ТЕПЛООБМЕН В КАБЕЛЬНЫХ ПРОХОДКАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ДОПУСТИМОМ ТОКЕ НАГРУЗКИ

A.A. Varlamkin, *head of the sector, FGBU VNIIPO of EMERCOM of Russia;*
I.R. Khasanov, *chief researcher, Doctor of Sciences, FGBU VNIIPO of EMERCOM of Russia*

А.А. Варламкин, *начальник сектора ФГБУ ВНИИПО МЧС России;*
И.Р. Хасанов, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России*

Аннотация. Предложена математическая модель теплообмена в кабельных проходках при длительном допустимом токе нагрузки. Проведено сравнение численных и экспериментальных значений зависимостей температур от времени при токовой нагрузке для различных конструкций кабельных проходок. Получены численные значения температурных полей при токовой нагрузке для кабеля, проложенного в воздухе, а также в трёх типовых кабельных проходках. Выявлены закономерности изменения температур конструктивных элементов кабельной проходки от времени. Установлено, что из рассматриваемых видов кабельных проходок наиболее опасной, с точки зрения нагрева кабеля, является конструкция кабельной проходки с заполнением внутреннего пространства противопожарной пеной на основе пенополиуретана.

Ключевые слова: кабельная проходка, кабель, пожарная опасность, электробезопасность, теплообмен, длительный допустимый ток нагрузки, численное моделирование.

Abstract. A mathematical model of heat transfer in cable penetrations under a long-term permissible load current is proposed. A comparison of numerical and experimental values of temperature and time dependences under current load for various structures of cable penetrations is made. Numerical values of temperature fields under a current load for a cable laid in the air, as well as in three typical cable penetrations, are obtained. The regularities of temperature changes in the cable passage structural elements with time are revealed. The most dangerous type of cable penetration is determined, for which the time values of thermal damage to the cable and the occurrence of a short circuit are estimated. Calculations of long-term permissible load currents for samples of the considered cable penetrations are made.

Key words: cable penetrations; cables; fire hazard; electrical safety; heat exchange; long-term permissible load current; numerical modeling.

Материал поступил в редакцию 11.08.2020
E-mail: A.varlamkin@yandex.ru, irhas@rambler.ru

ВВЕДЕНИЕ

По причине нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок в большинстве промышленно развитых стран ежегодно происходит 20–25 % пожаров от их общего количества. При этом загорания электропроводок являются причиной более 50 % всех пожаров от электротехнических изделий [1, 2].

Одной из причин возникновения аварийных ситуаций и пожаров на объектах защиты может быть перегрев кабелей при эксплуатации [3–6]. Пожарная опасность перегрева токоведущих жил определяется возможностью воспламенения изоляции, а также горючих материалов, находящихся в непосредственном контакте с электрическим кабелем.

Одним из путей распространения пожара в зданиях и сооружениях являются различные технологические, в том числе и кабельные, каналы. В целях ограничения распространения пожаров на объектах защиты предусматривается устройство кабельных проходок с пределом огнестойкости, равным пределу огнестойкости пересекаемой строительной конструкции [7, 8].

Важным фактором обеспечения пожарной безопасности электрических сетей является допустимый нормами уровень нагрева проводников. Для исключения аварийных случаев для каждого вида кабельной продукции определяется величина длительной допустимой токовой нагрузки, при которой температура кабеля не превышает максимально допустимой. Величина длительного допустимого тока напрямую зависит от теплофизических характеристик конструктивных элементов кабелей, геометрических параметров кабельных линий, характеристик окружающей среды, способа прокладки кабеля, а также от условий теплообмена [9, 10].

В связи с этим представляют интерес исследования по моделированию влияния токовой нагрузки на процессы теплообмена и пожарную опасность кабелей, проходящих через кабельные проходки. Решение этих вопросов позволит обосновать проектирование эффективной противопожарной защиты объектов и предотвратить возникновение и распространение пожара при токовых нагрузках.

В работах [11, 12] рассмотрено повышение температуры на поверхности кабеля при увеличении токовой нагрузки с помощью интегрального метода, который имеет ограничения, связанные с различными характеристиками конструктивных элементов кабельного канала и неоднородности используемых материалов. Предложены методы определения повышений температуры кабеля, проложенного в воздухе, [11] и оценки повышения температуры кабеля при суточной циклической токовой нагрузке [12].

Моделирование на основе уравнения теплового баланса локальных токов утечки по электрическим кабелям с резиновой изоляцией рассмотрено в [13]. Показано, что температура на оболочке кабеля в месте утечки тока определяется мощностью тепловыделения и тепловыми потерями, связанными с размерами электрического кабеля. Проводники, по которым течёт ток, превышающий расчётное значение, начинают перегреваться. При этом может возникать температура, приводящая к воспламенению изоляции.

Представленные в работах [14, 15] математические модели описывают процессы теплопереноса в подземных электрических силовых кабелях без учета конвективного переноса тепла и лучистого теплообмена. Рассмотрены влияние глубины заглубления подземного кабеля и влияние перегрузок при использовании подключаемых электромобилей.

В работе [16] представлено решение двумерной задачи теплопроводности для трёхслойного кабеля в зоне с ограниченным теплоотводом. Математическое моделирование исследуемого процесса сведено к решению системы уравнений теплопроводности. Исследования проводились для токовых нагрузок: 10 А – номинальный режим; 15 А – перегрузка; 20 А – значительная перегрузка. Расчёты показали, что при токовых перегрузках наблюдается превышение допустимых температурных пределов.

Исследование [17] посвящено решению совместной задачи процессов тепломассобмена и электромагнитодинамики, возникающих в кабельных линиях. Предложена нестационарная двумерная математическая модель тепломассопереноса для кабельных линий, проложенных в прямоугольном кабельном канале в воздушном пространстве в условиях естественной конвекции. Численное моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. Определены поля температур с учётом дополнительных тепловыделений в металлических экранах силовых кабелей, возникающих за счёт индуцированных токов.

Предложенная математическая модель из [17] была использована в [18, 19] при изучении влияния различных способах прокладки силовых кабелей на номинальную токовую нагрузку и рациональный режим работы кабельных линий при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях.

В работе [20] методом конечных элементов решается стационарное уравнение теплопроводности для оценки соблюдения температурного режима кабеля, проложенного в воздухе. Расчёты выполнены при помощи программного комплекса ELCUT.

Математическая модель тепловых процессов силового кабеля, проложенного в воздухе, рассмотрена в [21]. Предложенная модель учитывает ряд важных факторов, влияющих на нагрев кабеля – диэлектрические потери в изоляции, поверхностный эффект в жилах, потери в экране, способ заземления экрана кабеля. Задача решается численно методом Рунге–Кутта. Результаты расчётов соответствуют экспериментальным исследованиям тепловых процессов в силовом кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Таким образом, анализ теоретических работ решения задач тепломассопереноса при токовой нагрузке показывает, что рассмотренные математические модели позволяют проводить анализ температурных полей в местах прокладки кабелей. На результаты моделирования влияют многочисленные факторы: нестационарность процесса, условия теплообмена, теплофизические характеристики конструктивных элементов кабелей и кабельных проходок, параметры окружающей среды, условия эксплуатации и др.

Целью данного исследования является проведение на основе нестационарной математической модели исследований закономерности теплообмена в кабельных проходках при допустимых длительных токах нагрузки в зависимости от характеристик кабелей и кабельных проходок.

Для валидации математической модели использовались проведённые экспериментальные данные теплообмена в кабельных проходках.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В КАБЕЛЬНОЙ ПРОХОДКЕ ПРИ ТОКОВОЙ НАГРУЗКЕ

Кабельные проходки предназначены для прохода кабельных линий через стены, перегородки и перекрытия и представляют собой конструкции, включающие различные заделочные материалы, сборные элементы и кабельные изделия.

Схема кабельной проходки и направление тепловых потоков при нагреве токопроводящей жилы кабеля показаны на рис. 1. Имеются две области, где происходит теплообмен: область вне кабельной проходки, где тепловая энергия рассеивается в окружающую среду от кабеля $q_{1к}$ и от стенки кабельной проходки $q_{1ст}$, и вторая область теплообмена, находящаяся в конструкции проходки.

Основой математической модели процессов теплообмена в кабельной проходке является уравнение теплопроводности, которое описывает распределение температуры внутри конструкции кабельных проходок и её изменение с течением времени t [22]:

$$pC_p \frac{\partial T}{\partial t} = div\left[\lambda \cdot grad(T)\right] + q_v, \qquad (1)$$

где T – температура, °С;
t – время, с;
ρ – плотность, кг/м³;
C_p – теплоёмкость, Дж/(кг·°С);
λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
q_v – внутренние источники тепла в токопроводящей жиле кабеля, Вт/м³.

Связь теплового потока и температуры описывается законом Фурье:

$$q = -\lambda gradT. \qquad (2)$$

Влияние токов нагрузки кабеля на теплообмен в кабельной проходке определяются:
теплообменом стенок кабельной проходки (индекс «ст») с окружающей средой:

$$q_{1CT}(T,t) = \alpha_{1CT}(T_{1CT} - T_0) + \varepsilon_{ПР1CT}\,\sigma(T_{1CT}^4 - T_0^4); \qquad (3)$$

теплообменом материалов конструкции кабеля (индекс «к») с окружающей средой:

$$q_{1K}\,(T,t) = \alpha_{1K}\,(T_{1K} - T_0) + \varepsilon_{ПР1K}\,\sigma(T_{1K}^4 - T_0^4), \qquad (4)$$

где $T_{1ст}$ и $T_{1к}$ – температура стенки и кабеля, соответственно, °С;

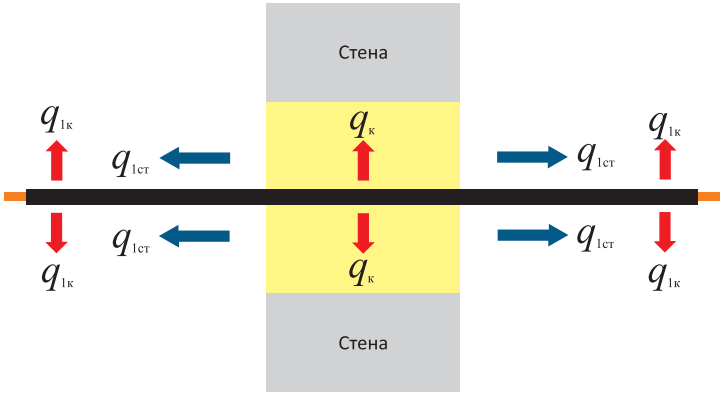

Рис. 1. Схема кабельной проходки и направление тепловых потоков при токовой нагрузке

T_0 – начальная температура окружающей среды, °С;
$\varepsilon_{пр}$ – приведённая степень черноты системы;
σ – постоянная Стефана–Больцмана [23].

Необходимо отметить, что под термином «окружающая среда» следует понимать не только окружающий воздух, но и материалы конструкции кабельной проходки.

Сопротивление проводника R (Ом) зависит от материала и его длины, а также площади поперечного сечения:

$$R = \rho_\Omega \cdot l/S, \qquad (5)$$

где ρ_Ω – удельное электрическое сопротивление металла проводника при 20 °С, Ом·мм²/м;
l – длина проводника, м;
S – номинальное сечение проводника, мм².

Величина энергии тепловых потерь в жиле кабеля Q связана с величиной электрического тока и сопротивлением проводника и описывается зависимостью:

$$Q = I^2 R\, t_m, \qquad (6)$$

где I – ток, протекающий через проводник, А;
t_m – период времени протекания тока по проводнику, с.

Величина тепловыделения при протекании тока определяется как отношение мощности тепловыделения Q (Вт) к объёму проводника V (м³):

$$q_v = Q/V = R\, I^2/S^2. \qquad (7)$$

Начальные условия определяют состояние системы в начальный момент времени t = 0: $T = T_0$. Граничные условия определяются сбросом тепла с внешних границ за счёт естественной конвекции и излучения.

Для численной реализации предложенной математической модели использовался программный пакет Salome-Meca [24, 25], в основу которого положен метод конечных элементов. В программный пакет Salome-Meca входит расчётный модуль Code Aster, позволяющий проводить численные исследования с возможностью редактирования и модернизации исполнительных файлов при решении задач по определению теплообмена в кабельных проходках при токовой нагрузке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КАБЕЛЬНЫХ ПРОХОДКАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ДОПУСТИМОМ ТОКЕ НАГРУЗКИ

В ходе численного моделирования проводились: составление геометрических моделей исследуемых конструкций кабельных проходок; разбиение каждой из расчётных областей на конечные элементы; составление исполняемых файлов для каждой конструкции проходки; проведение расчётов и сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Для проверки численных результатов, получаемых с помощью предложенной математической модели и модернизированного программного пакета, были проведены сравнения результатов с экспериментальными данными, полученными при исследовании пожарной опасности и процессов распространения тепла в конструкциях кабельных проходок при длительном допустимом токе нагрузки [26] и тепловом воздействии пожара [27, 28].

В серии экспериментов исследовались процессы теплообмена в трёх наиболее распространённых кабельных проходках размером 250×250×300 мм. Конструкция кабельной проходки № 1 состояла из плит негорючей минеральной (каменной) ваты толщиной 100 мм с расположенным в центральной части кабелем и воздушным зазором внутри проходки размером 100 мм. На поверхности плит и кабеля было нанесено огнезащитное покрытие толщиной сухого слоя 0,5 мм.

Кабельная проходка № 2 отличалась от № 1 заполнением внутреннего пространства размером 200 мм двухкомпонентной силиконовой противопожарной пеной холодного отверждения с 50-процентным содержанием замкнутых пор. Толщина плит негорючей каменной ваты с обоих торцов (фасадов) составляла 50 мм. На поверхности плит и кабеля было нанесено лакокрасочное огнезащитное покрытие толщиной сухого слоя 1,0 мм.

В кабельной проходке № 3 противопожарной пеной на основе пенополиуретана заполнялось всё внутреннее пространство (без применения плит негорючей минеральной ваты), при этом огнезащитное покрытие не использовалось.

В численных расчетах аналогично с экспериментами из [26] рассматривался стандартный кабель с медными жилами марки ВВГнг(А)1×16. Определение длительного допустимого тока нагрузки кабеля проводилось экспериментально с условием, что температура токопроводящей жилы кабеля не должна превышать допустимой температуры 70 °С [29]. Превышение температуры нагрева жилы на 8 °С от допустимого значения может привести к ускоренному старению изоляции и, как следствие, к сокращению срока службы кабеля или к отказу в эксплуатации [30, 31].

При численном исследовании использовались теплофизические характеристики материалов (ρ_Ω; C_p; ε; λ) в конструкции кабеля и кабельных проходок (медь, бетон, поливинилхлоридные пластикаты, каменная вата, противопожарная пена), которые брались из справочной литературы [32, 33] и данных производителей.

При этом значения теплофизических характеристик рассчитывались в зависимости от температуры T. Так, удельное сопротивление медной токопроводящей жилы ρ_Ω (Т) определялось как:

$$\rho_\Omega(T) = \rho_{\Omega н} \cdot (1 + \alpha_c \, \Delta T), \qquad (8)$$

где $\rho_{\Omega н}$ – удельное электрическое сопротивление при 20 ^{0}С, $\rho_{\Omega н}$ = 1,7·10^{-8} Ом·м;

α_c – температурный коэффициент сопротивления, α_c = 0,0043 С$^{-1}$; $\Delta T = T - 20$ ^{0}С.

Использовалось рассчитанное для рассматриваемого кабеля значение длительного допустимого тока нагрузки $I_{ддт}$ = 114 А при температуре окружающей среды во время экспериментов 29 ^{0}С [26].

Результаты сравнения численных результатов и экспериментальных исследований [26] теплообмена в кабельных проходках при принятой токовой нагрузке показали качественное и количественное совпадение результатов (погрешность до 10 %), как по динамике прогрева, так и по значениям температурных зависимостей. Так, на рис. 2 и 3 представлены экспериментальные и расчётные зависимости температур элементов кабеля, проложенного в воздухе, при протекании длительного допустимого тока нагрузки.

Экспериментальные измерения температур проводились при помощи термопар, установленных непосредственно на токопроводящей жиле, изоляции токопроводящей жилы и оболочке кабельного изделия в центральной части кабельных проходок. Также проводилась оценка температуры окружающей среды в непосредственной близости к конструкциям кабельных проходок.

Расчётные значения температуры нагрева центральной части кабельных проходок № 1, 2 и 3 и элементов кабеля приведены на рис. 4, 5 и 6, соответственно. При графической обработке расчётных значений температуры элементов кабеля использовалась линейная аппроксимация, в связи с этим расчётные зависимости представлены на рис. 3–6 в виде кусочно-линейных зависимостей.

Для всех видов кабельных проходок аналогично кабелю, проложенному в воздухе, в начальные моменты времени (до 25–29 мин) наблюдается линейный рост температуры элементов кабеля (токопроводящая жила, материал изоляции токопроводящей жилы и оболочка кабельного изделия).

Для кабеля, проложенного в воздухе, превышение критического значения температуры 70 °С при протекании длительного допустимого тока нагрузки кабельного изделия не наблюдается (рис. 2 и 3). Для кабельной проходки № 1 на 32-й мин происходит превышение значения допустимой температуры нагрева токопроводящей жилы (70 °С) с последующим её ростом до 76 °С к 80-й мин (рис. 4). Далее наблюдается линейный прирост температуры. Скорость роста температуры конструктивных элементов кабеля до достижения предельных значений температуры нагрева составляет около 4,88 °С/час. Прогрев внутреннего пространства (воздушного зазора) конструкции кабельной проходки № 1 происходит незначительно, при этом скорость роста температуры составит 1,3 °С/час.

Для кабельной проходки № 2 превышение значения допустимой температуры нагрева токопроводящей жилы (70 °С) происходит на 28-й мин.

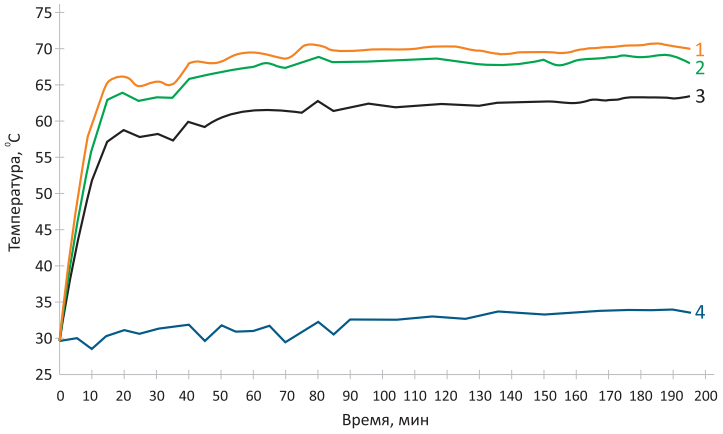

Рис. 2. Экспериментальные значения температуры элементов кабеля, проложенного в воздухе, при протекании длительного допустимого тока нагрузки: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – оболочка кабельного изделия; 4 – окружающая среда

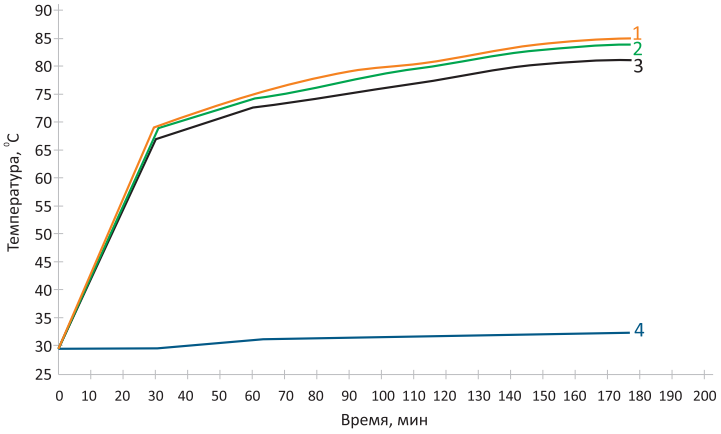

Рис. 4. Расчётные значения температур конструктивных элементов кабеля и кабельной проходки № 1 при протекании длительного допустимого тока нагрузки: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – оболочка кабельного изделия; 4 – внутреннее пространство кабельной проходки (воздушный зазор)

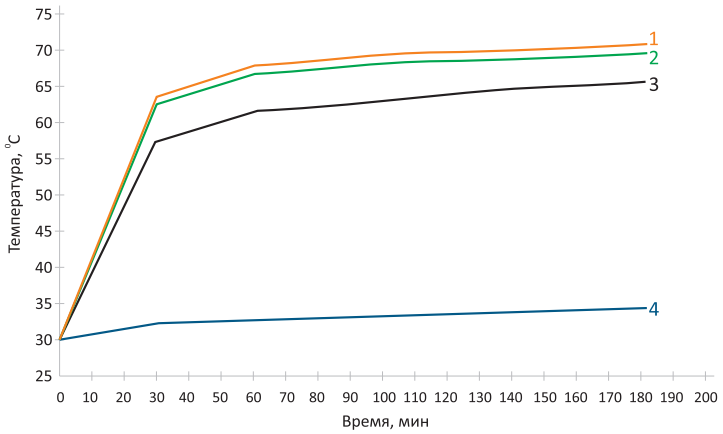

Рис. 3. Расчётные значения температуры элементов кабеля, проложенного в воздухе, при протекании длительного допустимого тока нагрузки: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – оболочка кабельного изделия; 4 – окружающая среда

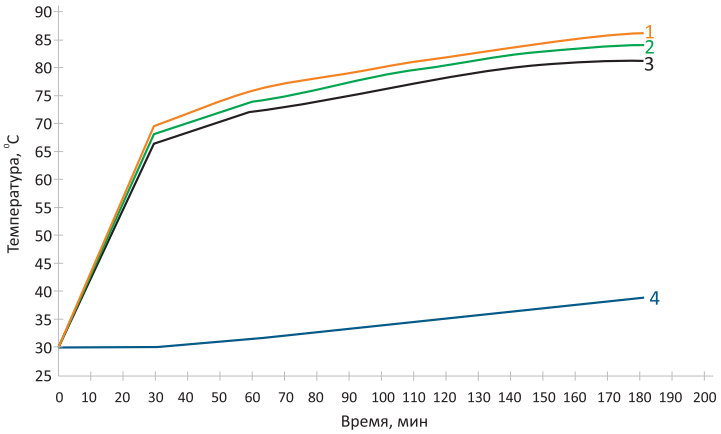

Рис. 5. Расчётные значения температур конструктивных элементов кабеля и кабельной проходки № 2 при протекании длительного допустимого тока нагрузки: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – оболочка кабельного изделия; 4 – внутреннее пространство кабельной проходки (противопожарная пена на основе вспененного силикона)

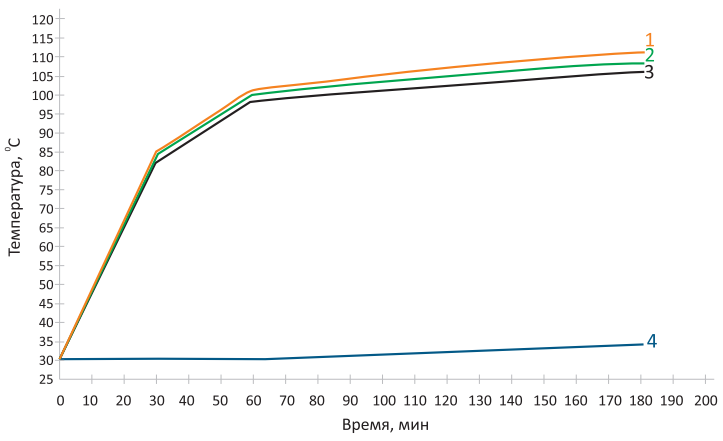

Рис. 6. Расчётные значения температур конструктивных элементов кабеля и кабельной проходки № 3 при протекании длительного допустимого тока нагрузки: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – оболочка кабельного изделия; 4 – внутреннее пространство кабельной проходки (противопожарная пена на основе пенополиуретана)

Значение скорости роста температуры до достижения значений длительно допустимой температуры токопроводящей жилы кабеля в кабельной проходке № 2 составляет приблизительно 86 °С/час, а для наполнителя внутреннего пространства – 0,2 °С/час (рис. 5). При достижении предельно допустимой температуры скорость роста температур элементов кабеля снижается до 6,3 °С/час. Заполнение внутреннего пространства способствует снижению интенсивности нагрева элементов кабеля посредством теплообмена с противопожарной пеной на основе вспененного силикона, что характеризуется изменением температуры данного материала. Скорость изменения температуры начиная с 30-й мин до окончания испытания составляет 3,2 °С/час.

Наиболее опасной с точки зрения нагрева кабеля является конструкция кабельной проходки № 3, когда вся проходка заполнена противопожарной пеной на основе пенополиуретана. Так, значения предельной температуры токопроводящая жила кабеля достигает уже к 22 мин (рис. 6). Значения температуры режима перегрузки (90 °С) достигаются к 40-й минуте.

Скорость роста температуры кабеля с момента достижения длительно допустимой температуры токопроводящей жилы в конструкции проходки около 16,14 °С/час. Скорость роста температуры конструктивных элементов (противопожарной пены на основе пенополиуретана) проходки № 3 до достижения допустимых значений температуры (70 °С) составляет около 1,7 °С/час.

Полученные расчётные температурные значения показывают, что конструкция и материалы кабельной проходки влияют на процессы нагрева элементов кабеля и на их пожарную опасность при нормативных значениях длительного допустимого тока нагрузки кабельного изделия. Так, материалы, применяемые в конструкциях проходок № 1 и 2, способствуют отводу тепла от кабеля посредством конвективного теплообмена для проходки № 1 и кондуктивного теплообмена для проходки № 2.

Температурные поля в кабельной проходке № 3 указывают, что используемый материал заделки существенно влияет на теплообмен при протекании тока нагрузки, способствуя концентрации тепла внутри конструкции проходки. Данное обстоятельство может привести к преждевременному разрушению конструкции кабеля непосредственно в кабельной проходке. При этом, в отличие от случая, когда кабель проложен в воздухе, кабельная проходка способствует локальному нагреву элементов кабеля и снижению его срока службы.

Одним из путей исключения аварийного перегрева кабельных изделий является корректировка значений расчётных токов нагрузки для кабелей, прокладываемых в каждой из конструкций кабельных проходок по условию непревышения допустимых температур нагрева токопроводящих жил. Для повышения пожарной безопасности рассматриваемых видов кабельных проходок, а также увеличения срока службы кабельных линий целесообразно рассмотреть возможность изменения требований в части выбора типов кабелей и значений длительно допустимых токов нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель теплообмена в кабельных проходках позволяет исследовать процессы нагрева кабеля и кабельной проходки при токовой нагрузке. Поставленная задача теплообмена решалась численно методом конечных элементов в программном пакете Salome-Meca, который позволяет составлять редактируемые и модернизируемые исполнительные файлы при выполнении расчётов для геометрически сложных конструкций и осуществлять удобную их визуализацию. Сравнение экспериментальных и численных значений зависимостей температур от времени при токовой нагрузке для различных конструкций кабельных проходок показали, что погрешность расчётных от экспериментальных значений не превышает 10 %.

В результате проведённых исследований получены значения температур конструктивных элементов кабеля при протекании длительного допустимого тока нагрузки для кабеля, проложенного в воздухе, а также в трёх типовых кабельных проходках. Выявлены закономерности изменения температур конструктивных

элементов кабельной проходки от времени.

Установлено, что из рассматриваемых видов кабельных проходок наиболее опасной с точки зрения нагрева кабеля является конструкция кабельной проходки с заполнением внутреннего пространства противопожарной пеной на основе пенополиуретана. Элементы кабеля при протекании допустимого тока нагрузки достигают температуры режима перегрузки 90 °С через 40 мин с дальнейшим повышением температурных значений и развитием термического процесса разложения изоляции и оболочки кабеля.

Величина допустимой токовой нагрузки силовых кабелей напрямую зависит от температурного поля в конструкции кабельной проходки, на которое влияют условия теплообмена, теплофизические характеристики используемых материалов кабеля и кабельной проходки.

Определены допустимые токовые нагрузки рассматриваемого кабеля марки ВВГнг(А)1×16, обеспечивающие безопасность работы кабельных проходок. Для повышения пожарной безопасности кабельных проходок, а также увеличения срока службы кабельных линий следует рассмотреть возможность изменения нормативных требований в части выбора типов кабелей и их значений длительных допустимых токов нагрузки.

Список литературы

1. **Черкасов В.Н. Зыков В.И.** Пожарная безопасность электроустановок. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 391 с.

2. **Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И.** Проблемы обеспечения пожарной безопасности кабельных потоков // Кабели и провода. – 2005. – № 2. – С. 8–14.

3. **Зыков В.И, Малашенков Г.Н.** Обеспечение пожарной безопасности электропроводки // Материалы двенадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – С. 240–241.

4. **Bartnikas R., Srivastava.** Characteristics of Cable Materials in Power and Communication Cables. – NewYork: IEEEPress, 2000. – 345 p.

5. **Gao A., Zhao Chang-zhenga, Xu Fanga, Di Mana, Gao W., Qi Zi-boa.** Fire Risk and Failure Mechanism of Copper Wire under Overcurrent Fault Condition // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 52. – P. 119–23.
DOI:10.1016/j.proeng.2013.02.115.

6. **Klapsaa W., Małozięća D., Wolańskaa A.** Electric Cables in the Context of Fire Hazard and Fire Protection Regulations // BiTP. – 2018. – Vol. 52, № 4. – P. 184–201.
DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.11.

7. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2012. – 148 с.

8. СП 6.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Электрооборудование. Требования пожарной безопасности. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013. – 11 с.

9. **Балашов А.И., Боев М.А., Воронцов А.С.** Кабели и провода. Основы кабельной техники. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.

10. **Каменский М.К., Крючков А.А., Байков В.А., Быстрицкая Е.В.** Оценка долговечности пожаробезопасных кабелей // Кабели и провода. – 2007. – № 4. – С. 16–19.

11. **Lin S., Hau X.** Analytical method of calculating the transient and steady-state temperature rises for cable-bundle in tray and ladder // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13, № 3. – P. 691–698.
DOI:10.1109/61.686961.

12. **Liang M.** An assessment of conductor temperature rises of cables caused by a sudden application of short pulse in a daily cyclic load // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 307–313.
DOI:10.1109/61.754067.

13. **Зыков В.И., Малашенков Г.Н.** Модель для оценки пожарной опасности проводов и кабелей электрических сетей // Технологии техносферной безопасности. – 2009. – № 4. – С. 1–9.

14. R**obertode Lieto Vollaro, Lucia Fontana, Andrea Vallati.** Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31. – P. 772–778.
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.10.024.

15. **Marshall J.S., Hines P.D., Zhang J.D., Minervini F., Rinjitham S.** Modeling the impact of electric vehicle charging on heat transfer around underground cables // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 97. – P. 76–83.
DOI:10.1016/j.epsr.2012.12.006.

16. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Оценка пожарной опасности режимов электрической перегрузки кабельных линий // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 9. – С. 9–13.

17. **Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М.** Математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов при определении допустимых токовых нагрузок кабельных линий // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325, № 4.– С. 82–90.

18. **Будаян В.А., Труфанова Н.М., Смышляева Т.В.** Численный анализ номинальной токовой нагрузки при различных способах прокладки кабелей // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-2. – С. 243–248;

19. **Труфанова Н.М., Будаян В.А.** Нестационарная задача тепломассообмена в зданиях и сооружениях // Вестник Пермского национального ис-

следовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 23. – С. 5–16.

20. **Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г., Дубицкий С.Д.** К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12–16

21. **Зализный Д.И., Новиков М.Н., Ходанович Н.М., Шутов А.Ю.** Методика численного расчёта нестационарных тепловых процессов в изоляции силового кабеля // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 86–95.

22. **Мухачев Г.А., Щукин В.К.** Термодинамика и теплопередача. Учеб. для авиац. спец. вузов. 3-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 481 с.

23. **Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пос. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

24. The Salome-Meca and Code Aster Home Page [Электронный ресурс].

URL: http://www.code-aster.org (дата обращения: 10.10.2019).

25. The Salome Page [Электронный ресурс].

URL: http://www.salome-platform.org (дата обращения: 10.10.2019).

26. **Хасанов И.Р., Варламкин А.А.** Влияние конструкции кабельных проходок на их пожарную опасность при эксплуатации // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 46–51.

DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-46-51.

27. **Хасанов И.Р., Варламкин А.А.** Влияние конструкции кабельных проходок на их огнестойкость // Пожарная безопасность. – 2019. – № 3. – С. 57–63.

28. **Хасанов И.Р., Варламкин А.А.** Моделирование теплообмена в кабельных проходках при определении их пределов огнестойкости // Актуальные проблемы пожарной безопасности. – 2020. – № 1 (3). – С. 5–11.

29. ГОСТ 31996–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 34 с.

30. **Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г.** Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие, 2-е изд., исправ. и доп. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 255 с.

31. **Чешко И.Д., Плотников В.Г.** Анализ экспертных версий возникновения пожара. Кн. 1. – СПб.: ООО «Типография Береста», 2010. – 708 с.

32. СТО 00044807-001–2006 Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. – М.: РОИС, 2006. – 69 с.

33. **Русланов Г.В. Розкин М.Я.** Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий: Проектирование. Справочник. – М.: Книга, 2012. – 270 с.