

УДК 614.841

И.Р. ХАСАНОВ, гл. науч. сотр., д-р техн. наук; А.А. ВАРЛАМКИН, нач. сектора (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАБЕЛЬНЫХ ПРОХОДКАХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИХ ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Предложена математическая модель теплообмена в кабельной проходке при тепловом воздействии пожара, позволяющая проводить исследования процессов распространения тепла между элементами кабельных изделий и элементами конструкции кабельных проходок. Для численной реализации предложенной математической модели использовался программный пакет, в основу которого положен метод конечных элементов. Для изучения влияния конструкции кабельных проходок на процессы нагрева кабеля рассмотрены три наиболее распространенных вида проходок. Получены зависимости температуры конструктивных элементов кабеля и кабельной проходки от времени. Установлено, что наличие в конструкции кабельной проходки воздушного пространства или материала, способствующего интенсивному теплообмену, приводит к повышению ее предела огнестойкости. Определен наиболее опасный в части нагрева кабеля и снижения предела огнестойкости вид кабельной проходки с заполнением всего внутреннего пространства противопожарной пеной на основе пенополиуретана.

Ключевые слова: математическая модель теплообмена, кабельные проходки, кабели, численные расчеты, огнестойкость, предел огнестойкости

Введение

В целях ограничения распространения пожаров по инженерным сетям и коммуникациям в зданиях и сооружениях предусматривается устройство кабельных проходок с пределом огнестойкости, равным пределу огнестойкости пересекаемой строительной конструкции [1, 2].

Конструктивные особенности кабельных проходок (строительные материалы, средства огнезащиты, количество и вид кабельной продукции) влияют на их огнестойкость и пожарную опасность [3–7].

Методика проведения огневых испытаний кабельных проходок на огнестойкость предполагает использование ограниченного набора кабелей с алюминиевыми токопроводящими жилами [8]. При этом измеряется температура нагрева конструктивных элементов образца и материала заделки только на необогреваемой поверхности и не учитывается реальное количество кабелей, их тип исполнения и их геометрическая ориентация в материале заделки.

В связи с этим представляет интерес математическое моделирование механизма распространения тепла между элементами кабельных изделий и конструкций кабельных проходок при тепловом воздействии пожара.

Математическая модель теплообмена в кабельной проходке при тепловом воздействии пожара

Основой математической модели процессов теплообмена в кабельной проходке является уравнение теплопроводности (1), которое описывает распределение температуры внутри конструкции кабельных проходок и ее изменение с течени-

ем времени [9]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] + q_v, \quad (1)$$

где T – температура, °C; ρ – плотность, кг/м³; C_p – теплоемкость, Дж/(кг · °C); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C); q_v – внутренние источники или стоки тепла, Вт/м³.

При стандартных испытаниях кабельных проходок [8] в условиях теплового воздействия пожара, когда внутренние источники тепла отсутствуют ($q_v = 0$), имеются три области, где происходит обмен тепловой энергией: область внутри огневой камеры (печи), где тепловая энергия подводится (q_1); область с внешней стороны, где тепловая энергия рассеивается в окружающую среду (q_2); область, ограниченная стеной (q_3), где допустимо предположить, что тепловой поток в поперечном направлении отсутствует (рис. 1).

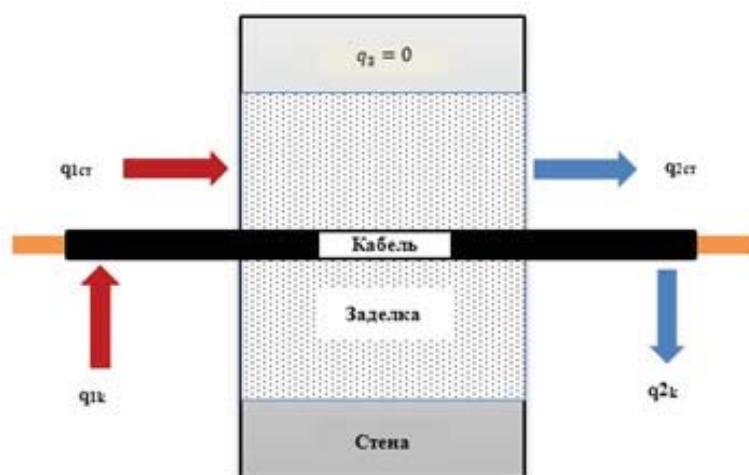


Рис. 1. Направление тепловых потоков в кабельной проходке при испытаниях в условиях теплового воздействия пожара

Основными механизмами теплопередачи на границе кабельной проходки являются лучистый и конвективный теплообмен, а величина теплового потока может быть записана как их сумма в виде:

$$q = \alpha(T - T_{cp}) + \varepsilon_{пр}\sigma(T^4 - T_{cp}^4), \quad (2)$$

где q – тепловой поток от внешней среды к телу, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи Вт/(м² · °C); T – температура тела, °C; T_{cp} – температура окружающей среды, °C; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы; $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · K⁴) – постоянная Стефана-Больцмана [10].

Со стороны огневой камеры происходит нагрев обогреваемой стороны кабельной проходки, где температура среды в огневой камере T_n от времени t определяется стандартным температурным режимом [11] при начальной температуре среды T_0 :

$$T_n - T_0 = 345 \lg(8t + 1).$$

Со стороны печи (индекс «1») тепловой поток $q_{1ст}$ на стенку кабельной проходки (индекс «ст») и поток $q_{1к}$ на кабель (индекс «к») зависят от температуры и времени и описываются зависимостями:

$$q_{1ст}(T, t) = \alpha_{1ст}(T_{1ст} - T_n) + \varepsilon_{пр1ст}\sigma(T_{1ст}^4 - T_n^4), \quad (3)$$

$$q_{1к}(T, t) = \alpha_{1к}(T_{1к} - T_n) + \varepsilon_{пр1к}\sigma(T_{1к}^4 - T_n^4). \quad (4)$$

С внешней необогреваемой стороны кабельной проходки (индекс «2») происходит охлаждение за счет естественной конвекции и сброса тепла излучением.

Тепловые потоки на стенке $q_{2ст}$ и кабеле $q_{2к}$:

$$q_{2ст}(T, t) = \alpha_{2ст}(T_{2ст} - T_0) + \varepsilon_{пр2ст}\sigma(T_{2ст}^4 - T_0^4), \quad (5)$$

$$q_{2к}(T, t) = \alpha_{2к}(T_{2к} - T_0) + \varepsilon_{пр2к}\sigma(T_{2к}^4 - T_0^4). \quad (6)$$

Связь теплового потока и температуры описывается законом Фурье [12]:

$$q = -\lambda grad T. \quad (7)$$

Начальные условия определяют состояние системы в начальный момент времени ($t = 0$):

$$T = T_0. \quad (8)$$

Система уравнений (1, 3–8) описывает процессы теплообмена в кабельной проходке в условиях теплового воздействия пожара и позволяет проводить оценку ее предела огнестойкости.

Для численной реализации предложенной математической модели использовался программный пакет Salome-Meca [13, 14], в основу которого положен метод конечных элементов [15]. В программный пакет Salome-Meca входит расчетный модуль «Code_Aster», позволяющий проводить численные исследования с возможностью редактирования и модернизации исполнительных файлов при решении задач по определению теплообмена в кабельных проходках при тепловом воздействии пожара.

Результаты численного моделирования теплообмена в кабельных проходках при тепловом воздействии пожара

В целях валидации математической модели и модернизированного программного пакета использовались экспериментальные данные оценки огнестойкости кабельных проходок [16]. Сравнение экспериментальных и численных значений зависимостей температур от времени при тепловом воздействии пожара для различных конструкций кабельных проходок показало, что погрешность расчетов от экспериментальных значений не превышает 18 %.

Моделировались процессы теплообмена в трех наиболее распространенных кабельных проходках размерами 250 × 250 × 300 мм с кабелем марки ВВГнг(А)1 × 120. Конструкция кабельной проходки № 1 состояла из плит негорючей минеральной (каменной) ваты толщиной 100 мм с обоих торцов (фасадов) с расположенным в центральной части кабелем и воздушным зазором внутри проходки размером 100 мм. На поверхности плит и кабеля было нанесено лакокрасочное 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 % 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 с толщиной сухого слоя 1,0 мм.

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

В ходе моделирования проводилось: составление геометрических моделей исследуемых конструкций кабельных проходок; разбиение каждой из расчетных областей на конечные элементы; составление уникального исполняемого файла для каждой конструкции проходки; проведение расчетов и сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Так, на рис. 2–4 представлены расчетные поля температур в конструкции

кабельной проходки № 1 в различные моменты времени теплового воздействия пожара со стандартным температурным режимом [11].

Видно, что тепловое поле в кабельной проходке имеет конусообразную форму с осевой симметрией на кабеле. Подтверждается экспериментальный вывод [16], что кабель в конструкции проходки является основным элементом, участвующим в теплопереносе из области огневой камеры (печи) в область с внешней стороны, где тепловая энергия рассеивается в окружающую среду. Незаполненное внутреннее пространство центральной части проходки № 1 способствует интенсивному конвективному теплообмену кабеля с внутренними частями конструкции кабельной проходки.

Температура на внешней поверхности заделочного материала в необогреваемой зоне проходки значительно ниже критической $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Таким образом, предел огнестойкости кабельной проходки № 1 составляет не менее двух часов (IET 120).

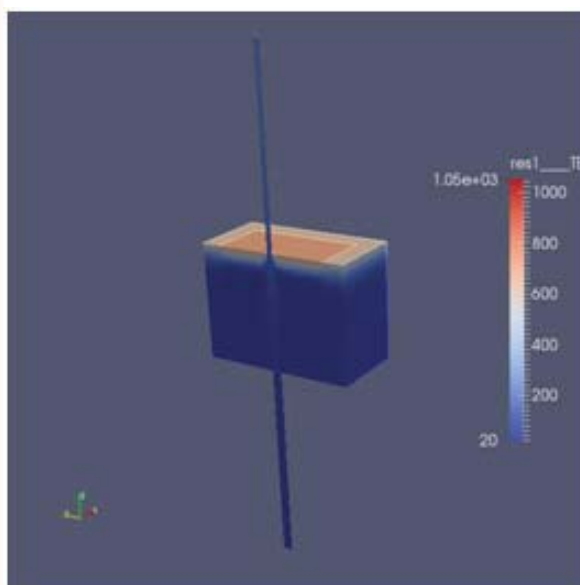


Рис. 2. Расчетные поля температур в конструкции кабельной проходки № 1 на момент времени 15 мин

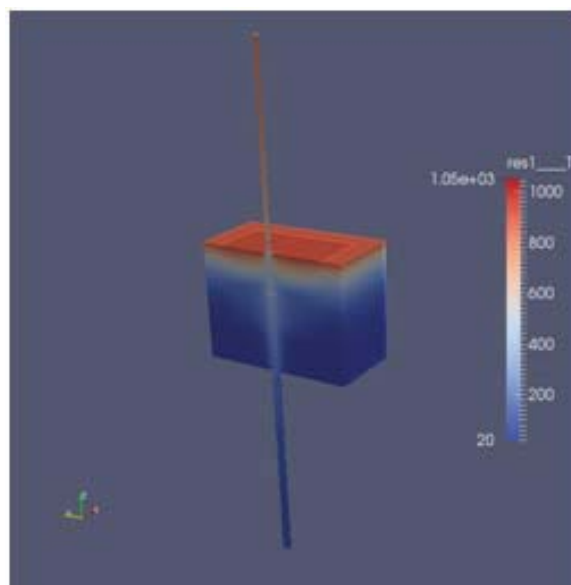


Рис. 3. Расчетные поля температур в конструкции кабельной проходки № 1 на момент времени 60 мин

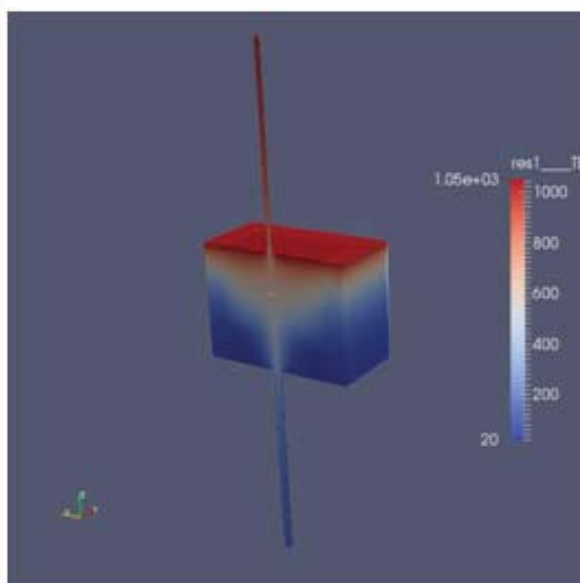


Рис. 4. Расчетные поля температур в конструкции кабельной проходки № 1 на момент времени 120 мин

На рис. 5 показаны фрагменты результатов расчета прогрева рассматриваемых образцов кабельных проходок через 120 мин воздействия стандартного температурного режима.

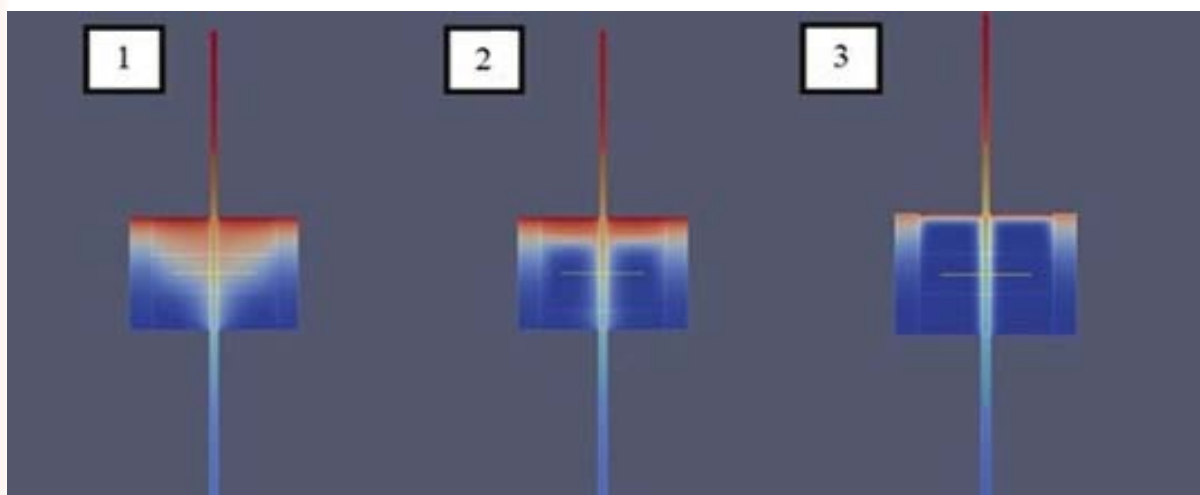


Рис. 5. Расчетные температурные поля кабельных проходок на 120 мин воздействия стандартного температурного режима: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

Заполнение внутреннего пространства противопожарной пеной в кабельных проходках № 2 и № 3 способствует кондуктивному теплообмену между кабелем и заполнителем. Распространение тепла в основном происходит по медной жиле кабеля с последующим нагревом материала изоляции и оболочки в необогреваемой области q_2 .

Результаты расчетов показали, что наиболее опасной в отношении нагрева кабеля и огнестойкости конструкции является кабельная проходка 3-го вида с заполнением всего внутреннего пространства противопожарной пеной на основе пенополиуретана. Значения температур контрольных точек на необогреваемой поверхности заделочного материала превысили критическую температуру на 72-й мин. Полученные расчетные данные подтверждают экспериментальные [16] и показывают, что предел огнестойкости кабельной проходки № 3 составляет IET 60.

Заключение

1. В целях определения пределов огнестойкости кабельных проходок предложена математическая модель теплообмена в конструкциях кабеля и кабельной проходки при тепловом воздействии пожара, которая позволяет: учитывать особенности материалов и конструкции кабельных проходок; количество и тип кабелей; расположение кабелей в материале заделки; различные тепловые режимы пожаров и их воздействие.

2. Для численной реализации предложенных математических моделей использовался программный пакет Salome-Meca на основе метода конечных элементов, который позволяет составлять редактируемые и модернизируемые исполнительные файлы при выполнении расчетов для геометрически сложных конструкций и осуществлять их удобную визуализацию.

3. Исследованы закономерности теплообмена в кабельных проходках при тепловом воздействии пожара в зависимости от характеристик кабелей и кабельных проходок. Показано, что наиболее опасной в отношении нагрева кабеля и огнестойкости конструкции является кабельная проходка 3-го вида с заполнением всего внутреннего пространства противопожарной пеной на основе пенополиуретана.

4. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных показали, что предложенная математическая модель позволяют адекватно проводить оценку пределов огнестойкости кабельных проходок при тепловом воздействии пожара. Погрешность численного моделирования при оценке огнестойкости кабельных проходок при пожаре около 18 %.

5. Полученные результаты исследований могут быть использованы при обосновании и развитии методов оценки огнестойкости кабельных проходок и других нормативных документов в области пожарной безопасности.

Список литературы

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 4 июля 2008 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 11 июля 2008 г. (в ред. Федер. закона от 29 июля 2017 г. № 244-ФЗ). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».

2. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

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

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

5. Варламкин А.А., Хасанов И.Р. Особенности распространения пожара по кабельным проходкам // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО, 2018. С. 356–358

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

7. Keski-Rahkonen O., Mangs J., Turtola A. Ignition of and fire spread on cables and electronic components. TechnicalmResearchmCentre of Finland. VTT Publications 387. Espoo, 1999. 112 p.

8. ГОСТ Р 53310–2009. Проходки кабельные, вводы герметичные и проходы шинопроводов. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний на огнестойкость.

9. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.

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

11. ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

12. Дульнев Г.Н., Тихонов С.В. Основы теории тепломассообмена. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 93 с.

13. The Salome-Meca and Code_Aster Home Page [Электронный ресурс]. URL: <http://www.code-aster.org/>.

14. The Salome Page [Электронный ресурс]. URL: <http://www.salome-platform.org/>.

15. Макарьянц Г.М., Прокофьев А.Б. Основы метода конечных элементов: учеб. пос. Самара: Изд-во Самар. Гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 80 с.

16. Хасанов И.Р., Варламкин А.А. Пределы огнестойкости кабельных проходок при совместном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожарная безопасность. 2019. № 4. С. 62–70.

Материал поступил в редакцию 29.01.2020 г.

Хасанов Ирек Равильевич – главный научный сотрудник, доктор технических наук. Тел. (495) 521-89-38. E-mail: irhas@rambler.ru; **Варламкин Андрей Александрович** – начальник сектора. Тел. (495) 521-21-31. E-mail: A.varlamkin@yandex.ru (Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)), г. Балашиха, Московская область, Россия.

I.R. Khasanov, A.A Varlamkin

MODELING THE HEAT TRANSFER IN CABLE PENETRATIONS AT THE DETERMINATION OF FIRE RESISTANCE LIMITS

A mathematical model of heat transfer in cable penetration at the thermal fire influence is proposed. This model allows to study the processes of heat distribution between the elements of cable products and cable penetration construction. A software package based on the finite element method was used for numerical implementation of the proposed mathematical model. To study the influence of cable penetration construction on the cable heating processes there are considered three most common types of penetrations. The dependences of the temperature both of the cable structural elements and the cable penetration on time are obtained. It has been established that if the construction includes air space or a material, that contributes to intensive heat exchange, its fire resistance limit increases. The most dangerous type of cable penetration with filling the entire internal space with fire-fighting foam based on polyurethane foam has been determined in terms of heating the cable and reducing the fire resistance limit.

Keywords: *cable penetrations, cables, mathematical model of heat transfer, numerical calculations, fire resistance, fire resistance limit*

Irek R. Khasanov – Doctor of Technical Sciences, Main Researcher. Phone: (495) 521-89-38. E-mail: irhas@rambler.ru; **Andrey A. Varlamkin** – Head of Sector. Phone: (495) 521-21-31. E-mail: A.varlamkin@yandex.ru.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.