

## Некоторые теоретические вопросы расчета оптических кабелей, работающих при повышенной температуре во время пожара

Повышение требований к безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) предполагает применение на этих объектах высоконадежных кабельных изделий. Конструкции кабелей, прокладываемых в герметичных помещениях АЭС, должны соответствовать условиям окружающей среды в нормальных и аварийных режимах работы систем с учетом необходимости сохранения их работоспособности в указанных режимах. Разработка кабелей с повышенными требованиями к работоспособности во время пожара прошла несколько эволюционных ступеней от понятия «не распространяющий горение» с малым количеством выделяемого дыма, не содержащих галогенов, и до «огнестойкий».

При эксплуатации кабелей на АЭС желательно использовать кабели в последнем исполнении, так как это требование, хотя и значительно удорожает изделие, обеспечивает высокий уровень безопасности.

Учитывая всю совокупность требований (механическую прочность, износостойкость, сейсмостойкость) разработчики кабельных изделий все больше внимания обращают не только на выбор применяемых материалов, но и на конструктивное исполнение.

Прокладка кабелей в общих помещениях в гермозоне обычно осуществляется в металлических коробах, металлических трубах или гибких металлокавах. Учитывая этот факт, разработчики материалов предложили использовать для оболочек кабелей новые и модернизированные типы полимерных материалов. К последним относятся несколько типов полиуретанов. Этот класс полимерных материалов характеризуется высокой гибкостью при низких температурах, прочен, стоек к истиранию и износу в сочетании с устойчивостью к гидролизу и воздействию химических веществ. Эти качества особо необходимы кабелям, которые эксплуатируются в АЭС. Введение в полиуретан различных добавок повышает его кислородный индекс до (33–37)% (для обычного полиуретана он составляет 25 %) [1]. В конструкцию кабеля также вводят материалы, содержащие антипирены – гидроксиды, положительно влияющие на стойкость кабеля к условиям работы при пожаре [2]. Для создания термобарьеров применяют слюдинитовые ленты, металлические экраны, кремнеорганику, термостойкие пленки.

Возможно применение покрытий из огнезащитных составов или пористых материалов.

Выбор традиционных способов борьбы за живучесть кабельного изделия при его работе в пламени далеко еще не исчерпан. Для его оптимизации необходимо разобрататься с некоторыми частными вопросами теплозащиты кабеля. Один из таких случаев – применение лент из пористых материалов.

Теплопроводность пористых материалов при повышенных температурах может составлять приблизительно  $\lambda = 0,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ , а теплоемкость единицы объема

$c = 0,5 - 1 \text{ Дж/см}^3$ . Тогда температуропроводность будет характеризоваться величиной  $a \sim 0,002 - 0,001 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Если представить кабель в виде сплошного цилиндра радиуса  $R$  из однородного материала, то решение этой задачи можно представить в виде суммы экспонент. Через некоторый небольшой промежуток времени  $t$  температура на оси цилиндра будет приблизительно равна:

$$T = T_M - (T_M - T_H) \cdot \left[ b_1 \exp\left(-\frac{t}{\theta_1}\right) + b_2 \exp\left(-\frac{t}{\theta_2}\right) \right], \quad (1)$$

где  $T_M$  – максимальная температура на наружной поверхности цилиндра (постоянная величина);  $T_H$  – начальная температура;  $b_1$  и  $b_2$  – постоянные коэффициенты.

Постоянные времени при граничных условиях первого рода равны:

$$\theta_1 = R^2/a \cdot 2,42, \quad \theta_2 = R^2/a \cdot 5,52. \quad (2)$$

Если  $R = 1 \text{ см}$  и  $a = 0,001 \text{ см}^2/\text{с}$ , то  $\theta_1 = 173,6 \text{ с}$  и  $\theta_2 = 33 \text{ с}$ . Через  $t > 2 \cdot \theta_2 = 66 \text{ с}$  вторым слагаемым в (1) можно пренебречь, тогда можно применить приближенную формулу для регулярного режима нагревания:

$$T = T_M - (T_M - T_H) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\theta_1}\right). \quad (3)$$

В качестве примера примем  $T_M = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_H = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Через 60 с после начала нагревания температура на оси цилиндра составит  $T = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Радиус оптического кабеля в большинстве случаев меньше 1 см и приведенный расчет приблизительно соответствует нагреванию кабеля в рассмотренной тепловой защите. Следовательно, изоляция из обычных теплоизолирующих материалов позволяет получить защиту в пределах до 1 мин.

Рассмотрим расчет защиты в виде многослойных тепловых экранов. На оптический кабель наносят ленты толщиной  $d_{\text{Л}}$ , имеющие малый коэффициент черноты  $\varepsilon \sim 0,1$ , например из нержавеющей стали. Между лентами наносят каркас из тонких жаростойких нитей толщиной  $d_{\text{П}}$ . Таким образом, в прослойках  $d_{\text{П}}$  находится воздух. При достаточно большом количестве слоев эффективная теплопроводность за счет теплопередачи излучением может быть на порядок меньше теплопроводности воздуха  $\lambda_{\text{В}}$ . Проведем приближенную оценку коэффициента температуропроводности с учетом только теплопроводности воздуха.

Толщина элементарного слоя  $d_3 = d_{\text{Л}} + d_{\text{П}}$ . Эффективная теплопроводность элементарного слоя  $\lambda = \lambda_{\text{В}} \cdot d_3/d_{\text{П}}$ . Тепло-

Температура теплоизоляции в зависимости от радиуса и времени

Время, мин	Радиус теплоизоляции, см					
	$r = 1$	$r = 1,2$	$r = 1,4$	$r = 1,6$	$r = 1,8$	$r = 2,0$
34,7	20	24	61	180	340	498
62,5	23	67	155	271	388	498
90,3	36	120	218	318	412	498
139	89	180	270	354	430	499

емкостью воздуха пренебрегаем. Теплоемкость элементарного слоя  $C = C_{л} \cdot \frac{d_{л}}{d_{\lambda}}$ . Температуропроводность:

$$a = \frac{\lambda}{c} = \left( \frac{\lambda_{в}}{c_{л}} \right) \cdot (d_{п} + d_{л})^2 / d_{п} \cdot d_{л}. \quad (4)$$

Наименьшее значение  $a$  будет при  $d_{п} + d_{л}$ , или  $a = 4 \left( \frac{\lambda_{в}}{c_{л}} \right)$ . Если  $\lambda_{в} = 0,0003 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$  и  $c_{л} = 1 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{К}$ , то  $a = 0,0012 \text{ см}^2/\text{с}$ . Таким образом, многослойная теплоизоляция не имеет существенных преимуществ перед однослойной изоляцией из теплоизоляционных материалов.

Для уменьшения температуропроводности можно вакуумировать теплоизолирующую оболочку, тогда  $\lambda_{в} \sim 0$ . В этом случае необходимо учитывать теплопередачу излучением по закону Стефана-Больцмана. Оптический кабель проложен во внутренней металлической трубке с радиусом  $r_0$ . Снаружи тепловой изоляции расположена внешняя металлическая трубка с радиусом  $R$ . На концах кабеля трубки запаяны и между трубками можно создавать вакуум.

Если число слоев  $m$  в теплоизоляции велико, то разность температур ( $T_1 - T_2$ ) между соседними лентами невелика. Тогда тепловой поток через единицу площади ленты будет:

$$q = 4 \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot T^3, \quad (5)$$

где  $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}^3$ ;  $T$  – средняя температура двух соседних слоев,  $K$ . Величину  $q$  можно выразить через эквивалентную теплопроводность  $\lambda_{и}$ :

$$q = \lambda_{и} / d_{и}. \quad (6)$$

Приравнявая (5) и (6), получим:

$$\lambda_{и} = 4 \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot T^3 \cdot d_{и}. \quad (7)$$

При  $T = 763 \text{ К}$ ,  $\varepsilon = 0,1$  и  $d_{и} = 0,01 \text{ см}$  получим  $\lambda_{и} = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$ . В начальной стадии нагревания  $T = 293 \text{ К}$ , тогда  $\lambda_{и} = 5,74 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$ .

Температуропроводность, рассчитанная по (4), будет  $4,04 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  и  $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ . Соответственно постоянная времени  $\theta_1$ , рассчитанная по (2) для принятых ранее размеров, будет 4300 с и 75500 с (1,2 и 21 ч). При толщине теплоизоляции 1 см и толщине элементарного слоя 0,02 см в теплоизоляционном слое должно быть 50 слоев, что конструктивно трудно выполнимо.

Рассмотрим параметры процесса нагревания при толщине элементарного слоя 0,1 см, тогда толщина промежутков между слоями будет 0,05 см и число слоев 10. Постоянная времени соответственно будет 0,24 и 4,2 ч.

Для более правильной оценки времени нагревания необходим численный расчет уравнения теплопроводности, так как теплопроводность по (7) существенно зависит от температуры. Разработана программа расчета методом конечных разностей с применением алгоритмического языка Visual Basic. Пример результатов расчета температуры приведен в таблице.

При расчете приняты значения:  $d_{л} = 0,01 \text{ см}$ ,  $d_{п} = 0,04 \text{ см}$ ,  $c_{л} = 1 \text{ Дж/см}^3$ , коэффициент теплопередачи к поверхности внешней трубки  $\alpha = 0,01 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$ , температура окружающей среды  $T_{м} = 500 \text{ }^\circ\text{С}$ , начальная температура теплоизоляции и кабеля  $T_{н} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ , радиус внутренней трубки  $r_0 = 1 \text{ см}$ , радиус внешней трубки  $R = 2 \text{ см}$ , число элементарных слоев  $m = 20$ .

Предложенная конструкция сможет работать при заданных условиях более 2 ч. Разработанная программа позволяет рассчитать температуру для конкретных конструкций в зависимости от конструкции оптического кабеля и условий применения. Вакуумированная многослойная теплоизоляция позволяет создать системы, способные работать в течение нескольких часов в условиях высокой температуры внешней среды. Однако для таких конструкций должны быть разработаны специальные методы изготовления и монтажа. Для увеличения гибкости всей системы можно выполнить внутреннюю трубку из алюминия и во время монтажа кабель с теплоизоляцией протягивать во внешнюю трубку по месту монтажа.

Специалистам такая конструкция оптического кабеля может показаться несколько надуманной и малоперспективной. Однако использование волоконно-оптических линий для удаленных объектов внутри зданий АЭС (в тех случаях, когда использование электрических кабелей не желательно с точки зрения безопасности эксплуатации), возможно, компенсирует удорожание всей системы в целом [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Термопластичный полиуретан Estane ZHF 95AT3. Справочный материал компании Lubrizol Advanced Materials, Inc., 2007.
2. Обзор минеральных антипиренов-гидроксидов для безгалогенных кабельных композиций // Кабель-news. – 2009. № 8. – С. 41–43.
3. Логгинов А.С., Ржанов А.Г., Терлецкий Б.Ю., Григас С.Э. Использование волоконных световодов для передачи электрической энергии // Динамика сложных систем. – 2008. – № 2. – С. 28–31.