

## Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко,  
Владимир Иванович Зыков, 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 при одновременной токовой нагрузке используются, в качестве одного из способов защиты от теплового потока, вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Однако влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей в случае реального режима пожара не исследовано.

**Цели и задачи.** Целью статьи является экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке. При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

**Теоретические основы.** В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Поэтому процесс деструкции изоляции может случиться до начала вспучивания покрытия.

**Результаты и их обсуждение.** Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить постепенный нагрев кабеля с заданным шагом изменения температуры и измерять электрические характеристики кабеля. Получены зависимости удельного сопротивления, индуктивности и емкости распространенных электрических кабелей от температуры окружающего кабель воздуха. Обнаружено, что постепенный нагрев электрического проводника или кабеля приводит в конечном итоге к короткому замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Показано, что фазы и амплитуды входного электрического сигнала могут существенно изменяться до наступления короткого замыкания.

**Выводы.** В случае одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели в них происходит короткое замыкание в диапазоне температур, в котором еще не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

**Ключевые слова:** ток нагрузки; силовой кабель; сигнальный кабель; температурный режим; изоляция; терморазложение

**Для цитирования:** 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.

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: [puzachsv@mail.ru](mailto:puzachsv@mail.ru)

## Operability evaluation of electrical wires and cables subjected to simultaneous fire and current loadings

Sergey V. Puzach ✉, Olga S. Lebedchenko, Vladimir I. Zykov, Timur I. Chistyakov

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

## ABSTRACT

**Introduction.** Intumescent coatings are used as a means of protection from heat flows, and their mission is to preserve the operability of wires and cables under fire conditions coupled with simultaneous current loading. However, the effect of insulation destruction on the operability of cables has not been studied for the case of a real fire regime.

**Goals and objectives.** The purpose of the article is to evaluate the experimental operability of electrical wires and cables subjected to simultaneous effects of fire and current loadings.

To achieve this purpose, an experimental testing unit was applied to conduct the experimental testing of wires and cables manufactured by various producers. At the same time, the temperature effect of the heated environment on electrical parameters of wires and cables, such as resistivity, inductance and capacitance, was evaluated.

**Theoretical background.** In real fire conditions, dependence of indoor temperature, affecting the heating of cable insulation, differs essentially from the same dependencies in cases of various standard fire conditions. Therefore, the insulation destruction process may occur before the coating intumescence starts.

**Results and discussion.** An experimental testing unit has been developed. This unit allows for the gradual cable heating with a pre-set temperature measurement interval and cable electrical characteristics. Dependencies of resistivity, inductance and capacitance of standard electrical cables on the temperature of the air surrounding the cable are obtained. It's been discovered that the gradual heating of an electrical conductor or cable eventually leads to a short circuit between its conductive cores and further electric current transmission in electrical wires and cables. It is shown that phases and amplitudes of an input electrical signal can drastically change before the short circuit.

**Conclusions.** The simultaneous effect of fire and current loadings on standard electrical wires and cables causes a short circuit in the temperature range, in which no intumescence of flame retardant coatings is initiated on the insulation surface. Therefore, these coatings can ineffectively maintain the operability of electrical wires and cables.

**Keywords:** load current; power cable; signal cable; thermal behaviour; insulation; thermal decomposition

**For citation:** 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).

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

## Введение

Нарушение изоляции в электропроводах и кабелях, вызываемое повышением их температуры, перенапряжениями, старением изоляции и механическими повреждениями может привести к короткому замыканию [1–20]. Из-за этого за короткий промежуток времени выделяется большое количество тепла в проводниках, вследствие чего изоляция начинает гореть и возникает пожар, часто приводящий к большому материальному ущербу, травмированию или гибели людей. Поэтому в ПУЭ устанавливаются предельно длительно допустимые значения температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение равно 70 °С.

С начала 2021 г. из-за короткого замыкания электропроводки произошло около 800 пожаров.

Например, 7 мая 2022 г. в подмосковных Мытищах произошел пожар в двухэтажном здании сварочного цеха<sup>1</sup>. Площадь возгорания составила 225 м<sup>2</sup> (рис. 1). Причиной возгорания является КЗ в электросети.

Пожар в антенной части останкинской башни на отметке 450 м, произошедший 27 августа 2000 г., показал, что при перегрузке силовых кабелей (волноводов) начался их нагрев до температуры плавления



**Рис. 1.** Пожар в здании сварочного цеха, вызванный коротким замыканием

**Fig. 1.** A fire in a welding shop building caused by a short circuit

ния полихлорвиниловой внешней изоляции кабеля до температуры более 200 °С, что привело к последующему короткому замыканию токопроводящих жил кабеля [17].

В соответствии со статьей 82 (п. 2)<sup>2</sup>, кабельные линии и электропроводка систем противопожарной защиты, средств обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны, систем обнаружения пожара, оповещения и управления

<sup>1</sup> Четыре человека погибли при пожаре в подмосковных Мытищах // Инфо 24. URL: <https://info24.ru/news/chetyre-cheloveka-pogibli-pri-pozhare-v-podmoskovnyh-mytishah.html>

<sup>2</sup> ФЗ № 123. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. 156 с.

эвакуацией людей при пожаре, аварийного освещения на путях эвакуации, аварийной вентиляции и противодымной защиты, автоматического пожаротушения, внутреннего противопожарного водопровода, лифтов для транспортировки подразделений пожарной охраны в зданиях и сооружениях должны сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для выполнения их функций.

Именно для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке используются, в качестве одного из способов защиты от теплового потока, вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

В работе [3] представлены результаты теоретической оценки эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки. Показано, что процесс деструкции материала изоляции кабелей происходит до начала вспучивания огнезащитного покрытия (за исключением углеводородного режима пожара). Однако влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей не исследовано.

Изложенное выше говорит о недопустимости нагрева проводов и кабелей каналов до момента разрушения изоляции этих кабелей и последующего короткого замыкания токоведущих жил, что может привести, например, к невозможности дальнейшей передачи информации по каналам связи.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных и теоретических исследований воздействия пожара на сигнальные и силовые провода и кабели и изменение их электрических параметров при нагреве являются исключительно актуальными.

Целью статьи является экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке. При этом оценивалось влияние температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

## Стандартные испытания на работоспособность

Испытания электрических и оптических кабелей на сохранение ими работоспособности в условиях воздействия пламени проводятся в соответствии с Государственным стандартом Российской Федерации<sup>3</sup>.

Согласно Стандарту, происходит воздействие пламени температурой не менее 750 °С. При этой температуре происходит гарантированное вспучивание огнезащитного состава, нанесенного на поверхность кабеля. Однако при реальном пожаре температура газовой среды помещения может нарастать медленно. Как показано в работе [3], в этом случае может не произойти вспучивание состава, что приводит к терморазложению материала изоляции кабелей.

В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Поэтому начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия.

По этой причине необходима разработка экспериментальной установки, позволяющей плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха.

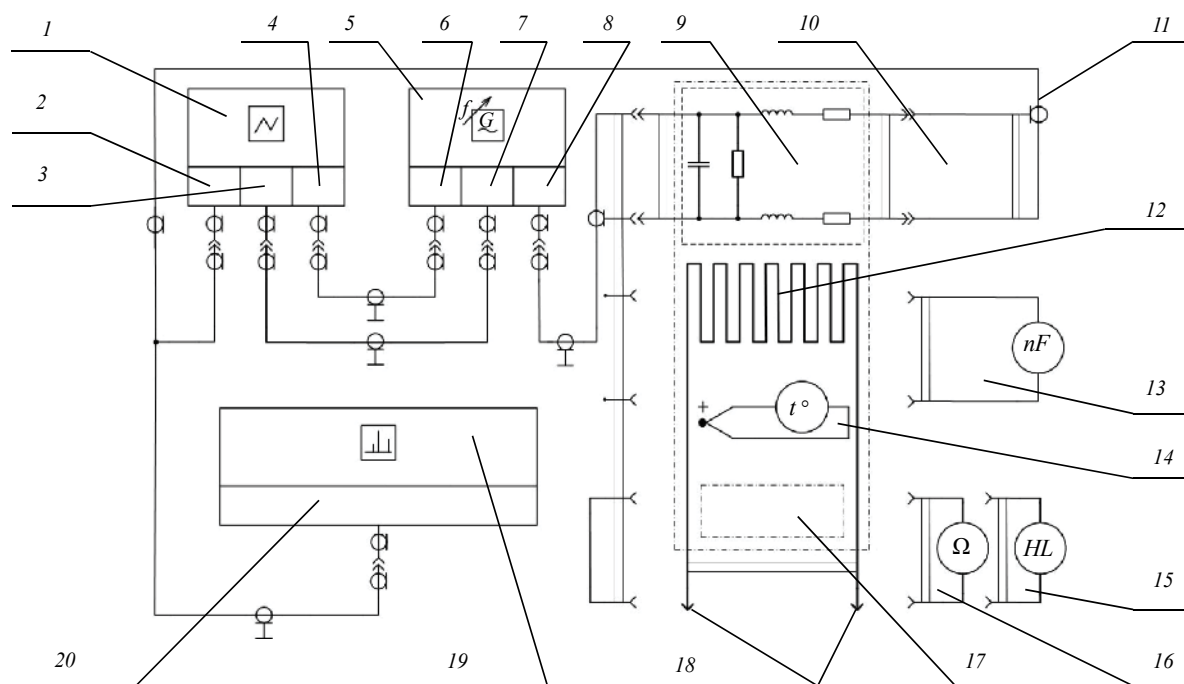
Кроме того, в стандартной установке изучается только возникновение короткого замыкания без измерения амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода, что является необходимым для оценки прохождения сигнала по сигнальным кабелям.

## Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для проведения натурных испытаний был разработан экспериментальный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 2. Фотография стенда приведена на рис. 3.

Сигнал синусоидальной формы, амплитудой напряжения 2В и частотой  $2 \cdot 10^5$  Гц с одного из выходов (1) генератора (2) поступает в исследуемый образец кабеля или провода (3). На рис. 2 изображена эквивалентная схема испытуемого образца с распределенными по длине образца электрическими параметрами: емкостью, индуктивностью и сопротивлениями проводников и изоляции. На электрические параметры провода

<sup>3</sup>ГОСТ Р МЭК 60331–21–2003. 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.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 — двухлучевой осциллограф; 2 — вход № 1 осциллографа; 3 — вход № 2 осциллографа; 4 — вход синхронизации осциллографа; 5 — генератор гармонического сигнала; 6 — вход синхронизации генератора гармонического сигнала; 7 — выход № 2 генератора гармонического сигнала; 8 — выход № 1 генератора гармонического сигнала; 9 — эквивалентная схема исследуемой кабельной линии; 10 — разъем наблюдения формы и спектра исследуемого сигнала; 11 — коаксиальная линия связи исследуемой кабельной линии и измерительных приборов; 12 — нагреватель муфельной печи; 13 — прибор измерения электрической емкости; 14 — измеритель температуры в нагревательной камере муфельной печи; 15 — прибор измерения электрической индуктивности; 16 — прибор измерения электрического сопротивления постоянному току; 17 — муфельная печь; 18 — электрическое питание муфельной печи со ступенчатым управлением мощностью нагрева; 19 — анализатор спектра гармоник исходного синусоидального сигнала; 20 — вход № 1 анализатора спектра

**Fig. 2.** Scheme of an experimental unit: 1 — double-beam oscilloscope; 2 — oscilloscope input 1; 3 — oscilloscope input 2 of; 4 — oscilloscope synchronization input; 5 — harmonic signal generator; 6 — synchronization input of harmonic signal generator; 7 — output 2 of harmonic signal generator; 8 — output 1 of harmonic signal generator; 9 — equivalent diagram of the cable line under investigation; 10 — connector for observing the shape and spectrum of the signal under investigation; 11 — coaxial communication line in the cable line under investigation and measuring instruments; 12 — muffle furnace heater; 13 — capacitance measuring device; 14 — temperature meter in the heating chamber of a muffle furnace; 15 — electrical inductance measuring device; 16 — direct current resistance measuring device; 17 — muffle furnace; 18 — electric power supply to the muffle furnace with a stepped control of the heating capacity; 19 — harmonic spectrum analyzer of the original sinusoidal signal; 20 — input 1 of the spectrum analyzer



**Рис. 3.** Общий вид стенда для проведения испытаний проводов и кабелей

**Fig. 3.** General view of a testing unit for wires and cables

оказывает воздействие тепловой поток и температура нагреваемой окружающей среды внутри муфельной печи (7).

Сигнал с выхода испытуемого образца поступает на один из входов (1) двухлучевого осциллографа (1). На второй вход (2) осциллографа поступает образцовый синусоидальный сигнал с выхода (1) генератора (2). Оба сигнала (изучаемый и образцовый) отображаются на экране двухлучевого осциллографа для их сравнения и визуального контроля изменений параметров амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода (рис. 4).

Для контроля уровня шума и спектра сигнала используется анализатор спектра (8), на вход (1) которого поступает сигнал с выхода испытуемого образца провода (рис. 5).



**Рис. 4.** Визуальный контроль формы сигнала на экране осциллографа: 1 — образцовый сигнал; 2 — сигнал с выхода испытуемого образца

Fig. 4. Visual control of the wave form on the oscilloscope screen: 1 — sample signal; 2 — signal generated by the tested specimen

Предположительно, воздействие тепловой энергии должно вызвать изменение формы, спектра и уровня шума гармонического сигнала при его прохождении через испытываемый образец провода, а также изменения емкости, индуктивности и сопротивления по длине испытываемого образца.

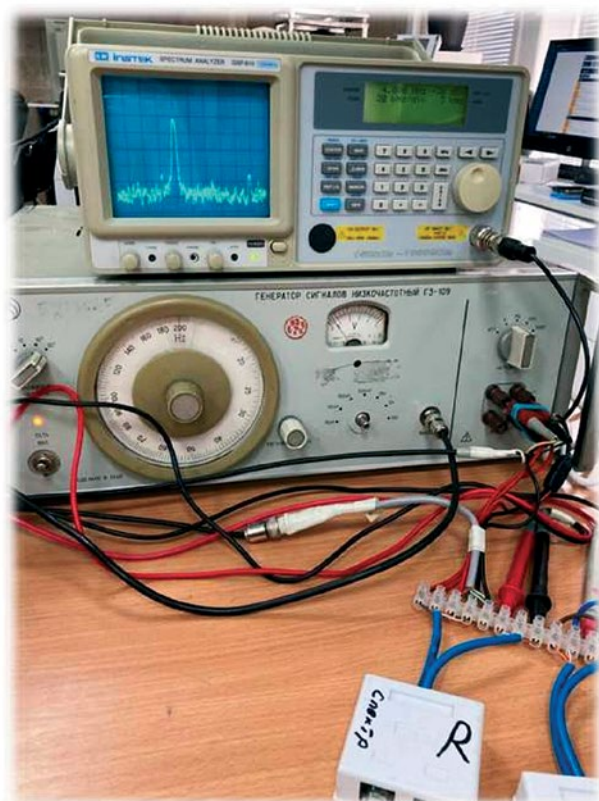
Температура в муфельной печи (7) изменяется программируемым контроллером с равными про-

межутками установившейся температуры, в момент которых происходят наблюдение и измерение электрических параметров сигнала. Установление температуры в печи необходимо для того, чтобы изоляция кабеля прогрелась до этой температуры.

В процессе визуального контроля формы и спектра сигнала, в момент стабилизации температуры в камере муфельной печи последовательно производится контроль емкости, индуктивности и сопротивления испытываемого образца. Для измерения величины электрической емкости образец провода левым (по схеме на рис. 2) концом подключается к разъему с пустыми контактами, а правым — к тестеру (4), включенному в режим измерения емкости (рис. 6).

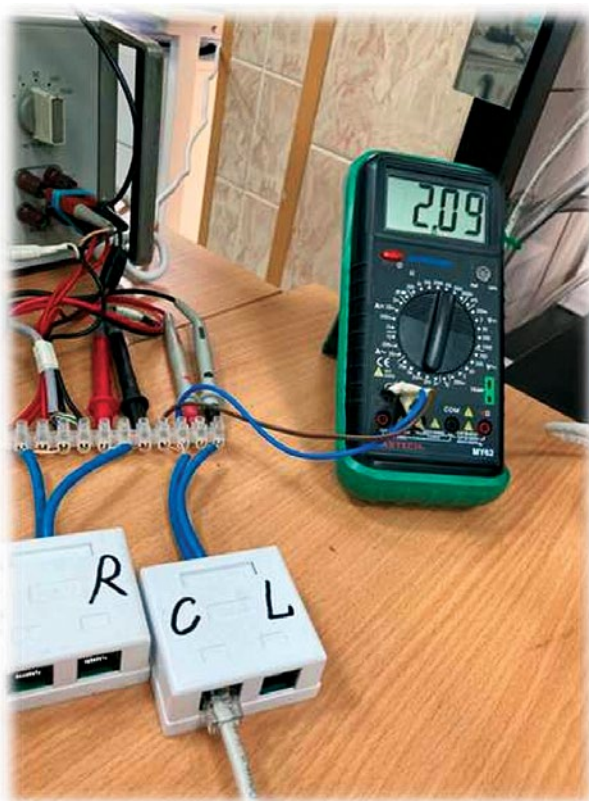
Для контроля величины электрической индуктивности испытуемый образец левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым — к тестеру (5), включенному в режим измерения индуктивности (рис. 7).

Для контроля величины электрического сопротивления образец провода левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым концом — к тестеру (6), включенному в режим измерения сопротивления (рис. 7).



**Рис. 5.** Визуальный контроль спектра сигнала на экране анализатора спектра

Fig. 5. Visual control of the signal spectrum on the spectrum analyzer screen



**Рис. 6.** Измерение электрической емкости испытуемого образца тестером

Fig. 6. Using the analyzer to measure the electrical capacitance of a tested specimen



**Рис. 7.** Измерение параметров индуктивности и сопротивления испытуемого образца с помощью тестера

**Fig. 7.** Using the analyzer to measure the inductance and resistance parameters of a tested specimen

### Исходные данные для проведения экспериментов

Проводились экспериментальные исследования следующих электрических проводов и кабелей:

- кабельная линия типа витая пара «hold-key e191267 ul cm 75 с utp 4pr 24awg etl verified cat5e tia/eia-568-b.2 0262ft (12/03)»<sup>4</sup>, используемая для прокладки внутри и вне помещений, в коробах, стенах, а также в телефонных сетях;
- кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2<sup>5</sup>, используемая для автоматического включения и выключения нагрузки при появлении движущихся объектов в зоне обнаружения датчика, включения освещения в помещении при открывании двери, автоматического открывания дверцы шкафа по движению ладони, включения сигнализации при открытии окна, контроля движения продукции на конвейере на производстве, контроля положения подвижных механизмов в пространстве (лифтовое и подъемное оборудование, ворота с автоматическими приводами) и др.;
- кабельная линия типа КМВЭВ 1×2×1,5<sup>6</sup> предназначена для применения в различных системах сигнализации и блокировки, в системах пожарной сигнализации, системах оповещения, связи, для

внутри- и межблочного монтажа различной аппаратуры и т.п. (с рабочим переменным напряжением не более 300 В и постоянным не более 420 В).

Свойства кабелей витой пары были следующими: материал проводников — медь; диаметр проводника 0,51 мм; толщина полиэтиленовой изоляции проводников 0,25 мм; толщина ПВХ изоляции кабеля 0,5 мм.

Кабели из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 имели следующие свойства: материал проводников — сталь; диаметр проводника 1,2 мм; изоляция: виниловый пластикат; толщина изоляции 0,3 мм.

Свойства кабеля типа КМВЭВ 1×2×1,5 были следующими: материал проводника — медь; диаметр проводника 1,5 мм; толщина изоляции проводника 0,35 мм; толщина изоляции кабеля 0,8 мм.

Для равномерности нагрева испытуемые образцы проводов и кабелей были свернуты в форме спирали (рис. 8).

При достижении температуры в пределах 149–190 °С для различных типов кабелей и проводов, испытываемых в данной работе, происходит разрушение изоляции испытуемого проводника и последующее короткое замыкание токопроводящих жил проводника. При этом передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

### Результаты экспериментов и их анализ

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры приведены в табл. 1, 2.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 при воздействии температуры представлены в табл. 3.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры показаны в табл. 4. Для исследования изменения спектра использован генератор синусоидального сигнала частотой 200 кГц.

Из табл. 1–4 видно, что при нагреве всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание произошло при температурах окружающей среды в диапазоне 149–190 °С.

При испытаниях витой пары (табл. 1 и 2) и кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 (табл. 4) изменения фазы и амплитуды входного сигнала не произошло.

В экспериментах с двухжильным нагревательным проводом типа ПНСВ 1×1,2 (табл. 3) при температуре 120 °С начался сдвиг фазы синусоидального сигнала, при 170 °С произошли скачки амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала, а при 180 °С установился стабильный

<sup>4</sup> Category 5 cable // Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Category\\_5\\_cable](https://en.wikipedia.org/wiki/Category_5_cable)

<sup>5</sup> Tdm Провод нагревательный ПНСВ 1×1,2 мм SQ0125-0001 // TDMelectric. URL: [http://www.tdm-rus.ru/goods/tdm\\_sq0125-0001.htm?frommarket=&ymclid=164914905402\\_70571\\_198500014](http://www.tdm-rus.ru/goods/tdm_sq0125-0001.htm?frommarket=&ymclid=164914905402_70571_198500014)

<sup>6</sup> Кабель КМВЭВ // Кабельные системы. URL: <https://kabel-s.ru/catalog/kmvev/kmvev-1x2x1-5/>



**Рис. 8.** Образцы кабелей и проводов и их размещение в муфельной печи: *a* — образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 после воздействия температуры в муфельной печи; *b* — образец кабеля типа витая пара в муфельной печи; *c* — образец провода типа КМВЭВ 1×2×1,5; *d* — образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2; *e* и *f* — образцы кабеля типа витая пара

**Fig. 8.** Specimens of cables and wires and their arrangement in a muffle furnace: *a* — a specimen of a two-core heating wire of 1×1.2 PNSV type after exposure to a temperature effect in a muffle furnace; *b* — a specimen of a “twisted pair” cable in a muffle furnace; *c* — a specimen of a wire of the KMVEV type 1×2 ×1.5; *d* — a specimen of a two-core heating wire of the PNSV type 1×1.2; *e* and *f* are specimens of the twisted pair type cable

**Таблица 1.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент № 1)

**Table 1.** Measured electrical parameters of a twisted pair cable line subjected to the temperature effect (Experiment 1)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{пФ}$<br>$C, \text{pF}$ | $L, \text{мГн}$<br>$L, \text{mH}$ | Примечания<br>Notes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 22                  | 9,2                           | 2,05                             | 0,026                             | Длина медного кабеля:<br>в нагреваемом образце 7,0 м;<br>в подводящей (холодной части) 4,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления<br>и индуктивности 88 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости<br>и формы сигнала 44 м<br>Length of copper cable:<br>in a heated specimen of 7.0 m;<br>in the feeding (cold) line of 4.0 m.<br>The total length of the wire when resistance and inductance were<br>measured is 88 m.<br>The total length of a pair of wires, when capacitance and signal<br>strength were measured, is 44 m |
| 60                  | 8,6                           | 1,26                             | 0,027                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 80                  | 8,9                           | 1,2                              | 0,027                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 100                 | 9,9                           | 1,2                              | 0,026                             | Короткое замыкание проводников<br>Short-circuit of the conductors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 149                 | 3,5                           | 0                                | 0,003                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

**Таблица 2.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент № 2)**Table 2.** Measured electrical parameters of a twisted pair cable line subjected to the temperature effect (Experiment 2)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{пФ}$<br>$C, \text{pF}$ | $L, \text{мГн}$<br>$L, \text{mH}$ | Примечания<br>Notes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20                  | 8,9                           | 2,11                             | 0,028                             | Длина медного кабеля витая пара:<br>в нагреваемом образце 7,0 м;<br>в подводящей (холодной части) 4,5 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 92 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 46 м<br>Length of copper cable twisted pair:<br>in a heated sample of 7.0 m;<br>in the supply (cold part) 4.5 m.<br>The total length of the wire is 92 m at the time when resistance and inductance are measured.<br>The total length of a pair of wires is 46 m when capacitance and waveform are measured |
| 40                  | 9,2                           | 2,12                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 60                  | 9,5                           | 1,24                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 80                  | 10,0                          | 1,24                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 100                 | 10,0                          | 1,24                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 120                 | 10,1                          | 1,24                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 130                 | 10,6                          | 1,25                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 140                 | 10,9                          | 1,28                             | 0,028                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 150                 | 10,9                          | 1,27                             | 0,027                             | <b>Короткое замыкание проводников</b><br><b>Short-circuit of conductors</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 151                 | 4,4                           | 0                                | 0,005                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 170                 | 1,9                           | 0                                | 0,003                             | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

**Таблица 3.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 при воздействии температуры**Table 3.** Measured electrical parameters of a cable line made of a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type subjected to a temperature effect

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{пФ}$<br>$C, \text{pF}$ | $L, \text{мГн}$<br>$L, \text{mH}$ | Примечания<br>Notes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20                  | 5,7                           | 0,398                            | 1,37                              | Длина кабеля со стальными проводами в нагреваемом образце 15,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 30,0 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 15,0 м<br>Length of cable with steel wires in a heated specimen, 15.0 m.<br>The total length of the wire when resistance and inductance are measured is 30.0 m.<br>The total length of a pair of wires when capacitance and waveform are measured is 15.0 m |
| 40                  | 7,1                           | 0,399                            | 1,38                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 60                  | 6,3                           | 0,399                            | 1,39                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 80                  | 6,8                           | 0,398                            | 1,39                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 100                 | 6,9                           | 0,398                            | 1,40                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 110                 | 7,3                           | 0,397                            | 1,40                              | <b>Сдвиг фазы синусоидального сигнала</b><br><b>Phase shift of the sinusoidal signal</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 120                 | 7,4                           | 0,397                            | 1,41                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 130                 | 7,7                           | 0,398                            | 1,42                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 140                 | 7,9                           | 0,398                            | 1,42                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 150                 | 8,1                           | 0,411                            | 1,43                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 160                 | 8,4                           | 0,410                            | 1,43                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 170                 | 8,9                           | 0,440                            | 1,44                              | <b>Скачки амплитуды сигнала на спектрограмме</b><br><b>Signal amplitude jumps on the spectrogram</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 180                 | 9,1                           | 0,440                            | 1,43                              | <b>Стабильный характер изменения амплитуды сигнала на спектрограмме</b><br><b>Stable nature of a change in signal amplitude on the spectrogram</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 190                 | 3,8                           | 0,23                             | 0,38                              | <b>Короткое замыкание проводников</b><br><b>Short-circuit of conductors</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 200                 | 1,8–4,6                       | 0,122                            | 0,07                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 220                 | 2,5                           | 0,26                             | 0,09                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 250                 | 2,4–3,0                       | 0,04                             | 0,05                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

**Таблица 4.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры

**Table 4.** The results of measuring the electrical parameters of the cable line type KMVEV 1×2×1.5 when exposed to temperature

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{ Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{ пФ}$<br>$C, \text{ pF}$ | $L, \text{ мГн}$<br>$L, \text{ mH}$ | Примечания<br>Notes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20                  | 1,4                            | 0,847                              | 0,007                               | Длина кабеля с медными проводами в нагреваемом образце 6,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 12,0 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 6,0 м<br>Cable length with copper wires in a heated specimen of 6.0 m.<br>The total wire length at the time when resistance and inductance are measured is 12.0 m.<br>The total length of a pair of wires when capacitance and waveform are measured is 6.0 m |
| 40                  | 1,4                            | 0,934                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 60                  | 1,4                            | 1,049                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 80                  | 1,4                            | 1,155                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 100                 | 1,4                            | 1,169                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 110                 | 1,4                            | 1,174                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 120                 | 1,4                            | 1,196                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 130                 | 1,4                            | 1,217                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 140                 | 1,4                            | 1,248                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 150                 | 1,4                            | 1,293                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 160                 | 1,4                            | 1,410                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 170                 | 1,4                            | 1,605                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 180                 | 1,4                            | 2,030                              | 0,007                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 187                 | 1,0                            | 0                                  | 0,017                               | Короткое замыкание<br>Short-circuit of conductors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме (рис. 9).

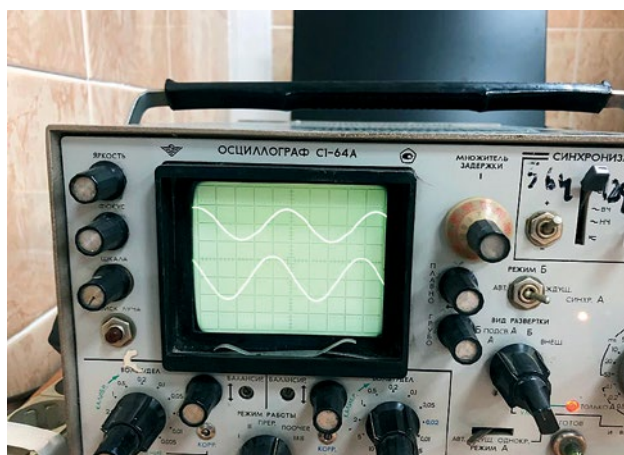
Полученные результаты проведенных экспериментальных испытаний проводов и кабелей различных типов показали, что постепенный нагрев электрического проводника или кабеля приводит к искажению передаваемой информации по сигнальным кабелям в связи со сдвигом фазы и изме-

нением амплитуды сигнала на спектрограмме и, в конечном итоге, к короткому замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Поэтому обработка кабелей огнезащитными вспучивающимися составами с температурой начала вспучивания в диапазоне 180–250 °C [3] может не сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке, так как в процессе нагрева не происходит вспучивание покрытий.

## Выводы

В случае одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание проводников в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

Таким образом, необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных режимов пожара.



**Рис. 9.** Визуальный контроль формы сигнала с двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 на экране осциллографа в момент стабилизации сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме: 1 — образцовый сигнал; 2 — сигнал с выхода испытуемого образца

**Fig. 9.** Visual control of the waveform emitted by a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type on the oscilloscope screen at the moment of phase shift stabilization and signal amplitude change on the spectrogram: 1 — specimen signal; 2 — signal emitted by the tested specimen

## 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: 10.22227/PVB.2020.29.04.51-58
2. Лебедченко О.С. Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара // Ройтмановские чтения : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. г. Москва, 5 марта 2020 г. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 72–75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42880351>
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., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдушкиев 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
5. Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малашенков 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.
6. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электроустановок. М. : Кабель, 2009. 328 с.
7. 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.
8. 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-TEC-DOC1825. Vienna, 2017. 192 p.
9. NEA/CSNI/R(2018)8. 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. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. December 6, 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)
10. Edvard Csanyi. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources) // EEP — Electrical Engineering Portal. April 29, 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>.
11. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance // Journal of electrical insulation EEE. 1986. Vol. 2. No. 4. P. 128.
12. 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. US DOE/NRC/EPRI, 2013.
13. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. NP-T-3.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2012.
14. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 2013.
15. 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.
16. CNSC 13395-REP-00001. Ageing management of cable in nuclear generating stations. 2012.
17. Пехотилов В.А., Болодьян И.А., Рябиков А.И., Грузинова О.И. Пожар на останкинской телебашне в 2000 году. Хроника событий // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2017. № 4. С. 108–112.
18. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony CH Cheng, 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. Vol. 37. Issue 4-6. Pp. 303–319. DOI: 10.1177/0734904119860410
19. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behaviour of electrical cables // SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”. Toronto, 2007.
20. 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. 1991.

## REFERENCES

1. Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Puzach S.V. Assessment of operation of safety channel signal cables at nuclear power plants under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):51-58. DOI: 10.22227/PVB.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. *Roitman readings : Collection of Materials of the 8th Scientific and Practical Conference. Moscow, March 5, 2020*. Moscow, Academy

- my of GPS of EMERCOM of Russia, 2020; 72-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42880351> (rus).
3. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Zykov V.I. The application efficiency of intumescent coatings for power cables of safety systems of nuclear power plants under fire conditions. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):36-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47 (rus).
  4. 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).
  5. 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).
  6. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical installations*. Moscow, Cable Publ., 2009; 328. (rus).
  7. 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).
  8. *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; 192.
  9. NEA/CSNI/R(2018)8. 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. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. December 6, 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)
  10. Csanyi E. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). *EEP — Electrical Engineering Portal*. April 29, 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
  11. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance. *Journal of Electrical Insulation IEEE*. 1986; 2(4):128.
  12. 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. US DOE/NRC/EPRI, 2013.
  13. Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants. NP-T-3.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2012.
  14. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories, 2013.
  15. SAND 2015-1794. Submerged medium voltage cable systems at nuclear power plants: A review of research efforts relevant to ageing mechanisms and condition monitoring. March 2015.
  16. CNSC, 13395-REP-00001. Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations. September 2012.
  17. Pekhotikov V.A., Bolodyan I.A., Ryabikov A.I., Gruzina O.I. Fire on Ostankino TV tower in 2000. Chronicle of events. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2017; 4:108-112. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30775584>
  18. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony CH Cheng, 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; 37(4-6): 303-319. DOI: 10.1177/0734904119860410
  19. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behavior of electrical cables. *SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on "Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations"*. Toronto, August 2007.
  20. 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. 1991.

Поступила 21.09.2022, после доработки 19.10.2022;  
принята к публикации 03.11.2022

Received September 21, 2022; Received in revised form October 19, 2022;

Accepted November 3, 2022

## 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 Author ID: 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

**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 Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

## Вклад авторов:

**Пузач С.В.** — сбор материала, разработка методики и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

**Лебедченко О.С.** — идея, сбор материала, разработка методики и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи.

**Зыков В.И.** — сбор материала, анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

**Чистяков Т.И.** — разработка методики и проведение эксперимента; получение и обработка экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## 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 Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Olga S. LEBEDCHENKO**, Cand. Sci. (Legal), Associate Professor, Associate 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

**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:

**Sergey V. Puzach** — collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of article, scientific editing of text.

**Olga S. Lebedchenko** — idea, collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of an article.

**Vladimir I. Zykov** — collecting material, analyzing experimental data, writing an article, scientific editing of the text.

**Timur I. Chistyakov** — development of the procedure and conduct of the experiment; obtaining and processing experimental data.

The authors declare that there is no conflict of interest.