

Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара

© О.С. Лебедченко, С.В. Пузач✉, В.И. Зыков

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)

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обеспечения безопасного останова и расхолаживания реакторной установки АЭС при пожаре необходимо гарантированное функционирование систем безопасности с выходом из строя не более одного канала безопасности. Однако оценка потери изоляционными материалами силовых кабелей вышеуказанных каналов эксплуатационных свойств в случае их защиты огнезащитными вспучивающимися составами при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки не проводилась.

Цели и задачи. Целью статьи является теоретическая оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов СБ атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара. Для достижения поставленной цели проведен расчет температур наружной поверхности изоляции и вспучивающегося огнезащитного покрытия в зависимости от времени пожара.

Теоретические основы. Для определения распределения температур внутри многослойной изоляции и слоя огнезащиты токопроводящей жилы решается нестационарное одномерное уравнение теплопроводности.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости температур наружной поверхности изоляции и огнезащитного состава в случае трехжильного кабеля ВВГнг(А)-LS 3х2,5-0,66 от температуры газовой среды в помещении для трех стандартных и реального режимов пожара. Обнаружено, что до момента начала процесса деструкции материала изоляции вспучивание огнезащитного покрытия происходит только при углеводородном пожаре. При реальных режимах пожара максимальное время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия при минимальной температуре вспучивания равно 4,75 мин, а максимальное время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции составляет 6,0 мин.

Выводы. Экспериментальное или теоретическое обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных режимов пожара может привести к потере изоляционными материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном пожаре. Поэтому необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных режимов пожара.

Ключевые слова: канал безопасности; стандартный режим пожара; деструкция материала; ток нагрузки; огнезащитная эффективность; вспучивающийся состав; безопасный останов реакторной установки

Для цитирования: 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

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

The application efficiency of intumescent coatings for power cables of safety systems of nuclear power plants under fire conditions

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

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)

ABSTRACT

Introduction. The reliable operation of safety systems, that allows for the failure of no more than one safety system component, entails the safe shutdown and cool-down of an NPP reactor in the event of fire. However, the co-authors have not assessed the loss of performance by an insulating material, treated by intumescent compositions and used in the power cables of the above safety systems exposed to the simultaneous effect of various modes of fire and current loads.

Goals and objectives. The purpose of the article is the theoretical assessment of the application efficiency of intumescent fire-retardant coatings in power cables used in the safety systems of nuclear power plants having water-cooled and water-moderated reactors under fire conditions. To achieve this goal, the temperature of the outer surface of the insulation and the intumescent fire-retardant coating was analyzed depending on the mode of fire.

Theoretical foundations. A non-stationary one-dimensional heat transfer equation is solved to identify the temperature distribution inside the multilayered insulation and the fire-protection layer of a conductive core.

Results and their discussion. The co-authors have identified dependences between the temperature of the outer surface of the insulation and the fire retarding composition of the three-core cable VVGng (A)-LS 3x2.5-0.66, on the one hand, and the temperature of the indoor gas environment for three standard modes of fire and one real fire mode. It is found that before the initiation of the process of destruction of the insulation material, the intumescence of the fire-retardant coating occurs only in case of a hydrocarbon fire. Under real fire conditions, the maximal insulation melting time before the initiation of intumescence of the fire-retardant coating at the minimal temperature of intumescence is 4.75 minutes, while the maximal time period from the initiation of destruction of the insulation material to the moment of the insulation melting is 6.0 minutes.

Conclusions. An experimental or theoretical substantiation of parameters of intumescent fire retardants, performed using standard modes of fire, has proven the potential loss of operational properties by insulating materials of power cables, used in the safety systems of nuclear power plants, in case of a real fire. Therefore, it is necessary to establish a scientific rationale for the efficient use of fire retardants in the above cables with regard for the conditions of a real fire.

Keywords: safety channel; standard mode of fire; destruction of materials; load current; fire-protection efficiency; intumescent composition; safe shutdown of a reactor

For citation: 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):36-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47 (rus).

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

Введение

Одной из основных функций системы пожарной безопасности атомной станции является обеспечение безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при пожаре. Раздел 9 проектной документации АЭС «Перечень мероприятий по обеспечению пожарной безопасности» п. 9.1.3.5 содержит формулировку «...противопожарная защита должна гарантировать функционирование систем безопасности, в случае пожара, допускается выход из строя не более одного канала систем безопасности».

В тех пожароопасных зонах, где имеет место расположение элементов разных каналов (электрических кабелей силовой и контрольной сетей) систем безопасности (СБ), ликвидация пожара должна быть обеспечена на начальной стадии его развития в пределах одного канала СБ (п. 9.1.3.7. Раздела 9 ПД АЭС). Это означает, что в таких помещениях, как блочный пульт управления, резервный пульт управления, гермозона и межблочное пространство реакторного здания, где, согласно особенностям технологического процесса, сходятся все каналы СБ, электрические кабели остальных каналов СБ должны сохранять работоспособность.

В работах [1, 2] представлены результаты теоретической оценки возможности сигнальных кабелей СБ АЭС передавать корректно модулированный электрический сигнал при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки. Для ее достижения решалась задача теоретического исследования температуры токопроводящей жилы сигнального кабеля на начальной стадии пожара. Однако в вы-

шеуказанной работе решалось стационарное уравнение теплопроводности, что не позволяло оценить динамику режима нагрева электрического кабеля.

Известно, что повышение температуры проводов и кабелей приводит к преждевременному высыханию изоляции и, как следствие [3–17], перегрев проводов и кабелей сверхдопустимых величин может повлечь пожары. Поэтому в ГОСТ 31996-2012 устанавливаются длительно допустимые значения температуры нагрева токопроводящих жил проводов и кабелей. Так, например, длительно допустимое значение температуры для жилы проводов с изоляцией ПВХ — пластика, ПВХ — пластикутов пониженной пожарной опасности и полимерных композиций, не содержащих галогенов, составляет 70 °С.

Загорание, перешедшее в крупный пожар, охвативший большую часть Останкинской телебашни, произошло 27 августа 2000 г. Причиной аварии, как следовало из выводов Генпрокуратуры РФ, стало «нарушение противопожарных правил, в результате чего на высоте 450 метров произошло короткое замыкание, загорелась оплетка высокочастотных кабелей (волноводов), вследствие чего огонь за счет потока горящих капель расплавленного полиэтилена быстро распространился вниз по башне» [18].

Таким образом, пожар начал распространяться не только вверх, но и вертикально вниз по шахте. Распространение пожара достигло нижней отметки 67 м, где он был остановлен в результате героических действий московских пожарных. На отметке 62 м Останкинской башни находилось аппаратное помещение с дорогостоящей радиопередающей аппаратурой и аппаратурой телевизионного веща-

ния. Их уничтожение привело бы к остановке телевизионного и радиовещания на несколько месяцев на территории не только Московской области, но и Российской Федерации.

Изложенное выше свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы. Цель статьи — теоретическая оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов СБ атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки.

Для ее достижения были рассмотрены следующие температурные режимы пожара:

- стандартный, углеводородный и медленно развивающийся (тлеющий)¹;
- реальный режим пожара в кабельном этаже АЭС с водо-водяными реакторами, в котором проходит, как минимум, два канала СБ.

В случаях вышеуказанных режимов проведен расчет температур наружной поверхности изоляции и вспучивающегося огнезащитного покрытия в зависимости от времени пожара.

Теоретические основы

Решается сопряженная нестационарная задача теплоотдачи при нагреве кабелей СБ АЭС от воздействия пожара и токовой нагрузки.

Расчет динамики нагрева кабелей проводился для трех стандартных режимов пожара (стандартного, углеводородного и медленно развивающегося (тлеющего)) и реального режима пожара в кабельном этаже БПУ АЭС с водо-водяными реакторами, в которых проходят, как минимум, два канала без опасности.

Предполагаем одинаковую по периметру изоляции и длине кабеля плотность теплового потока, падающего на поверхность изоляции от газовой среды помещения.

В этом случае для определения распределения температур внутри многослойной изоляции токопроводящей жилы решается нестационарное одномерное уравнение теплопроводности [19]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;

c — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

τ — время, с;

y — координата, направленная по толщине материала, м;

λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);

T — температура, К.

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов [20].

Предполагается идеальный тепловой контакт между слоями изоляции, изготовленными из различных материалов, а также слоем огнезащитного состава, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции кабеля.

В случаях стандартных режимов пожара задаются граничные условия 3-го рода [19] в соответствии с данными нормативных документов^{1,2}.

При стандартном режиме пожара к уравнению (1) граничные условия 3-го рода имеют вид:

- температура среды T_m изменяется в соответствии с кривой «стандартного» пожара:

$$T_m = 345 \lg(0,133\tau + 1) + T_0; \quad (2)$$

где τ — время, с; T_0 — начальная температура в помещении, К.

- коэффициент теплоотдачи от газовой среды к поверхности изоляции равен $\alpha = 35$ Вт/(м²·К). При углеводородном режиме пожара граничные условия 3-го рода принимаются в виде:
- температура среды изменяется по формуле:

$$T_m = 1080 \left[1 - 0,325e^{-0,167\tau} - 0,67e^{-2,5\tau} \right] + 20; \quad (3)$$

- коэффициент теплоотдачи $\alpha = 50$ Вт/(м²·К).

В случае медленно развивающегося (тлеющего) режима пожара:

- температура среды изменяется в соответствии со следующими выражениями:

при $0 < \tau \leq 21$ мин:

$$T_m = 154\tau^{0,25} + 20; \quad (4)$$

при $\tau > 21$ мин:

$$T_m = 345 \log_{10} (8(\tau - 20) + 1) + 20; \quad (5)$$

- коэффициент теплоотдачи $\alpha = 35$ Вт/(м²·К).

Для реального режима пожара температура в помещении определяется с использованием интегральной математической модели пожара [21].

¹ ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы : введен 01.06.2015.

² Национальный стандарт Российской Федерации. НСР ЕН 1991-1-2-2011. ЕВРОКОД 1: Воздействия на сооружения. Часть 1-2: Основные воздействия — Воздействия на сооружения при пожаре (1-я редакция). М. : ОАО «НИИЦ «Строительство», 2011.

Среднеобъемная температура газовой среды в помещении пожара T_m находится из уравнения закона сохранения энергии и уравнения состояния [21]:

$$\frac{V}{k_m - 1} \frac{dp_m}{d\tau} = \eta \Psi Q_n^p + c_{pa} T_a G_a - c_{pm} T_m G_m - Q_\Sigma - Q_{пр}, \quad (6)$$

$$p_m = \rho_m R T_m, \quad (7)$$

где V — объем помещения, м³;

k_m — показатель адиабаты газовой среды в помещении;

p_m — среднеобъемное давление газовой среды, Па;

τ — время, с;

η — полнота сгорания;

Ψ — массовый расход продуктов газификации горючего материала, кг/с;

Q_n^p — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг;

c_{pa}, c_{pm} — удельные изобарные теплоемкости воздуха и газовой среды, Дж/(кг·К);

T_a — температура наружного воздуха, К;

G_a, G_m — массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы, кг/с;

$Q_\Sigma = Q_c + Q_w + Q_f$ — суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции от газовой среды, Вт;

Q_c, Q_w, Q_f — суммарные тепловые потоки, отводимые соответственно в потолок, стены и пол, Вт;

$Q_{пр}$ — тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт;

ρ_m — среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³;

R — газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Коэффициент теплоотдачи определяется в случае вертикальных цилиндров при свободном движении в неограниченном пространстве и повышенной температуре окружающей среды. Горизонтальное расположение электрического кабеля менее опасно для нагрева кабеля [1].

При реальном режиме пожара в случае вертикального расположения провода (при $(GrPr)_m > 10^{10}$) [19]:

$$Nu = 0,15 (GrPr)_m^{1/3} \left(\frac{Pr_m}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ — число Нуссельта;

$Gr = \beta g (T_m - T_w) L^3 / \nu^2$ — число Грасгофа;

Pr — число Прандтля;

β — коэффициент объемного расширения, 1/К;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

T_w — температура наружной поверхности изоляции (или огнезащитного состава) токопроводящей жилы, К;

ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

λ — коэффициент теплопроводности газовой среды помещения, Вт/(м·К);

L — характерный размер при вертикальном расположении провода, м; индекс m означает, что теплофизические свойства берутся при температуре T_m , индекс w — при T_w .

Зависимость удельного сопротивления проводника (медь) от температуры определяется по формуле³:

$$\rho_o = \rho_o^* (1 + 0,0043 (T_c - 20)), \quad (9)$$

где ρ_o — удельное электрическое сопротивление материала токопроводящей жилы при температуре токопроводящей жилы T_c , °С;

$\rho_o^* = 0,0175$ Ом·мм²/м — удельное электрическое сопротивление медной токопроводящей жилы при 20 °С.

Приведенные формулы (1)–(9) позволяют установить, через какое время перегрев изоляции проводника достигнет заданного критического значения.

Исходные данные для проведения численного эксперимента

Рассматриваем силовую кабель ВВГнг(А)-LS 3х2,5 ТУ 16.К71-310-2001 изм. 4, используемый в каналах СБ АЭС с водо-водяными реакторами. Силовые кабели данного типа предназначены для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках при переменном и постоянном напряжении 1,0 кВ.

При реальном режиме пожара принимаем, что кабель находится в кабельном этаже АЭС с площадью пола 102 м² и высотой 3,1 м. Горючим материалом являются кабели НГ. Рассматриваем развитие реального пожара при открытых и закрытых дверях помещения.

Сила тока принималась равной 6 А (максимальная величина тока согласно ПУЭ).

Геометрические размеры и теплофизические свойства^{4, 5} [22] материалов жилы и изоляции кабелей, а также сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава представлены в табл. 1.

³ Электрик Инфо. URL: <http://elektrik.info/main/school/1654-elektricheskoe-soprotivlenie-i-ego-zavisimost-ot-temperatury.html>

⁴ Теплопроводность металлов. URL: <https://prompriem.ru/metally/teploprovodnost.html>

⁵ Теплопроводность пластиков и пластмасс, плотность пластмассы — физические свойства полимеров. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svoystva-polimerov>

Таблица 1. Геометрические размеры и теплофизические свойства материалов жилы и изоляции кабелей, а также сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава

Table 1. Physical dimensions and thermophysical properties of the cable core and insulation materials, as well as the dry layer of the intumescent fire-retarding composition

| Материал Material | Наружный диаметр, мм Outer diameter, mm | Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³ | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) Heat transfer coefficient, W/(m·K) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) Specific thermal capacity, J/(kg·K) |
|--|--|--|--|---|
| Жила кабеля (медь) Cable core (copper) | 1,54 | 8900 | 392 | 397 |
| Изоляция кабеля (ПВХ пластикат пониженной пожароопасности с низким дымо- и газовыделением) Cable insulation (low flammability PVC plasticate featuring low smoke and gas emissions) | 5,0 | 1290 | 0,165 | 1680 |
| Сухой слой вспучивающегося огнезащитного состава A dry layer of an intumescent fire-protection composition | 6,0 | 1190 | 0,18 | 2000 |

Критические температуры изоляции кабеля, согласно ГОСТ Р МЭК 60724-2009 Национальный стандарт Российской Федерации «Предельные температуры электрических кабелей на номинальное напряжение 1 кВ (1,2 Кв) и 3 кВ (3,6 кВ) в условиях короткого замыкания», составляют 150–200 °С.

Деструкция изоляции из ПВХ пластиката происходит при нагревании выше 140 °С и сопровождается выделением хлористого водорода. Температура текучести полимера равна 150–160 °С, температура самовоспламенения — 400 °С⁵.

Время воздействия до достижения критических температур определяется нагревом слоев кабеля от газовой среды помещения пожара.

Температуры вспучивания огнезащитного состава принимались в диапазоне 180–250 °С. При этом процесс вспучивания не рассматривался, расчеты проводились для оценок времени его начала.

Результаты и их обсуждение

Зависимости температур наружной поверхности изоляции и медной жилы кабеля от времени его работы в нормальных условиях при максимальной силе тока 6 А представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в отсутствие пожара температура наружной поверхности изоляции рассматриваемого кабеля повышается на 8 °С и остается постоянной по времени.

Зависимости температуры наружных поверхностей изоляции в отсутствие вспучивающегося огнезащитного состава от времени пожара показаны на рис. 2.

На рис. 3 приведены зависимости температуры наружных поверхностей изоляции и сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава от времени пожара.

Время от начала пожара до достижения критических температур изоляции без огнезащиты и с нанесенным огнезащитным составом представлено в табл. 2.

Температуры изоляции и наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции кабеля приведены в табл. 3.

В табл. 3 выделены ячейки с температурой наружной поверхности огнезащитного слоя, большей минимальной температуры вспучивания 180 °С.

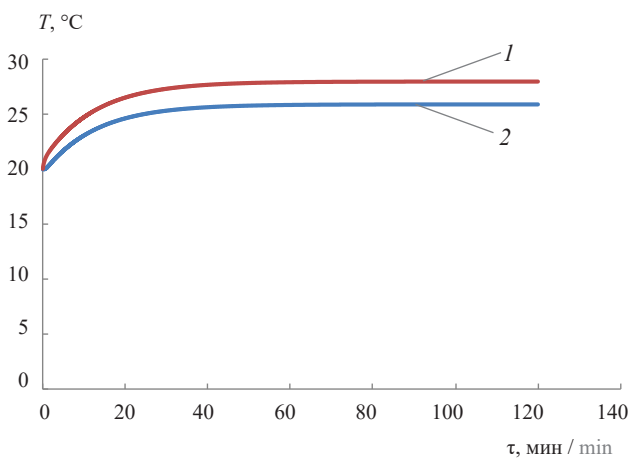


Рис. 1. Зависимости характерных температур в кабеле от времени его работы в нормальных условиях при максимальной силе тока: 1 — температура наружной поверхности изоляции; 2 — температура медной жилы кабеля

Fig. 1. Dependencies of characteristic temperatures in the cable on the time of its operation under normal conditions at maximal current intensity: 1 — temperature of the outer surface of the insulation; 2 — temperature of the copper cable core

Температуры наружной поверхности огнезащитного состава (зеленый цвет) при температуре наружной поверхности изоляции 120 °C (1), 150 °C (2)

и 200 °C (3), а также время ее достижения (красный цвет) при рассматриваемых режимах пожара приведены на рис. 4.

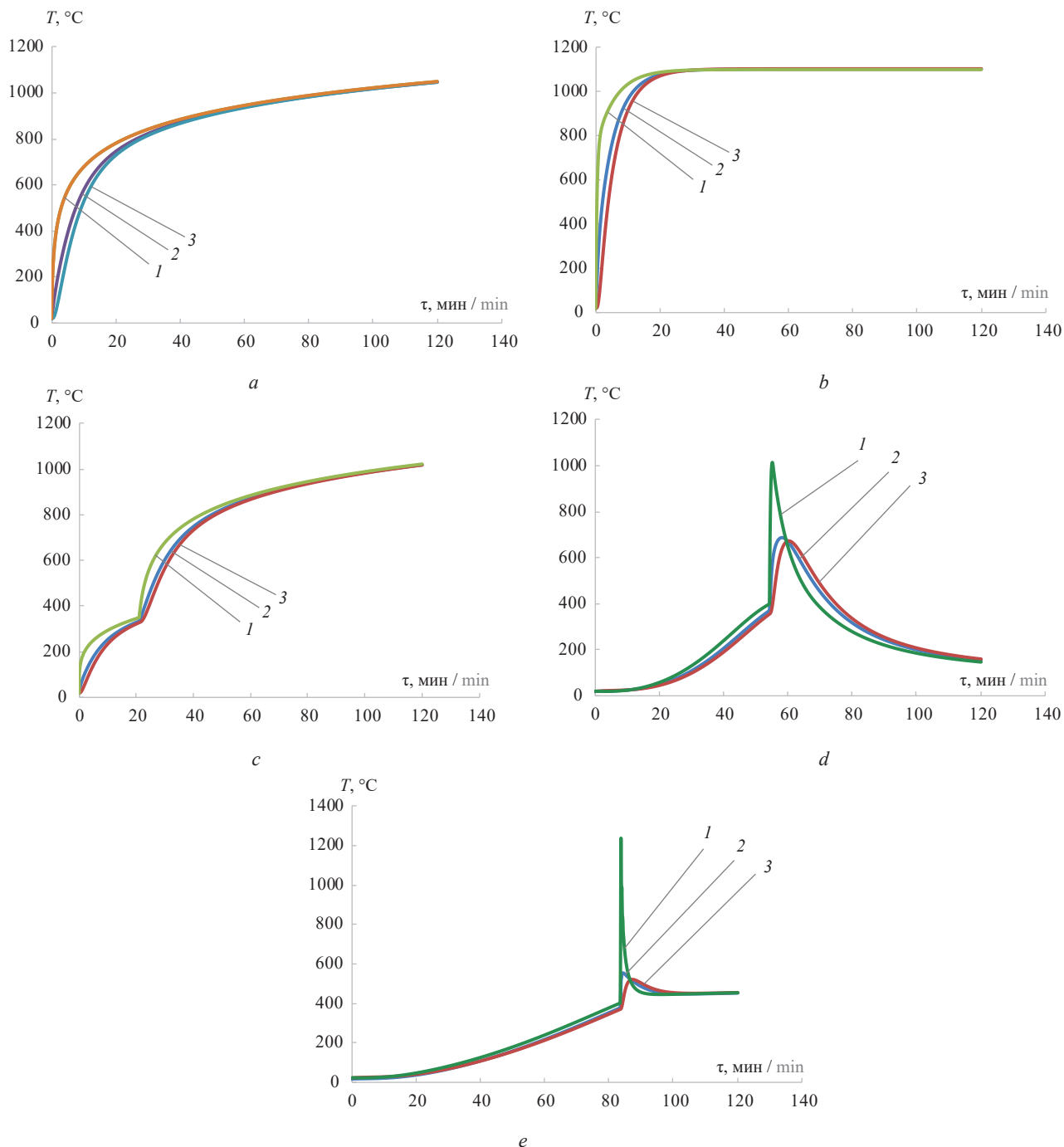


Рис. 2. Зависимости характерных температур в кабеле без огнезащиты от времени его работы в условиях пожара при максимальной силе тока 6 А: *a* — стандартный пожар; *b* — углеводородный пожар; *c* — тлеющий пожар; *d* — реальный пожар в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы открыты); *e* — реальный пожар в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы закрыты): 1 — среднеобъемная температура; 2 — температура наружной поверхности изоляции; 3 — температура внутренней поверхности изоляции

Fig. 2. Dependencies of characteristic temperatures in the cable without any fire protection on the time of its operation under fire conditions at the maximal current intensity of 6 А: *a* — a standard fire; *b* — a hydrocarbon fire; *c* — a smoldering fire; *d* — a real fire on the cable floor in case of slow-burning cables on fire (if openings are open); *e* — a real fire on the cable floor in case of slow-burning cables on fire (if openings are closed): 1 — the average volumetric temperature; 2 — the temperature of the outer surface of the insulation; 3 — the temperature of the internal surface of the insulation

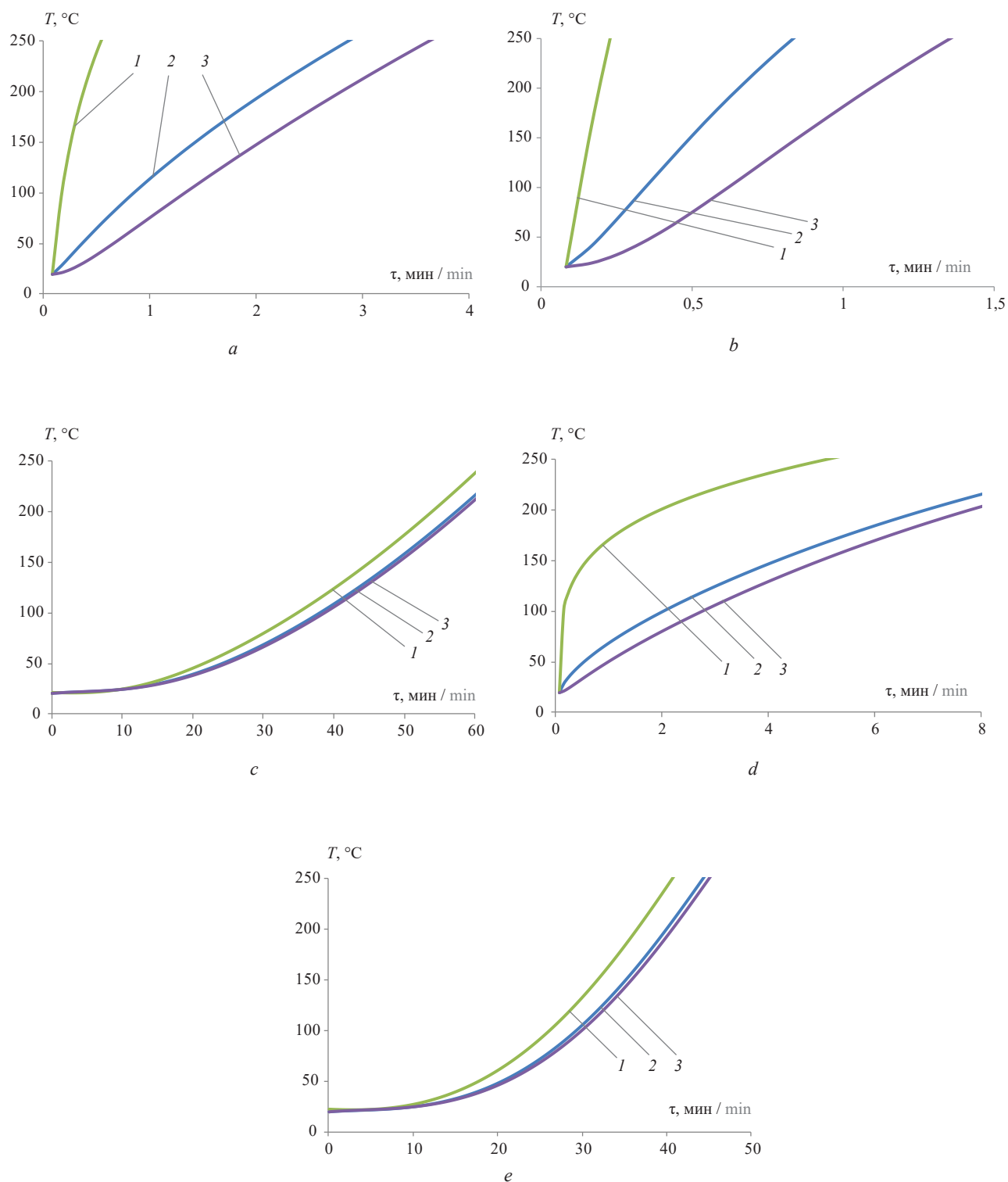


Рис. 3. Зависимости характерных температур в кабеле, покрытом вспучивающейся огнезащитной краской, от времени его работы в условиях пожара при максимальной силе тока: *a* — стандартный пожар; *b* — углеводородный пожар; *c* — тлеющий пожар; *d* — реальный пожар в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы открыты); *e* — реальный пожар в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы закрыты): 1 — среднеобъемная температура; 2 — температура наружной поверхности огнезащитного состава; 3 — температура наружной поверхности изоляции

Fig. 3. Dependencies of characteristic temperatures in the cable covered with intumescent fire protection paint on the time of its operation under fire conditions at the maximal current intensity of 6 A: *a* — a standard fire; *b* — a hydrocarbon fire; *c* — a smoldering fire; *d* — a real fire on the cable floor in case of slow-burning cables on fire (if openings are open); *e* — a real fire on the cable floor in case of slow-burning cables on fire (if openings are closed): 1 — the average volumetric temperature; 2 — the temperature of the outer surface of the fire protection composition; 3 — the temperature of the internal surface of the insulation

Таблица 2. Время, мин, от начала пожара до достижения критических температур изоляции и жилы кабеля без огнезащиты и с использованием огнезащитного вспучивающегося состава

Table 2. The time period, in minutes, from the initial fire start to the critical temperatures of the insulation and the core if neither has any fire protection/if both have fire protection in the form of an intumescent composition

| Режим пожара Mode of fire | | Температура наружной поверхности изоляции без огнезащиты, °C The temperature of the outer surface of the insulation that has no fire protection, °C | | | | Температура наружной поверхности изоляции с использованием огнезащитного вспучивающегося состава, °C The temperature of the outer surface of the insu- lation that has fire protection in the form of an intumescent composition, °C | | |
|---|---------------------------------------|---|------|------|------|---|-------|-------|
| | | 120 | 150 | 200 | 400* | 120 | 150 | 200 |
| Стандартный Standard | | 1,0 | 1,3 | 1,95 | 5,2 | 1,6 | 2,08 | 2,83 |
| Стандартный углеводородный Standard hydrocarbon | | 0,34 | 0,43 | 0,6 | 1,5 | 0,7 | 0,92 | 1,08 |
| Стандартный медленно развивающийся (тлеющий) Standard slow (smoldering) | | 2,53 | 3,7 | 6,2 | 23,0 | 3,6 | 5,0 | 7,75 |
| Реальный Real | Проемы открыты Openings are open | 41,9 | 47,9 | 56,8 | 83,5 | 43,3 | 49,25 | 58,17 |
| | Проемы закрыты Openings are closed | 31,3 | 34,7 | 39,5 | 54,4 | 32,5 | 35,83 | 40,67 |

*Температура самовоспламенения изоляции.

*Insulation self-ignition temperature.

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что при температуре изоляции:

- 120 °C (начало деструкции материала изоляции) только при углеводородном пожаре происходит вспучивание огнезащитного покрытия;
- 150 °C (начало плавления материала изоляции) наблюдается вспучивание огнезащитного по-

крытия только при стандартном и стандартном углеводородном режимах пожара;

- 200 °C (температура активной текучести материала изоляции) во всех рассматриваемых режимах происходит вспучивание.

При реальных режимах пожара время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащит-

Таблица 3. Температуры, °C, наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции

Table 3. Temperatures, in °C, of the outer surface of the fire protection layer at the critical temperatures of the insulation

| Критические температуры изоляции, °C Critical temperatures of the insulation, °C | | 120 | 150 | 200 |
|---|--|-------|-------|-------|
| Стандартный Standard fire | | 163,1 | 199,8 | 248,9 |
| Стандартный углеводородный Standard hydrocarbon fire | | 210 | 270,4 | 308,5 |
| Стандартный медленно развивающийся (тлеющий) Standard slow (smoldering) fire | | 138,1 | 167,0 | 212,5 |
| Реальный Real fire | Проемы открыты If openings are open | 123,4 | 153,8 | 204,5 |
| | Проемы закрыты If openings are closed | 126,0 | 156,8 | 208,1 |

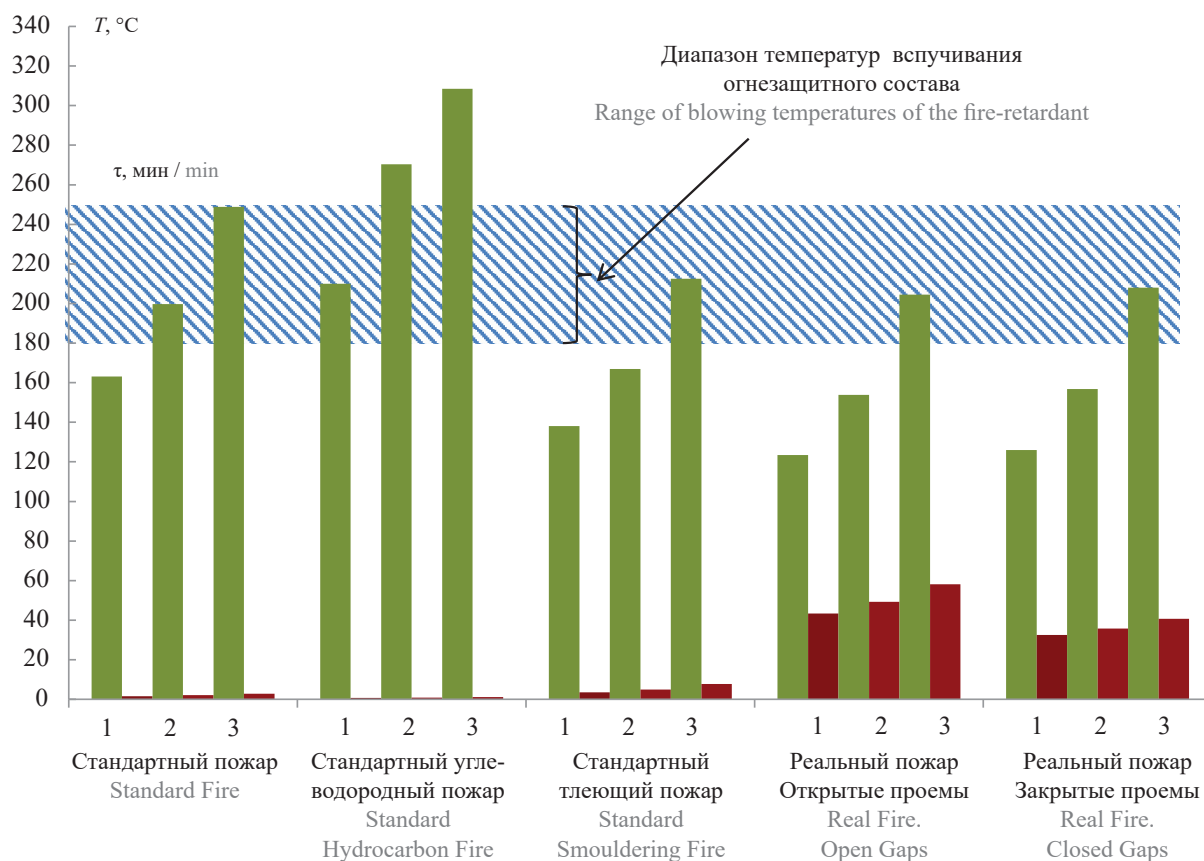


Рис. 4. Температуры наружной поверхности огнезащитного состава (зеленый цвет) при температуре наружной поверхности изоляции 120 °C (1), 150 °C (2) и 200 °C (3), а также время ее достижения (красный цвет) при всех рассматриваемых режимах пожара

Fig. 4. Temperatures of the outer surface of the fire protection composition (in green color) at the temperature of the outer surface of the insulation equal to 120 °C (1), 150 °C (2), and 200 °C (3), as well as the time needed for the temperature to reach these values (in red color) in case of all modes of fire analyzed in the article

ного покрытия (минимальная температура вспучивания 180 °C) равно:

- пожар в помещении (проемы открыты) $\tau_{пл} = 4,75$ мин;
- пожар в помещении (проемы закрыты) $\tau_{пл} = 3,0$ мин.

При реальных режимах пожара время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150 °C) составляет:

- пожар в помещении (проемы открыты) $\tau_d = 6,0$ мин;
- пожар в помещении (проемы закрыты) $\tau_d = 3,33$ мин.

При стандартном медленно развивающемся (тлеющем) режиме пожара:

- время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150 °C) равно $\tau_d = 1,42$ мин;
- время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180 °C) — $\tau_{пл} = 1,5$ мин.

При стандартном режиме пожара:

- время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150 °C) равно $\tau_d = 0,42$ мин;
 - время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180 °C) — $\tau_{пл} = 0,5$ мин.
- Таким образом, при минимальной температуре вспучивания 180 °C:
- максимальное время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции составляет 6,0 мин;
 - максимальное время процесса плавления изоляции — 4,75 мин.

Выводы

Экспериментальное или теоретическое обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных режимов пожара может привести к потере изоляционными

материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном пожаре.

Поэтому необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для

вышеуказанных кабелей с учетом реальных режимов пожара, особенно в помещениях, где, согласно особенностям технологического процесса, сходятся все каналы СБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. VIII науч.-практ. конф. Москва, 05 марта 2020 г. / под ред. Б.Б. Серкова. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 72–75.
3. 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.
4. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электроустановок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с.
5. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Анализ особенностей горения полимерной изоляции кабелей при их групповой прокладке // Кабели и провода. 2010. № 6 (325). С. 10–14.
6. Benchmark analysis for condition monitoring test techniques of aged low voltage cables in nuclear power plants. Final results of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1825. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2017.
7. 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, 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)
8. Csanyi E. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). Electrical Engineering Portal. 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
9. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance // Journal of electrical insulation IEEE. 1986. Vol. 2. No. 4. P. 128.
10. 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.
11. Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants. NP-T-3.6. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2012. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1554_web.pdf
12. 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. 144 p.
13. 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.
14. 13395-REP-00001. Ageing management of cable in nuclear generating stations. 2012.
15. Khalyasmaa A.I., Valiev R.T., Bolgov V.A. The methodology of risk evaluation for power equipment technical state assessment // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2017. Pp. 493–496. DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955494
16. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. 4th ed. Wiley, 2016. 580 p.
17. Зыков В.И., Козлова Ю.С., Крупин М.В. Определение уровня пожарной опасности воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2021. № 1. С. 34–39. DOI: 10.25257/FE.2021.1.34-39
18. 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.
19. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.
20. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
21. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.

22. Кузнецов Е.В., Прохорова И.П., Файзуллина Д.А. Альбом технологических схем производства полимеров и пластических масс на их основе. М. : Изд-во «Химия», 1976. 108 с.

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. *Pozharovzryvobezопасnost/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 the correct operation of safety channel cables of nuclear power plants in a fire. *Collection of materials of the VIII Scientific and practical conference "Roitman readings". Moscow, 05 March 2020*. Moscow, Academy of the State Fire Service Emercom of Russia, 2020; 72-75. (rus).
3. Zykov V.I., Anisimov Yu.N., Malashenkov G.N. Fire protection of electrical networks from leakage currents. *Reducing the risk of death in fires : Materials of the XVIII scientific and practical conference. Part 1*. Moscow, VNIPO Publ., 2003; 182-185. (rus.).
4. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical installations*. Moscow, LLC "Cable", 2009; 328. (rus).
5. Meshchanov G.I., Kholodnyy S.D. Analysis of the combustion characteristics of polymer insulation of cables during their group laying. *Cables and wires*. 2010; 6(325):10-14. (rus.).
6. *Benchmark analysis for condition monitoring test techniques of aged low voltage cables in nuclear power plants. Final Results of a Coordinated Research Project. IAEA-TECDOC-1825*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2017.
7. *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, 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)
8. Csanyi E. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). *Electrical Engineering Portal*. 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
9. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance. *Journal of electrical insulation IEEE*. 1986; 2(4):128.
10. *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.
11. *Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants. NP-T-3.6*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2012. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1554_web.pdf
12. 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; 144.
13. 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.
14. 13395-REP-00001. Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations. 2012.
15. Khalyasmaa A.I., Valiev R.T., Bolgov V.A. The methodology of risk evaluation for power equipment technical state assessment. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. 2017; 493-496. DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955494
16. Ross T.J. *Fuzzy logic with engineering applications*. 4th Ed. Wiley, 2016; 580.
17. Zykov V.I., Kozlova Yu.S., Krupin M.V. Fire hazard level determination for overhead power lines with a voltage of up to 1000v. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 1:34-39. DOI: 10.25257/FE.2021.1.34-39 (rus).
18. Pekhotikov V.A., Bolodyan I.A., Ryabikov A.I., Gruzina O.I. Fire on Ostankino TV tower in 2000. Chronicle of events. *Pozharnaya bezопасnost'/Fire safety*. 2017; 4:108-112. (rus).
19. Kutateladze S.S. *Fundamentals of heat transfer theory*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979; 416. (rus).
20. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984; 152. (rus).
21. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer in a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety : monograph*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. (rus).

22. Kuznetsov E.V., Prokhorova I.P., Fayzullina D.A. *Album of technological schemes for the production of polymers and plastic masses based on them*. Moscow, Publishing House "Chemistry", 1976; 108. (rus).

Поступала 11.05.2021, после доработки 02.06.2021; принята к публикации 30.06.2021
Received January May 11, 2021; Received in revised form February June 2, 2021;
Accepted June 30, 2021

Информация об авторах

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, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, заслуженный деятель науки РФ, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЗЫКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры специальной электротехники автоматизированных систем и связи, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный работник высшей школы РФ, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 328773; ORCID: 0000-0002-1568-5167; zikov01@mail.ru

Information about the authors

Olga S. LEBEDCHENKO, Cand. Sci. (Juridical), Assistant Professor, 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, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

Sergey V. PUZACH, Cand. Sci. (Eng.) Professor, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, Honoured Scientist of the Russian Federation, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Vladimir I. Zykov, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Special Electrical Engineering of Automated Systems and Communication, Laureate of the RF Government Prize in Science and Technology, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 328773; ORCID: 0000-0002-1568-5167; zikov01@mail.ru