Исследовано влияние пламени и одновременных механических ударных нагрузок на функционирование кабелей с термическим барьером из керамикообразующих кремнийорганических резин и выработаны рекомендации по производству и применению таких кабелей, обладающих повышенными характеристиками.

7. Создана серия силовых и контрольных кабелей на напряжение до 1 кВ, не распространяющих горение и огнестойких на базе полимерных композиций, не содержащих галогенов. Эти кабели внедрены в производство на 25 кабельных заводах РФ. Технические требования и конструктивные исполнения кабелей включены в межгосударственный стандарт (ГОСТ 31996-2012).

8. Создана серия силовых кабелей на напряжение 6 и 10 кВ с изоляцией из СПЭ, не распространяющих горение, в том числе огнестойких, на базе полимерных композиций, не содержащих галогенов, предназначенных для электроснабжения метрополитена и других потребителей в случае возникновения пожара. Промышленное производство кабелей освоено на ОАО «Иркутсккабель».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих научных изданиях из перечня ВАК:

1. Каменский М.К., Фрик А.А. Силовые кабели, не распространяющие горение при групповой прокладке в кабельных сооружениях. Журнал «Энергетик». № 7, 2011. с. 15-17.

2. Каменский М.К., Образцов Ю.В., Фрик А.А. Новое поколение электрических кабелей с улучшенными показателями пожарной безопасности. НТЖ «Кабели и провода». № 6 (277), 2002. с.19-20.

3. Каменский М.К., Фрик А.А. Электрические кабели с повышенными показателями пожарной безопасности для электропроводок в общественных и промышленных зданиях. Журнал «Светотехника». № 6. 2005. с.59-63.

4. Мещанов Г.И., Каменский М.К., Фрик А.А. Развитие производства и расширение областей применения новых типов пожаробезопасных кабелей в России. НТЖ «Кабели и провода». № 4 (305), 2007. с.5-9.

5. Каменский М.К., Крючков А.А., Савин Д.В., Степанова Т.А., Троицкая Г.А., Фрик А.А., Шувалов М.Ю. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов, развивающихся при горении безгалогенных полимерных композиций, применяемых в конструкциях пожаробезопасных кабельных изделий. НТЖ «Кабели и провода». № 6 (337), 2012. с.3-9.

6. Булычев Д.А., Каменский М.К., Крючков А.А., Савин Д.В., Степанова Т.А., Фрик А.А., Шувалов М.Ю. Применение математического моделирования для сравнительного анализа горения (пиролиза) безгалогенных полимерных композиций в условиях кон-калориметрического эксперимента. НТЖ «Кабели и провода». № 2 (351), 2015, с.7-15.

Остальные публикации по теме диссертации:

7. Каменский М.К., Фрик А.А. Реализация требований пожарной безопасности в нормативной базе на силовые кабели. Журнал «КАБЕЛЬ-news». № 1. 2011. с.72-77.

8. M.Shuvalov, M.Kamenskiy, A.Kryuchkov, T.Stepanova, A.Frik, D.Savin. Determination of fire behavior of polymer halogen-free cable materials and mathematical modeling of highly-filled compound burning. C10.5. Jicable'15. 9th International Conference on Insulated Power Cables. France. 2015. 6p.