

Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко,
Владимир Иванович Зыков, Александр Львович Холостов,
Тимур Игоревич Чистяков

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара используются вспучивающиеся огнезащитные покрытия, эффективность применения которых в случае реального режима пожара не исследована.

Цели и задачи. Целью статьи является экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок, обработанных вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской «Огнеза-ВД-К». При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

Методы. Экспериментальное исследование нагрева в муфельной печи образцов проводов и кабелей, обработанных вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской. Анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости удельного сопротивления, индуктивности и емкости распространенных электрических кабелей от температуры окружающего кабель воздуха.

Обнаружено, что для всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание произошло при температуре окружающей среды в диапазоне 180–230 °С без увеличения в объеме огнезащитного покрытия до размеров, обеспечивающих защиту кабеля от внешнего теплового воздействия. При этом фазы и амплитуды входного электрического сигнала могут существенно изменяться до наступления короткого замыкания. Выявлено, что вспучивание огнезащитной краски при режиме пожара в муфельной печи происходит при 400 °С, а не при 200 °С как в случае стандартных испытаний.

Показано, что динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности.

Выводы. Работоспособность электрических проводов и кабелей, обработанных огнезащитным вспучивающимся составом, необходимо определять в условиях реальных режимов пожара в помещениях, где используются эти провода и кабели.

Ключевые слова: огнезащита; силовой кабель; сигнальный кабель; температурный режим; изоляция; терморазложение

Для цитирования: Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Холостов А.Л., Чистяков Т.И. Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 49–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-59

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

Experimental evaluation of the efficiency of application of intumescent flame retardant coatings for electric wires and cables under simultaneous fire and current load impact

Sergey V. Puzach , Olga S. Lebedchenko, Vladimir I. Zykov, Aleksander L. Kholostov, Timur I. Chistyakov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In order to preserve the operability of wires and cables in fire conditions, intumescent flame retardant coatings are used, the effectiveness of their application in the case of real fire mode has not been investigated.

Aims and purposes. The purpose of the article is to evaluate experimentally the effectiveness of the use of intumescent flame retardant coatings for electrical wires and cables under simultaneous exposure to fire and current load. In order to achieve this purpose, experimental tests on wires and cables of different brands, treated with intumescent water dispersion fire-protective paint "Ogneza-VD-K". At the same time, the influence of heated ambient temperature on electrical parameters of wires and cables, such as resistivity, inductance and capacitance, was assessed.

Methods. Experimental study of heating in a muffle furnace of wire and cable samples treated with intumescent water-dispersion fire-retardant paint. Analysis of the obtained results.

Results and their discussion. The dependences of resistivity, inductance and capacitance of common electrical cables on ambient air temperature are obtained.

It was found that for all considered cables, the short circuit occurred at ambient temperatures in the range of 180–230 °C increasing the fireproofing coating to dimensions that protect the cable from external thermal impact. In this case, the phases and amplitudes of the input electrical signal can change significantly before a short circuit occurs.

It has been found that the swelling of fire retardant paint under fire conditions in a muffle furnace occurs at 400 °C and not at 200 °C as in the case of standard tests.

It is shown that the dynamics of temperature change inside the muffle furnace approached the temperature regime of a real fire in the room of the MCPU (Main circulation pump units) section of the Leningrad NPP (containment) of the reactor building and in the cable room of the 3rd safety channel of the safety building.

Conclusions. Working capacity of electric wires and cables treated with flame retardant should be determined in real fire conditions in the premises where these wires and cables are used.

Keywords: fire protection; power cable; signal cable; temperature regime; insulation; thermal decomposition

For citation: Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Kholostov A.L., Chistyakov T.I. Experimental evaluation of the efficiency of application of intumescent flame retardant coatings for electric wires and cables under simultaneous fire and current load impact. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):49-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-59 (rus).

 Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

Введение

Нарушение температурных режимов эксплуатации электрических проводов и кабелей негативно сказывается на выполнении ими своих функций, связанных как с передачей управляющих сигналов [1–5], так и с работой под токовой нагрузкой [6–9]. Повышение температуры ухудшает состояние изоляции и приводит к нарушению ее свойств с существенным сокращением срока службы самих проводов и кабелей [10–16].

Повышение температуры изоляции электрических проводов и кабелей может привести к терморазложению изоляции и последующему короткому замыканию [7, 10, 11, 17]. В силовых цепях может образоваться источник зажигания (в случае неисправности элементов защиты силовых цепей), а в цепях управления — потеря контроля за состоянием техно-

логического процесса [11, 14, 18, 19], что может также привести к серьезным техногенным авариям и пожарам.

Кроме того, материалы, из которых изготовлена изоляция, сами являются источниками образования токсичных веществ и усложняют процессы эвакуации людей в случае пожара и работу пожарных [5, 9, 20, 21].

Защита электрических проводов и кабелей от теплового воздействия пожара может осуществляться с использованием вспучивающихся огнезащитных составов [3]. При нагреве огнезащитного покрытия после достижения температуры вспучивания происходит существенное увеличение толщины огнезащитного слоя, что предотвращает возникновение процесса терморазложения изоляции и, следовательно, короткого замыкания.

Научных исследований эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки за исключением работы [3] практически нет.

В вышеуказанной работе представлены результаты экспериментальных испытаний, проведенных на специально разработанной установке, эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий при различных режимах пожара. Обнаружено, что в ряде случаев процесс терморазложения изоляции начинается, когда еще не происходит начало вспучивания огнезащитного состава (исключением является углеводородный режим пожара). Однако теоретически предсказать на данном этапе исследований возникновение короткого замыкания, а также изменение параметров проходящего по кабелю электрического сигнала не представляется возможным.

Поэтому актуальной задачей является проведение экспериментов по исследованию теплового воздействия реального пожара на работоспособность проводов и кабелей с нанесенным на их наружную поверхность огнезащитным слоем.

Целью статьи является экспериментальная оценка одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на эффективность применения вспучивающихся огнезащитных составов, наносимых на изоляцию электрических проводов и кабелей.

Опытные испытания на экспериментальной установке [4] проводились для проводов и кабелей различных марок, которые использовались в работе [4] без нанесенного огнезащитного слоя. В данной работе на вышеуказанные провода и кабели были нанесены огнезащитные слои вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» ТУ 2313-004-92450604–2013 (в точном соответствии с рекомендациями производителя). В процессе экспериментов измерялись удельное сопротивление, индуктивность и емкость проводников, а также визуально сравнивались амплитуда, частота, фаза и форма сигнала в испытуемом образце с образцовым сигналом.

Стандартные испытания на работоспособность

Исследование сохранения работоспособности кабелей (как электрических, так и оптических) при воздействии на них пламени выполняется по методике, изложенной в ГОСТ Р МЭК 60331-21–2003 Государственный стандарт Российской Федерации¹.

¹ ГОСТ Р МЭК 60331-21–2003. Государственный стандарт Российской Федерации. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. Часть 21. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели на номинальное напряжение до 0,6/1,0 кВ включительно (принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 19.03.2003 № 83-ст).

Испытания предполагают воздействие на исследуемый образец пламени, температура которого превышает 750 °С, что гарантированно обеспечивает вспучивание огнезащитного слоя. Но пороговое значение температуры в 750 °С гораздо выше температуры разрушения (деструкции) ряда материалов, используемых в изоляции проводов и кабелей. В условиях реального пожара, как это показано в работе [3], терморазложение материала изоляции может наступить ранее, чем проявятся защитные свойства вспучивающегося огнезащитного покрытия.

Эффективность огнезащитных составов определяется в соответствии с ГОСТ Р 59637–2021² при стандартном режиме пожара, обеспечивающем быстрое нагревание покрытия в течение 5 мин до температуры 600 °С. Начальная температура, при которой начинают проявляться огнезащитные свойства различных красок, находится в диапазоне 200–400 °С. В этом случае из-за быстрого нагрева температура изоляции не успевает достигнуть температуры ее терморазложения (130–170 °С) до момента вспучивания огнезащитного слоя. Напомним, что защитные свойства вспучивающейся огнезащитной краски наиболее эффективно проявляются при температуре выше 600 °С.

Как отмечалось ранее в работе [3], при реальных режимах пожара температура в помещении существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Это может привести к тому, что до начала вспучивания огнезащитного слоя произойдет терморазрушение слоя изоляции [3].

Исследование возникновения короткого замыкания необходимо проводить с одновременным измерением амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, проходящего через испытуемый образец кабеля, так как эти характеристики тоже будут изменяться в определенные моменты времени. Такие изменения необходимо учитывать при эксплуатации реальных объектов в аварийных режимах.

Для того чтобы исключить рассмотренные недостатки стандартного метода испытаний в работе [4], была разработана опытная установка, которая позволяет исследовать влияние динамики изменения температуры окружающей провода и кабеля среды на работоспособность кабелей, покрытых огнезащитными составами. Регулируемая скорость прогрева таким образом позволила исследовать поведение защитных составов и изоляции кабелей в условиях различных пожаров.

² ГОСТ Р 59637–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Натурные испытания проводов и кабелей проводились на установке [4], разработанной для этих целей, состав которой можно видеть на рис. 1.

Электрический сигнал синусоидальной формы частотой 200 кГц и напряжением 2 В с одного из выходов генератора гармонических колебаний 1 подается на испытываемый образец провода или кабеля (далее — образец), находящийся в печи муфельной 2 ступенчатого нагрева.

Сигнал, прошедший через испытываемый образец, поступает на один из входов осциллографа аналогового двухлучевого 3 для сравнения с исходным синусоидальным сигналом. Образцовый сигнал поступает на второй вход осциллографа напрямую без изменений. Оба сигнала отражаются на экране, что позволяет проводить их сравнение и визуализировать возможные изменения амплитуды, частоты, фазы и формы сигнала, прошедшего через испытываемый образец.

Анализатор спектра электрических сигналов 4 позволяет отследить возможное появление дополнительных гармоник при нелинейных искажениях сигнала, прошедшего через испытываемый образец, а также оценить уровень шума при нарастании температуры.

В камере муфельной печи изучаемый образец подвергался воздействию ступенчато нарастающей температуры с целью установления зависимостей от нее таких электрических параметров, как активное

сопротивление R , емкость C , индуктивность L . При стабилизации ступенчато нарастающей температуры на каждом шаге последовательно считывались электрические параметры с индикаторов измерителей (тестеров) активного сопротивления 5, индуктивности 6 и емкости 7.

В дополнение к полученным данным визуально контролировалось состояние защитного покрытия, нанесенного на образцы.

Экспериментальные образцы проводов и кабелей

Были подготовлены образцы следующих электрических проводов и кабелей (как в работе [4]):

- кабельная линия типа «витая пара»;
- кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$;
- кабельная линия типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$.

Нанесение слоев вспучивающейся огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» на экспериментальные образцы производилось в точном соответствии с рекомендациями производителя (ТУ 2313-004-92450604–2013).

Чтобы обеспечить равномерность нагрева образцов, обработанных вспучивающейся краской, они были подготовлены в форме спирали (рис. 2).

Длина кабелей в нагреваемых образцах равна: медный кабель витой пары — 7,0 м; кабель со стальными проводами типа ПНСВ $1 \times 1,2$ — 15,0 м; кабель с медными проводами типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ — 6,0 м.

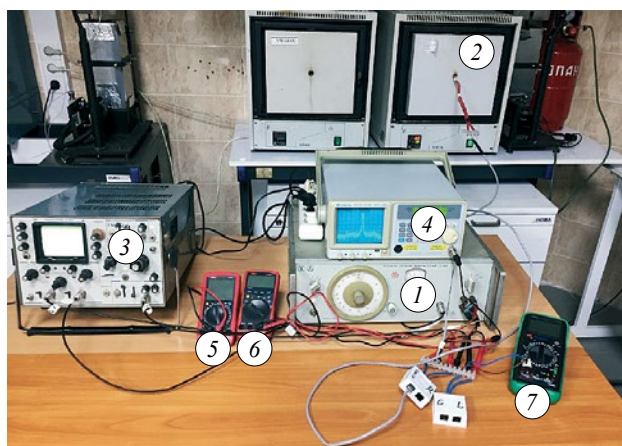


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — генератор гармонических колебаний; 2 — печь муфельная; 3 — осциллограф аналоговый двухлучевой; 4 — анализатор спектра электрических сигналов; 5 — измеритель активного электрического сопротивления; 6 — измеритель электрической индуктивности; 7 — измеритель электрической емкости

Fig. 1. Scheme of experimental installation: 1 — harmonic oscillation generator; 2 — muffle furnace; 3 — analog dual-beam oscilloscope; 4 — electrical signal spectrum analyzer; 5 — active electrical resistance meter; 6 — electric inductance meter; 7 — capacitance meter

Результаты экспериментов и их анализ

Зависимости экспериментальных значений измеряемых параметров кабелей от температуры в муфельной печи в случае кабельной линии типа «витая пара» (два эксперимента) представлены в табл. 1 и 2, для кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$ приведены в табл. 3 и кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ — в табл. 4.

Из табл. 1–4 видно, что при нагреве всех кабелей до температуры в муфельной печи в диапазоне 180–230 °С происходит короткое замыкание. При этом не обнаружено вспучивания огнезащитного покрытия. Поэтому становится невозможной передача электрического сигнала по кабелю.

Вспучивание водно-дисперсионной огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» в условиях стандартных испытаний происходит при температуре 200 °С (ТУ 2313-004-92450604–2013). Выполненные эксперименты показали, что в случае температурного режима в муфельной печи процесс вспучивания начинается при температуре 400 °С. При этом

*a**b**c**d*

Рис. 2. Экспериментальные образцы: *a* — кабель типа «витая пара» в муфельной печи после воздействия температуры 170 °С; *b* — провод типа КМВЭВ 1 × 2 × 1,5; *c* — двухжильный нагревательный провод типа ПНСВ 1 × 1,2; *d* — кабель типа «витая пара»

Fig. 2. Experimental samples: *a* — twisted-pair cable in a muffle furnace after exposure to temperature of 170 °С; *b* — wire of KMVEV type 1 × 2 × 1.5; *c* — two-core heating wire of PNSV type 1 × 1.2; *d* — twisted pair cable

огнезащитное покрытие при максимальной температуре 230 °С возникновения короткого замыкания остается без изменений.

На рис. 3 показан внешний вид образца кабеля до и после вспучивания огнезащитного покрытия. Коэффициент вспучивания оказался равным 5, в то время как при стандартных испытаниях он равен 20.

Сдвиг фазы синусоидального сигнала начался при температуре 120 °С (провод типа ПНСВ 1 × 1,2, табл. 3). При повышении температуры внутри муфельной печи до 170 °С обнаружено начало возникновения скачков амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала. Стабильный характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала начинается с температуры 180 °С и выше.

В случаях витой пары (табл. 1 и 2) и кабельной линии КМВЭВ 1 × 2 × 1,5 (табл. 4) изменения амплитуды выходного сигнала и фазы не обнаружено.

Результаты опытов показали, что в случае постепенного нагрева электрического провода или кабеля конечным итогом является короткое замыкание между его токопроводящими жилами и, вследствие этого, прекращение передачи электрического сигнала. Таким образом, огнезащитные вспучивающиеся покрытия, имеющие температуру начала вспучивания в интервале от 180 до 250 °С, не позволяют сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара (как теоретически предсказано в работе [3]).

Таблица 1. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа «витая пара» (эксперимент № 1)**Table 1.** Influence of temperature on parameters of twisted pair cable line (experiment No. 1)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$ R, Ohm	$C, \text{пФ}$ C, pF	$L, \text{мГн}$ L, mH	Примечания Notes
20	8,9	2,09	0,027	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
155	8,9	2,10	0,027	
175	9,1	2,10	0,027	
185	9,6	2,10	0,027	
195	9,8	2,10	0,023	Короткое замыкание проводников. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell

Таблица 2. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа «витая пара» (эксперимент № 2)**Table 2.** Influence of temperature on parameters of twisted pair cable line (experiment No. 2)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$ R, Ohm	$C, \text{пФ}$ C, pF	$L, \text{мГн}$ L, mH	Примечания Notes
20	9,7	2,21	0,026	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
100	9,8	2,25	0,026	
125	9,8	2,24	0,026	
135	10,2	2,23	0,026	
145	10,6	2,22	0,026	
155	10,7	2,22	0,028	
165	10,8	2,23	0,028	
175	10,6	2,28	0,028	
180	5,8	2,33	0,027	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short circuit. The flame retardant coating did not swell
175	5,5	—	0,026	Развитие процесса короткого замыкания на остывании Development of the cooling short circuit process

Например, обнаружено, что короткое замыкание образца кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ произошло при $220 ^\circ\text{C}$ (табл. 4). Последующий нагрев до температуры $300 ^\circ\text{C}$ показал, что вспучивания огнезащитного слоя не произошло. Этот факт подтверждает внешний вид образца при температуре $300 ^\circ\text{C}$ (рис. 4). В начале нагрева огнезащитное покрытие было целостное, затем оно частично

Таблица 3. Влияние температуры на параметры кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$ **Table 3.** Influence of temperature on parameters of a cable line made of a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$ R, Ohm	$C, \text{пФ}$ C, pF	$L, \text{мГн}$ L, mH	Примечания Notes
20	5,3	0,510	0,242	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
100	5,8	0,684	0,249	
110	5,8	1,088	0,256	
120	6,5	1,654	0,262	Сдвиг фазы синусоидального сигнала. Огнезащитное покрытие не вспучилось Phase shift of the sinusoidal signal. The flame retardant coating did not swell
130	6,4	1,658	0,265	
145	6,5	1,639	0,269	
160	6,7	1,618	0,272	
170	7,0	1,599	0,277	
180	7,3	1,588	0,283	
200	7,3	1,645	0,288	
215	7,8	1,846	0,294	
230	> 5,2	—	> 0,200	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell

Таблица 4. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ **Table 4.** Influence of temperature on parameters of the cable line type KMVEV $1 \times 2 \times 1.5$

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$ R, Ohm	$C, \text{пФ}$ C, pF	$L, \text{мГн}$ L, mH	Примечания Notes
20	1,4	0,894	0,006	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
120	1,5	1,378	0,007	
145	1,8	1,403	0,007	
160	1,9	1,437	0,007	
170	2,1	1,478	0,007	
180	1,4	1,595	0,007	
200	1,3	2,31	0,007	Появление дыма в результате терморазложения изоляции кабеля. Огнезащитное покрытие не вспучилось The appearance of smoke as a result of thermal decomposition. The flame retardant coating did not swell
210	1,5	5,86	0,007	
220	1,4	—	—	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell



a



b

Рис. 3. Внешний вид образца кабеля типа ПНСВ $1 \times 1,2$, обработанного огнезащитным покрытием «Огнеза-ВД-К», до вспучивания при $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) и после вспучивания при $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

Fig. 3. Appearance of cable sample PNSV 1×1.2 type with fireproof coating “Ogneza-VD-K” before swelling at $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and after swelling at $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

лопнуло вследствие температурного расширения и последующего плавления изоляции кабеля.

Сравнение температурных режимов пожара, полученных в муфельной печи и при реальных пожарах, рассчитанных в работе [22] для участка ГЦНА гермообъема реакторного здания Ленинградской АЭС и кабельного помещения 3-го канала



Рис. 4. Внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ при нагреве до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Appearance of a sample of a cable line of the KMVEV type $1 \times 2 \times 1.5$ after heating to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T, ^{\circ}\text{C}$

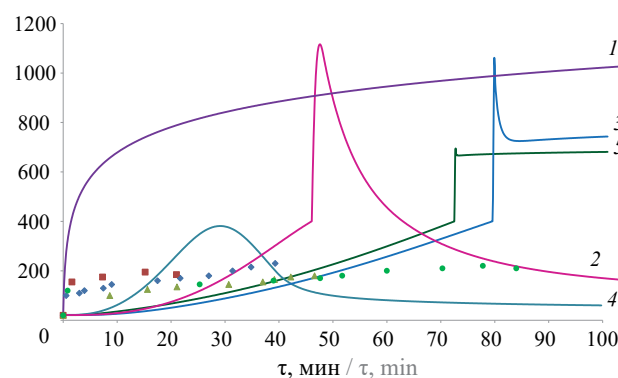


Рис. 5. Зависимость температуры от времени с начала пожара: участок ГЦНА (гермообъем): 1 — стандартный пожар; 2 — реальный пожар (закрытые двери); 3 — реальный пожар (открытые двери); кабельное помещение 3-го канала безопасности; 4 — реальный пожар (закрытые двери); 5 — реальный пожар (открытые двери). Маркерами обозначены температурные режимы при проведении экспериментов с кабелями в муфельной печи

Fig. 5. Dependences of temperatures on the time from the beginning of the fire: MCPU section (containment): 1 — standard fire; 2 — real fire (closed doors); 3 — real fire (open doors); cable room of the 3rd security channel; 4 — real fire (closed doors); 5 — real fire (open doors). Markers temperature regimes when conducting experiments with cables in a muffle furnace

безопасности здания безопасности, приведено на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в случае реального пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности. Поэтому тепловое воздействие на кабели внутри печи близко к аналогичному воздействию в реальных полномасштабных помещениях АЭС. Это позволяет распространить результаты маломасштабных опытов на реальные полномасштабные помещения.

Полученные результаты позволяют предположить существенное влияние темпа нагрева на процесс вспучивания огнезащитного покрытия.

Выводы

Нагрев всех рассматриваемых в работе кабелей при одновременном влиянии пожара и токовой нагрузки до температуры в диапазоне 180–230 °С привел к короткому замыканию. При этом не произошло увеличение толщины огнезащитного покрытия до величины, обеспечивающей защиту кабеля от внешнего теплового воздействия вспучиванием вышеуказанного покрытия. При этом из-за нарушения изоляции и возникновения короткого замыкания передача электрического сигнала по кабелю становится невозможной.

Таким образом, необходимо определять работоспособность электрических проводов и кабелей, обработанных огнезащитным вспучивающимся составом в условиях реальных режимов пожара в помещениях, где используются эти провода и кабели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедченко О.С., Зыков В.И., Пузач С.В. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 4. С. 51–58. DOI: 10.22257/0869-7493.2020.29.04.51-58
2. Лебедченко О.С. Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. «Ройтмановские чтения». М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 72–75.
3. Лебедченко О.С., Пузач С.В., Зыков В.И. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 4. С. 36–47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47
4. Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Чистяков Т.И. Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 56–67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67
5. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 75–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80
6. Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малащенко Г.Н. Противопожарная защита электрических сетей от токов утечки // Снижение риска гибели людей при пожарах : мат. XVIII науч.-практ. конф. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 2003. С. 182–185.
7. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с. ISBN 978-5-9901554-2-8.
8. Пехотиков В.А., Болодьян И.А., Рябиков А.И., Грузинова О.И. Пожар на останкинской телебашне в 2000 году. Хроника событий // Пожарная безопасность. 2017. № 4. С. 108–112.
9. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behaviour of electrical cables // Conference SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”. Toronto, 2007.
10. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance // Journal of electrical insulation IEEE. 1986. Vol. 2-H 4. P. 128.
11. US DOE/NRC/EPRI. Cable Research in Light Water Reactor Related to Mechanisms of Cable Degradation: Understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations. 2013.
12. IAEA, Assessing and Managing Cable Ageing In Nuclear Power Plants; NP-T3. 6, Vienna, 2012.
13. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2013.
14. SAND 2015-1794. Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants : a Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring. 2015.
15. CNSC, 13395-REP-00001. “Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations”. September 2012.

16. Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C. Fire performance of Wire and Cable: Reaction to Fire Tests — a Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts. NIST Technical Note 1291, Dec. 1991.
17. Edvard Csanyi. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources) // EEP — Electrical Engineering Portal. 2019, 29 April. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
18. International Atomic Energy Agency, Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants // Final Results of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC1825. Vienna, 2017.
19. Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. NEA/CSNI/R(2018)8 // Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. 2018. 58 p. URL: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2018\)8&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En)
20. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Анализ особенностей горения полимерной изоляции кабелей при их групповой прокладке // Наука и техника. 2010. № 5 (324). С. 10–14.
21. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony C.H. Cheng and WK Chow: “Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment” // Journal of Fire Sciences. 2019. DOI: 10.1177/0734904119860410
22. Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях атомных электростанций с водно-водяными реакторами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 304 с.

REFERENCES

1. Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Puzach S.V. Evaluation of functioning of signal cables of safety channels in nuclear stations under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):51-58. DOI: 10.22257/0869-7493.2020.29.04.51-58 (rus).
2. Lebedchenko O.S. *Assessment of ensuring correct operation of nuclear power plant safety channel cables in fire conditions : collection of materials of the 8th scientific and practical conference “Roitman readings”*. Moscow, Academy of GPS of EMERCOM of Russia, 2020; 72-75. (rus).
3. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Zykov V.I. Application efficiency of swelled up fire-protective coatings for power cables of safety systems channels in nuclear stations under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):36-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47 (rus).
4. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Chistyakov T.I. Operability evaluation of electrical wires and cables subjected to simultaneous fire and current loadings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):56-67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67 (rus).
5. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Evaluation of the Toxicity of Flame Retardant Signal Cables in Case of Fire in the Industrial Premises. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:75-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80 (rus).
6. Zykov V.I., Anisimov Yu.N., Malashenkov G.N. Fire protection of electrical networks from leakage currents. *Reducing the risk of loss of life in fires : materials of the XVIII scientific-practical Conf. Part 1*. Moscow, VNIPO, 2003; 182-185. (rus).
7. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical installations*. Moscow, LLC “Cable”, 2009; 328 (rus).
8. Pekhotikov V.A., Bolodyan I.A., Ryabikov A.I., Gruzinova O.I. Fire at the Ostankino TV tower in 2000 Chronicle of events. *Fire safety*. 2017; (4):108-112.
9. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behaviour of electrical cables. *Conference SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”*. Toronto, 2007.
10. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance. *Journal of electrical insulation IEEE*. 1986; 2-H 4:128.
11. US DOE/NRC/EPRI: “Cable Research in Light Water Reactor Related to Mechanisms of Cable Degradation: Understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations...”. 2013.
12. IAEA, Assessing and Managing Cable Ageing In Nuclear Power Plants; NP-T3.6. Vienna, 2012.
13. SAND 2013-2388. *NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2013.
14. SAND 2015-1794. *Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants : a Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring*. 2015.
15. CNSC, 13395-REP-00001. “Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations”. September 2012.

16. Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C. *Fire performance of Wire and Cable: Reaction to Fire Tests — A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts*. NIST Technical Note 1291, Dec. 1991.
17. Edvard Csanyi. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). *EEP — Electrical Engineering Portal*. 2019, 29 April. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
18. International Atomic Energy Agency, Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. *Final Results of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC1825*. Vienna, 2017.
19. Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. NEA/CSNI/R(2018)8. *Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations*. 2018; 58. URL: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2018\)8&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En)
20. Meshchanov G.I., Kholodnyy S.D. Analysis of the burning characteristics of polymer insulation of cables during their group laying. *Science and technology*. 2010; 5(324):10-14. (rus).
21. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony C.H. Cheng and WK Chow: “Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment”. *Journal of Fire Sciences*. 2019. DOI: 10.1177/0734904119860410
22. Puzach S.V., Lebedchenko O.S. *Mathematical modeling of the dynamics of fire hazards in passive fire protection in the main buildings of nuclear power plants with water-cooled reactors : monograph*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 304. (rus).

Поступила 30.08.2023, после доработки 05.09.2023;

принята к публикации 18.09.2023

Received August 20, 2023; Received in revised form September 5, 2023;

Accepted September 18, 2023

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна, канд. юр. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

ЗЫКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Olga S. LEBEDCHENKO, Cand. Sci. (Legal), Docent, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

Vladimir I. ZYKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Professor of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

ХОЛОСТОВ Александр Львович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0003-2299-4221; e-mail: a.holostov@academygps.ru

ЧИСТЯКОВ Тимур Игоревич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Aleksander L. KHOLOSTOV, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2299-4221; e-mail: a.holostov@academygps.ru

Timur I. CHISTYAKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.