

Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара

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

Академия государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Особенностью сигнальных кабелей систем безопасности на атомных электростанциях (АЭС) является сохранение способности проводить модулированный сигнал в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние. Однако возможность сигнальных кабелей передавать корректно сигнал в условиях повышенной температуры газовой среды, характерной для начальной стадии пожара в помещении, до настоящего времени не исследовалась.

Цели и задачи. Целью статьи является теоретическая оценка возможности кабелей системы безопасности 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.

Теоретические основы. Для определения температуры жилы кабеля используется стационарное уравнение теплопередачи от жилы кабеля в окружающую среду через цилиндрический слой изоляции.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости температуры токопроводящей жилы одножильного и однопроволочного кабеля КПЭПнг(А)-HF от температуры газовой среды в помещении.

Представлены соотношения между температурой газовой среды в помещении пожара и силой тока (кабель расположен вертикально) в электрическом кабеле с учетом зависимости удельного сопротивления провода от температуры при предельно допустимой рабочей температуре жил кабеля 70 °С, предельно допустимой рабочей температуре нагрева жил кабеля в режиме перегрузки 80 °С и максимальной температуре нагрева жил кабеля при коротком замыкании, равной 160 °С.

Для различных режимов работы в условиях температур, характерных для начальной стадии пожара в помещении, получены максимальные величины силы тока, позволяющие корректно проводить модулированный сигнал в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние.

Выводы. Разработанная математическая модель и результаты численных экспериментов позволяют оценить влияние температуры в помещении атомной станции при пожаре на способность сигнального кабеля системы безопасности АЭС передавать неискаженный модулированный сигнал в зависимости от значения токовых нагрузок и вида его расположения (вертикально или горизонтально), а также расширить приведенную в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) зону зависимости температуры в помещении от токовой нагрузки.

Ключевые слова: системы безопасности; ток нагрузки; пожарные зоны; огнестойкость; коэффициент теплопередачи; безопасный останков; расхолаживание реакторной установки

Для цитирования: 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

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

Assessment of operation of safety channel signal cables at nuclear power plants under fire conditions

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

Academy of State Fire Service of Emercom of Russia (Borisa Galushkina st., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Signal cables of safety systems, installed at nuclear power plants (NPPs), retain the ability to conduct modulated signals during the time period needed to switch the reactor facility to a safe mode. However, the ability of signal cables to transmit signals correctly in the high temperature gas medium, which is typical for the early stage of a room fire, has not been exposed to research.

Aims and objectives. The co-authors offer a theoretical assessment of the ability of NPP safety system cables to correctly transmit modulated electric signals if exposed to fire and current loads. The theoretical research into the temperature of the conductor of a signal cable at the initial stage of fire has been performed towards this end.

Theoretical background. The steady state heat conduction equation, describing heat transmission from the cable core to the environment through the cylinder-shaped insulation layer, is used to measure the temperature of the cable strand.

Results and discussion. Temperature dependences describing the relation between the temperature of the conductor of a single - strand and single-wire cable KNEPng(A)-HF on the gas medium temperature are obtained. Relations between the temperature of the gas medium in the room on fire and the current intensity in the electric cable (if the cable is laid vertically) are presented with account taken of the dependence between the specific resistance of the wire and the temperature if the maximal permissible operating temperature of cable strands is 70 °C, the maximal permissible operating temperature of cable strands in the overload operation mode is 80 °C, and the maximal cable strand heating temperature is equal to 160 °C when the short-circuit failure occurs.

Maximal current intensity values are obtained for various operating modes in the condition of temperatures typical for the initial stage of an indoor fire, they allow to correctly conduct modulated signals within the time period needed to switch the reactor facility to a safe mode.

Conclusions. The developed mathematical model and results of numerical experiments allow to assess the influence of the temperature in the room of a nuclear power plant in case of fire on the ability of a signal cable of the safety system to transfer undistorted modulated signals depending on current loads and signal cable laying patterns (whether it is laid vertically or horizontally), and also to expand the range of the room temperature dependence on the current load provided in Electrical Installations Code (EIC).

Keywords: safety systems; load current; fire protection areas; fire resistance; heat transfer coefficient; safe shut-down; reactor facility cooling

For citation: 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.).

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

Введение

Для надежного перевода реакторной установки атомной электростанции в безопасное состояние при возникновении аварии или пожара используют специально созданные каналы систем безопасности (СБ). В отличие от канала нормальной эксплуатации каналы СБ включают в себя только те приборы и оборудование, которые необходимы для горячего или холодного останова ядерного реактора. Количество каналов СБ может быть различным: Нововоронежская АЭС имеет два канала СБ, Ленинградская АЭС-2 — четыре.

Прокладывают каналы СБ в разных пожарных зонах для обеспечения их сохранности во время аварий и пожаров. Однако в ряде помещений, таких как блочный пульт управления, резервный пульт управления, гермозона и межбололочное пространство реакторного здания, сходятся все каналы СБ согласно особенностям технологического процесса. Таким образом, в случае пожара в одном из вышеперечисленных помещений под действием повышенной температуры находятся все кабельные каналы СБ.

Воздействию пожара на кабели посвящено большое количество научных работ [1–19]. Ряд исследований [2, 3] направлен на сохранение целостности кабельных коробов, условия самовоспламенения изоляции электрического кабеля, определение огнестойкости кабельных проходок. Токовые нагрузки проводов и кабелей рассчитывали исходя из температуры на поверхности жилы [4]. Ограничением для тока, протекающего по жиле, служила температура, при которой материал изоляции начинает разрушаться. Например, для кабелей с пластмассо-

вой изоляцией за расчетную температуру принимают 60 °C для нормальных температурных условий (25 °C), а при высоких температурах изоляция подвергается двустороннему воздействию: со стороны окружающей среды и изнутри, из-за внутреннего нагрева жилы кабеля за счет протекающего тока (токовой нагрузки). В свою очередь, сопротивление жилы при высоких температурах тоже повышается, следовательно, еще больше повышается ее нагрев за счет протекающего по ней тока.

Особенностью сигнальных кабелей СБ на АЭС является сохранение способности проводить модулированный сигнал в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние. Однако возможность сигнальных кабелей передавать корректно сигнал в условиях повышенной температуры газовой среды в помещении до настоящего времени не исследовалась.

Существенное влияние на корректность передаваемого сигнала оказывает изменение сопротивления жилы в зависимости от температуры в соответствии с температурным коэффициентом сопротивления материала жилы. Затухание модулированного сигнала, вызванного изменением сопротивления с повышением температуры, зависит от коэффициента затухания, равного примерно половине температурного коэффициента сопротивления. Для меди эти коэффициенты составляют соответственно 0,004 и 0,002 из расчета на 1 °C. При этом цифровые системы передачи исключительно чувствительны к изменениям затухания. В таком случае коэффициент ошибок может увеличиться

на два порядка, что приемлемо при передаче речи, но может вызвать весьма существенные искажения в случае передачи цифровых данных.

Одной из целей создания системы обеспечения пожарной безопасности атомной станции является обеспечение безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при пожаре. Раздел 9 проектной документации Ленинградской АЭС «Перечень мероприятий по обеспечению пожарной безопасности»¹ содержит следующую формулировку: «Противопожарная защита должна гарантировать функционирование систем безопасности. В случае пожара допускается выход из строя не более одного канала систем безопасности (п. 9.1.3.5). В тех пожарных зонах, где имеет место расположение элементов разных каналов систем безопасности, ликвидация пожара должна быть обеспечена на начальной стадии его развития в пределах одного канала безопасности (п. 9.1.3.7)». Это означает, что в помещении пожара (в резервном и блочном пунктах управления (РПУ и БПУ), гермозоне) электрические кабели остальных каналов СБ должны сохранять способность корректно передавать сигнал.

Чрезмерно высокая температура проводов и кабелей приводит к преждевременному высыханию изоляции, а в случае проводов без изоляции — к ускоренному окислению соединительных контактов и, как следствие, ухудшению проводимости [5]. Кроме того, следствием перегрева проводов и кабелей сверх допустимых величин могут становиться пожары. Поэтому в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ)² указывается следующее предельно длительно допустимое значение температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение — 70 °С.

Целью данной работы является теоретическая оценка возможности кабелей системы безопасности 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.

Теоретические основы

Температура провода достигнет своего установившегося значения не мгновенно, а по истечении

некоего промежутка времени после его подключения к питающей сети. Закон изменения величины нагрева провода можно выразить следующей формулой [6]:

$$\tau = \tau_s \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T_h} \right) \right], \quad (1)$$

где τ — величина нагрева провода, °С;

τ_s — установившийся перегрев для определенной токовой нагрузки, °С;

t — время нагрева, с;

T_h — постоянная времени нагрева провода, с.

Следует отметить, что величина T_h — это время, за которое провод смог бы достичь установившегося перегрева, если бы не было отвода тепла в окружающую среду. Соответственно, после отключения провода от питающей сети начинается процесс его охлаждения до температуры окружающей среды. Этот процесс можно описать уравнением [6]:

$$\tau = \tau_s \exp \left(-\frac{t}{T_0} \right), \quad (2)$$

где T_0 — постоянная времени охлаждения провода, с.

На рис. 1 приведены графики нагрева и охлаждения провода.

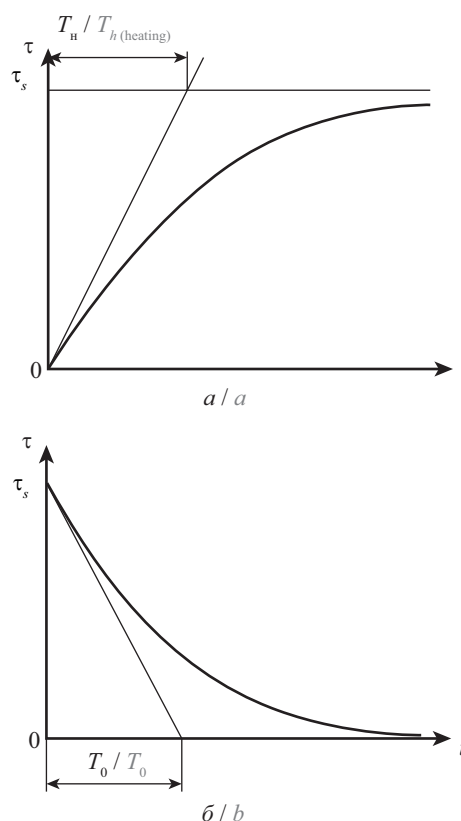


Рис. 1. Характерные графики нагрева (а) и охлаждения (б) электрического провода

Fig. 1. Typical graphs of heating (a) and cooling (b) of an electric wire

¹ Ленинградская АЭС-2. Энергоблоки № 1 и 2 : проектная документация (корректировка). Т. 1. Пояснительная записка. Кн. 1. Раздел 9. Перечень мероприятий по обеспечению пожарной безопасности. СПб : Филиал ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ»» «СПбАЭП», 2014.

² ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7. Утверждены Министерством энергетики Российской Федерации, приказ от 8 июля 2002 г. № 204. Введены в действие с 1 января 2003 г.

Приведенные формулы (1) и (2) позволяют установить, через какое время перегрев провода достигнет заданного значения. Величины постоянных времени нагрева напрямую зависят от рода проводки, материала провода, его изоляции и сечения. Постоянные времени нагрева определяются экспериментальным путем.

Расчет температуры токопроводящей жилы проводился путем решения сопряженной стационарной задачи о теплоотдаче горизонтальных и вертикальных цилиндров (трубы, проволоки) при свободном движении в неограниченном пространстве и повышенной температуре окружающей среды.

Температура токопроводящей жилы при стационарном режиме охлаждения равна [20]:

$$T_c = T_r + \frac{q}{k}, \quad (3)$$

где T_c — температура токопроводящей жилы, К;

T_r — температура газовой среды помещения, К;

q — линейный тепловой поток от наружной поверхности изоляции к газовой среде помещения, Вт/м;

$$k = \frac{T_c - T_r}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha}} \text{ — линейный коэффициент}$$

теплопередачи от токопроводящей жилы к газовой среде помещения, Вт/(м · К);

r_1 — наружный диаметр токопроводящей жилы (внутренний диаметр изоляции), м;

r_2 — наружный диаметр изоляции, м;

α — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к газовой среде помещения, Вт/(м² · К).

Линейный тепловой поток при стационарном режиме охлаждения равен:

$$q = \frac{I^2 R}{l}, \quad (4)$$

где I — сила тока, А;

$R = \rho_o \frac{l}{s}$ — электрическое сопротивление токопроводящей жилы, Ом;

ρ_o — удельное электрическое сопротивление материала токопроводящей жилы, Ом · мм²/м;

l — длина токопроводящей жилы, м;

s — площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм².

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к газовой среде помещения определяется для горизонтального расположения провода (при $10^3 < (Gr \cdot Pr)_m < 10^9$) и вертикального расположения провода (при $(Gr \cdot Pr)_m > 10^{10}$) [20]:

$$Nu_r = 0,5 (Gr \cdot Pr)_r^{0,25} \left(\frac{Pr_r}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

$$Nu_r = 0,15 (Gr \cdot Pr)_r^{1/3} \left(\frac{Pr_r}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

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

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

β — коэффициент объемного расширения, 1/К;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

T_w — температура наружной поверхности изоляции токопроводящей жилы, К;

ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

L — характерный размер, м, $L = d$ при горизонтальном расположении провода, $L = l$ при вертикальном расположении провода; индекс «r»

означает, что теплофизические свойства берутся при температуре T_r , индекс «w» — при T_w ;

T_w — температура наружной поверхности изоляции токопроводящей жилы, К;

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

Результаты и их обсуждение

При одновременном воздействии тепловой и токовой нагрузки на сигнальный кабель возможно искажение модулированного сигнала, что воспринимается как воздействие помехи на электрический сигнал. Подобное воздействие может привести к ложным срабатываниям СБ АЭС с последующими негативными последствиями.

Для определения температур газовой среды помещения при пожаре, при которых кабели не нагреваются выше рабочих температур, при достижении проводом заданного установившегося перегрева (постоянной температуры) был выбран одножильный и однопроволочный кабель конструкции КПЭПнг(А)-НФ. Этот кабель предназначен для передачи электрических сигналов и распределения электрической энергии в цепях управления, сигнализации, связи, межприборных соединений при напряжении 250, 380 и 1000 В переменного тока, частотой до 200 кГц или при напряжении соответственно 350, 750 и 1500 В постоянного тока.

В результате расчетов с использованием уравнений (3)–(6) без учета зависимости удельного электрического сопротивления провода от температуры получена зависимость температуры токопроводящей жилы от температуры газовой среды в помещении (рис. 2).

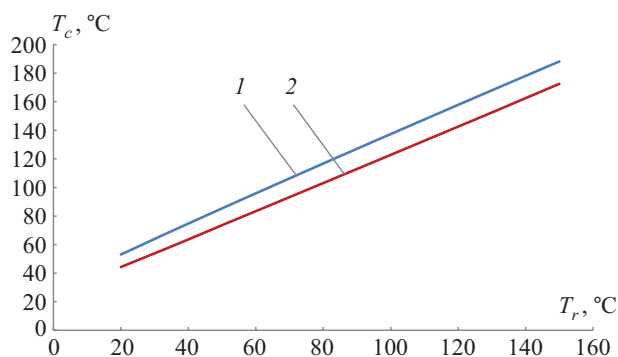


Рис. 2. Зависимость температуры токопроводящей жилы от температуры газовой среды в помещении при диаметре жилы провода $r_1 = 4,1$ мм и силе тока $I = 75,4$ А: 1 — кабель расположен вертикально; 2 — кабель расположен горизонтально

Fig. 2. Dependence of the temperature of the conductor on the temperature of the gas medium in the room with a wire strand diameter $r_1 = 4.1$ mm and current intensity $I = 75.4$ A: 1 — cable is placed vertically; 2 — cable is placed horizontally

Из рис. 2 видно, что рабочая температура жилы кабеля, расположенного вертикально, при допустимом токе нагрузки может быть превышена уже при температуре 35°C в помещении, а в случае горизонтального расположения кабеля — при температуре 45°C в помещении.

Получены расчетные зависимости допустимой токовой нагрузки кабеля от среднеобъемной температуры в помещении для значимых температур жил кабеля, имеющего наиболее опасное — вертикальное расположение.

На рис. 3 представлены соотношения между температурой газовой среды в помещении пожара и предельной силой тока I_l (кабель расположен вертикально) в электрическом кабеле при предельно допустимой рабочей температуре жил кабеля $T_l = 70^\circ\text{C}$, предельно допустимой рабочей температуре нагрева жил кабеля в режиме перегрузки $T_l = 80^\circ\text{C}$ и максимальной температуре нагрева жил кабеля при коротком замыкании, равной $T_l = 160^\circ\text{C}$. При этом в расчетах учитывалась зависимость удельного сопротивления провода от температуры по формуле:

$$\rho_o = \rho_o^* \cdot (1 + 0,0043 \cdot (T_c - 20)), \quad (7)$$

где ρ_o — удельное электрическое сопротивление материала токопроводящей жилы при температуре токопроводящей жилы $T_c, ^\circ\text{C}$;
 $\rho_o^* = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ — удельное электрическое сопротивление медной токопроводящей жилы при 20°C .

На рис. 3 показано, что, например, на начальной стадии пожара в помещении условиями работоспособности сигнального кабеля являются:

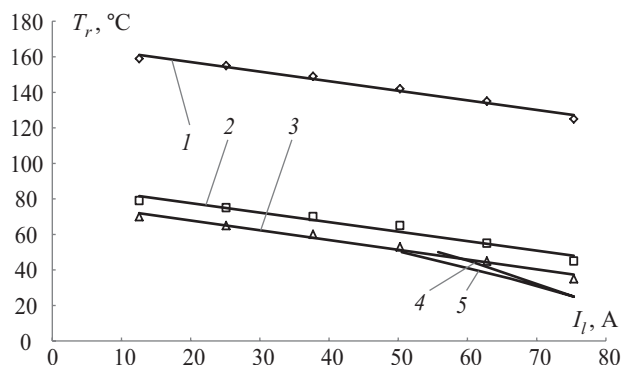


Рис. 3. Зависимость температуры газовой среды в помещении пожара от силы тока (кабель расположен вертикально): при температуре жилы кабеля $T_c = 160^\circ\text{C}$: \diamond — расчет; 1 — аппроксимирующее уравнение $T_r = -0,5391I + 167,87$ со степенью достоверности $R^2 = 0,9823$; при $T_c = 80^\circ\text{C}$: \square — расчет; 2 — $T_r = -0,5346I + 88,333$ с $R^2 = 0,9611$; при $T_c = 70^\circ\text{C}$: Δ — расчет; 3 — $T_r = -0,5505I + 78,867$ с $R^2 = 0,9804$; 4 — при $T_c = 80^\circ\text{C}$ (ПУЭ 7); 5 — при $T_c = 70^\circ\text{C}$ (ПУЭ 7)

Fig. 3. Dependence of the temperature of the gas medium in the fire room on current intensity (the cable is placed vertically): when the temperature of the cable strand $T_c = 160^\circ\text{C}$: \diamond — analysis; 1 — approximating equation $T_r = -0,5391I + 167,87$ with a confidence level of $R^2 = 0,9823$; at $T_c = 80^\circ\text{C}$: \square — analysis; 2 — $T_r = -0,5346I + 88,333$ of $R^2 = 0,9611$; when $T_c = 70^\circ\text{C}$: Δ — analysis; 3 — $T_r = -0,5505I + 78,867$ of $R^2 = 0,9804$; 4 — when $T_c = 80^\circ\text{C}$ [PUE 2003, edition 7]; 5 — when $T_c = 70^\circ\text{C}$ [EIC 2003, edition 7]

- при температуре газовой среды помещения $T_r = 72^\circ\text{C}$ в рабочем режиме работы кабеля ($T_l = 70^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l = 12$ А;
- при $T_r = 82^\circ\text{C}$ в режиме перегрузки ($T_l = 80^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l = 12$ А;
- при $T_r = 162^\circ\text{C}$ в режиме короткого замыкания ($T_l = 160^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l = 12$ А.

Выводы

Разработанная математическая модель и результаты численных экспериментов позволяют оценить влияние температуры в помещении атомной станции при пожаре на способность сигнального кабеля системы безопасности АЭС передавать не искаженный модулированный сигнал в зависимости от значения токовых нагрузок в кабеле и вида его расположения (вертикально или горизонтально).

Проведенные теоретические исследования зависимости силы тока в электрическом кабеле от температуры газовой среды в помещении пожара при предельно допустимых температурах жил кабеля позволяют расширить приведенную в ПУЭ зону зависимости температуры в помещении от токовой нагрузки в сигнальных кабелях каналов систем безопасности АЭС при пожаре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Хасанов И.Р., Варламкин А.А. Экспериментальные методы определения огнестойкости кабельных проходок при пожаре с учетом влияния токов нагрузки // XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» : сб. мат. Москва, 30–31 октября 2018 г. М. : ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2018. С. 77–78.
3. Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях атомных электростанций с водо-водяными реакторами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 303 с.
4. Титков В.В., Дудкин С.М. Кабельные линии 6–10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 3 (75). С. 2–4. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/75/10.php>
5. Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : мат. Всеросс. науч.-метод. конф. Оренбург : ОГУ, 2018. URL: <https://conference.osu.ru/archive/publications.html?detailed=14>
6. Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малащенко Г.Н. Противопожарная защита электрических сетей от токов утечки // Снижение риска гибели людей при пожарах : мат. XVIII науч.-практ. конф.. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 2003. С. 182–185.
7. Finger H. Advances in fire hazard testing of electrical equipment // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1986. Vol. 2. Issue 4. Pp. 24–29. DOI: 10.1109/MEI.1986.290418
8. Гусев С.С. Безопасное управление атомными электростанциями // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 12. С. 42–45.
9. 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.
10. 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)
11. 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>
12. Пузач С.В., Лебедченко О.С., Сизухин С.В. Обоснование технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий АЭС с водо-водяными реакторами на основе расчета огнестойкости ограждающих конструкций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 22–29. DOI: 10.25257/FE.2020.1.22-29
13. Лебедченко О.С. Особенности обоснования технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий атомных электростанций с водно-водяными реакторами // Системы безопасности — 2019 : мат. 28-й междунар. науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. С. 291–296.
14. 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.
15. 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.
16. 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
17. Celina M.C., Gillen K.T., Lindgren E.R. Nuclear power plant cable materials: review of qualification and currently available aging data for margin assessments in cable performance. SAND2013-2388. Sandia National Laboratories, 2013. DOI: 10.2172/1096518

18. Brown J.R., Bernstein R., White G.V., Glover S.F., Neely J.C., Pena G. et al. Submerged medium voltage cable systems at nuclear power plants: a review of research efforts relevant to ageing mechanisms and condition monitoring. SAND2015-1794. Sandia National Laboratories, 2015. DOI: 10.2172/1177756
19. Ageing management of cable in nuclear generating stations. 13395-REP-00001 Rev. 0. Canadian Nuclear Safety Commission, 2012. 131 p. URL: <https://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/about/researchsupport/reportabstracts/RSP-0284-Final-report.pdf>
20. Кутамеладзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.

REFERENCES

1. 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.).
2. Khasanov I.R., Varlamkin A.A. Experimental methods for determining the fire resistance of cable penetrations in case of fire, taking into account the influence of load currents. *Collection of materials: XVII All-Russian scientific-practical conference "Problems of predicting emergency situations"*. Moscow, October 30–31, 2018 Moscow, FKU Center "Antistikha" Emercom of Russia, 2018; 77-78. (rus.).
3. Puzach S.V., Lebedchenko O.S. *Mathematical modeling of the dynamics of hazardous fire factors during passive fire protection in the main buildings of nuclear power plants with water-cooled reactors: monograph*. Moscow, Academy of the State Fire Service Emercom of Russia, 2019; 304. (rus.).
4. Titkov V.V., Dudkin S.M. Cable lines 6-10 kV and over. Influence of laying methods on temperature conditions. *The News of Electrical Engineering*. 2012; 3(75):2-4. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/75/10.php> (rus.).
5. *University complex as a regional center of education, science and culture: Materials of the All-Russian scientific and methodological conference*. Orenburg, OSU Publ., 2018. URL: <https://conference.osu.ru/archive/publications.html?detailed=14> (rus.).
6. 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 I*. Moscow, VNIPO Publ., 2003; 182-185. (rus.).
7. Finger H. Advances in fire hazard testing of electrical equipment. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 1986; 2(4):24-29. DOI: 10.1109/MEI.1986.290418
8. Gusev S.S. Safe management of nuclear power plants. *Electrical equipment: exploitation and repair*. 2017; 12:42-45. (rus.).
9. *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.
10. *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)
11. 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>
12. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Sizukhin S.V. Substantiating passive fire protection technology for the main buildings of nuclear power plants with water-cooled reactors based on calculating fire resistance of enclosing structures. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2020; 1:22-29. (rus.).
13. Lebedchenko O.S. Substantiation of features of technology of passive fire protection of the main buildings of nuclear power plants with water reactors. *Proceedings of 28th International Scientific-Technical Conference "Safety Systems – 2019"*. Moscow, Academy of the State Fire Service Emercom of Russia, 2019; 291-296. (rus.).
14. 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.).
15. *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.

16. *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
17. Celina M.C., Gillen K.T., Lindgren E.R. *Nuclear Power Plant Cable Materials: Review of Qualification and Currently Available Aging Data for Margin Assessments in Cable Performance.* SAND2013-2388. Sandia National Laboratories, 2013. DOI: 10.2172/1096518
18. Brown J.R., Bernstein R., White G.V., Glover S.F., Neely J.C., Pena G. et al. *Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants: A Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring.* SAND2015-1794. Sandia National Laboratories, 2015. DOI: 10.2172/1177756
19. *Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations. 13395-REP-00001 Rev. 0.* Canadian Nuclear Safety Commission, 2012; 131. URL: <https://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/about/researchsupport/reportabstracts/RSP-0284-Final-report.pdf>
20. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the heat transfer theory.* Moscow, Atomizdat Publ., 1979; 416. (rus.).

Поступила 30.06.2020, после доработки 13.07.2020;

принята к публикации 16.07.2020

Received June 30, 2020; Received in revised form July 13, 2020;

Accepted July 16, 2020

Информация об авторах

ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна, канд. юр. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 770128; 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 МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 328773; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия государственной противопожарной службы МЧС России, 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

Information about the authors

Olga S. LEBEDCHENKO, Cand. Sci. (Leg.), Associate Professor, Associate Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 770128; 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 SEASS, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 328773; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru