

УДК 621.3.002.5: 006.354

И.В. Севриков, канд. техн. наук, доцент

Севастопольский национальный технический университет

А.В. Клемяшова, аспирант

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,

В.В. Севриков, д-р. техн. наук, профессор

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: ps@sevgtu14.sebastopol.ua

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ВЗРЫВОЗАЩИТЕ ДЛЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

Выполнено математическое моделирование условий безопасности по взрывозащите для выбора средств контроля электрического принципа действия на основе известных закономерностей процессов термодинамики.

Ранее был проведен анализ требований по взрывозащите к электрооборудованию, согласно Правил устройства электроустановок и ГОСТов по взрывозащищенному электрооборудованию и определено, что степень защиты приборов и аппаратов электрического принципа действия со взрывозащищенной оболочкой определяется температурой самовоспламенения взрывоопасной смеси, классом взрывоопасной зоны и максимальным зазором между фланцами оболочки [1]. Но средства контроля, по взрывозащите должны удовлетворять не только всем требованиям взрывозащиты электрооборудования, а также и другим присущим им особенностям, учитывая средства контроля как электрического, так и неэлектрического принципа действия. Для этого, дополнительно к принятой нормативной документации нами было выделено 5 типов взрывозащищенных устройств и средств контроля и сформулированы для них в общем виде условия безопасности [1].

Целью данной работы является математическое моделирование условий взрывобезопасности для выбора средств контроля состояния взрывоопасных объектов, позволяющих выполнить расчеты основных характеристик взрывобезопасности без дополнительных экспериментов.

Для первого типа – устройств электрического принципа действия с искроопасными электрическими цепями и взрывонепроницаемой оболочкой условие безопасности имеет вид

$$T_{\text{ср1}} \leq 0,6 T_{\text{св.см}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ср1}}$ – температура истекающих продуктов взрыва из защитной оболочки через критический зазор; $T_{\text{св.см}}$ – температура самовоспламенения взрывоопасной смеси внутри оболочки; 0,6 – значение коэффициента безопасности.

Для моделирования первого условия $T_{\text{ср1}}$ можно определить из [2] размер критического зазора, используя уравнение Ю.Х. Шаулова

$$d = \frac{x}{u} \sqrt{\frac{E^4(T_{\text{п.г}} - T_{\text{ст}})}{R^4 T^2}}, \quad (2)$$

где d – критический диаметр; $x = \frac{\lambda}{u}$ – коэффициент температуропроводности; λ – теплопроводность исходной смеси; u – скорость распространения пламени; E – энергия активации; $T_{\text{п.г}}$ – температура продуктов горения; $T_{\text{ст}}$ – начальная температура стенок устройства с критическим зазором; T – температура горения смеси в оболочке; R – универсальная газовая постоянная.

Имеются различные методы и выражения расчета гашения (затухания) пламени в узких каналах. На наш взгляд для описания условия безопасности 1-го типа устройств, в том числе и средств контроля, по критическому зазору наиболее удовлетворяет метод Ю.Х. Шаулова. Поэтому методу затухания пламени в узких трубках, насадках, каналах, порах и т.п. определяется в основном отводом тепла к стенкам устройства, как показано на рисунке 1, причем теплопроводность материала не играет решающей роли, как и длина канала, так как продолжительность контакта сферы пламени со стенками весьма мала.

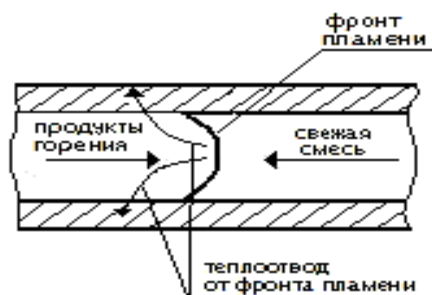


Рисунок 1 – Схема теплоотвода от фронта пламени к стенкам устройства в тушащем зазоре

Выражение (2) можно использовать для температуры продуктов горения, истекающих из критического зазора. В этом случае $T_{пл} \approx T_{ср.1}$, и тогда

$$T_{ср.1} = \frac{u^2}{x^2} \psi \frac{d^2 \chi R \chi T^2}{E} - T_{ст}. \quad (3)$$

Температура самовоспламенения смеси рассчитывается по методу Забетакисова – Монахова [3, 4]. В.Т. Монахов распространил метод расчета температуры самовоспламенения по средней длине $\ell_{ср}$ углеродной цепочки химических соединений, предложив следующие формулы:

$$t_{свс} = 300 + 116 \sqrt{5 - \ell_{ср}} \text{ при } \ell_{ср} \leq 5; \quad (4)$$

$$t_{свс} = 300 - 38 \sqrt{\ell_{ср} - 5} \text{ при } \ell_{ср} \geq 5; \quad (5)$$

$$\ell_{ср} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{n_j} \psi_j}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{n_j}} \ell_j. \quad (6)$$

Число цепей в молекуле соединения n_y рассчитывается по формуле

$$n_y = 0,5 m \psi (m - 1), \quad (7)$$

где m – число концевых групп в молекуле. Длина цепи молекулы ℓ_j вычисляется по формуле

$$\ell_j = m_{cj} + e \ell_j, \quad (8)$$

где m_{cj} – число атомов углерода в j -й цепи; ℓ_j – эквивалентная длина функциональной группы или цикла, входящая в j -ю цепь.

Эквивалентная длина вычисляется по формуле

$$\ell_j = \frac{(a + b \psi m_c)}{r}, \quad (9)$$

где m_c – общее число атомов углерода в молекуле; r – общее число функциональных групп, циклов и локализованных кратных связей углерод-углерод в молекуле; a, b – значения табличных коэффициентов.

Эквивалентная длина ароматического цикла $\ell_{эа}$ определяется по соотношению

$$\ell_{эа} = n_{я} - 0,5 + e \ell_{эф}, \quad (10)$$

где $n_{я}$ – число ядер в цикле; $\sum \ell_{эф}$ – алгебраическая сумма эквивалентных длин функциональных групп, входящих в состав цикла.

Методика расчета параметров по (4) – (10) и табличные данные приведены в литературе, в частности в [4].

С учетом выражений (1) – (5) можно записать условие безопасности для устройств 1-го типа в виде:

$$\frac{u^2}{x^2} \psi \frac{d^2 \chi R \chi T^2}{E} - T_{ст} \leq 0,6 \psi \left(300 + 116 \sqrt{5 - \ell_{ср}} \right) \text{ при } \ell_{ср} \leq 5; \quad (11)$$

$$\frac{u^2}{x^2} \psi \frac{d^2 \chi R \chi T^2}{E} - T_{ст} \leq 0,6 \psi \left(300 - 38 \sqrt{\ell_{ср} - 5} \right) \text{ при } \ell_{ср} \geq 5. \quad (12)$$

Анализируя условия (11), (12), приходим к выводу, что если значение левой части меньше или равно значению правой части, то выбранное оборудование и приборы контроля, относящиеся к 1-му типу, соответствуют взрывоопасным условиям. Если это соотношение не соблюдается, то следует уменьшать размер критического зазора d , например, на этапах разработки и проектирования

оборудования, или при эксплуатации относить оборудование в более низкую категорию по чувствительности смеси к самовоспламенению.

Рассмотрим условие безопасности для выбора оборудования и средств контроля, относящихся ко второму типу, с отсутствующими искроопасными электрическими цепями или имеющие взрывозащищенную оболочку, заполненную инертным газом, маслом, кварцевым сыпучим материалом. В общем случае это условие имеет вид

$$T_{cp2} \leq 0,7 T_{св.см} . \quad (13)$$

В таких устройствах, как показано выше, отсутствие электрических искр за пределами защитных компаундных диэлектрических изоляций или оболочек достигается за счет применения инертных к горению веществ и материалов. Однако возникающая внутри оболочек температура может передаваться внешним поверхностям, контактирующим с взрывной смесью, методом теплопроводности. Источники внутренней тепловой энергии могут быть разные: короткое замыкание, перегрузка электрических сетей (проводников) и др. Наиболее распространенным и высокотемпературным источником электроустройств 2-го типа следует считать короткое замыкание. Температура дуги короткого замыкания достигает 2000...4000 °С. При такой температуре происходит нагрев проводника. Температуру нагрева проводника находится по формуле [4]

$$t_{np} = t_n + \frac{I_{к.з}^2 R \tau_{к.з}}{C_{np} m_{np}} , \quad (14)$$

где t_n – начальная температура проводника, °С; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания, А; $\tau_{к.з}$ – время короткого замыкания, с; R – сопротивление проводника, Ом; C_{np} – теплоемкость проводника, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$; m_{np} – масса проводника, кг.

Под действием температуры проводника или металлических контактов металл плавиться с образованием искр (капель), температура которых достигает 1500...2500 °С.

Рассчитав по (14) температуру электрического проводника (контактов) t_{np} в зоне короткого замыкания, можно ее приравнять к температуре стенки t_1 поверхности теплообмена изоляции контактирующей с проводником, т.е. $t_{1np} \approx t_1$.

Зная внутреннюю температуру устройства можно рассчитать температуру внешней поверхности изоляции стенки проводника, или внешней поверхности наполнителя оболочки, или внешней металлической поверхности электрического устройства (прибора), используя классические методы теплопроводности. При этом оболочки могут быть однослойные однородные и многослойные неоднородные, как показано на рисунке 2.

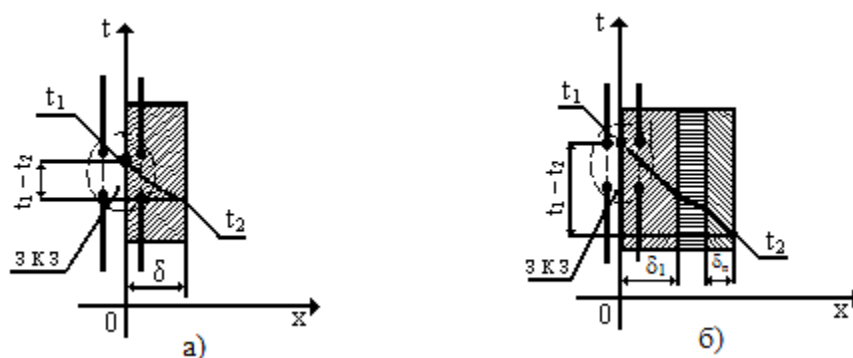


Рисунок 2 – Расчетные схемы теплопроводности плоских стенок:
а) однослойной; б) многослойной

Сначала рассмотрим теплопроводность при коротком замыкании электрических проводников сплошной компаундной изоляции, представляющей собой однослойную однородную стенку, как представлено на рисунке 2, а. Длина и ширина стенки безгранично велики по сравнению с ее толщиной δ . Теплопроводность происходит в направлении оси x , расположенной по нормали к поверхности стенки. Допускаем, что тепловой поток установившейся и кратковременный, поэтому принимаем время $\tau = 1$. Дуга в зоне короткого замыкания (ЗКЗ) нагревает внутреннюю поверхность изоляции (стенки) до температуры t_1 . В результате теплопроводности стенки внешняя поверхность ее, контактирующая с взрывоопасной смесью, в зоне поверхности теплообмена F нагревается до температуры t_2 . В данном случае количество теплоты может быть определено в соответствии с уравнением Фурье по выражению [4]

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \chi F, \quad (15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м $\cdot$ °С.

Из (15) находится температура t_2 . Однако в уравнение (15) имеем две неизвестных Q и t_2 . В этом случае, как это бывает на практике, зададимся температурой t_2 , приравняв ее к температуре самовоспламенения взрывоопасной смеси и по выражению (15) получим граничные значения теплоты Q , т.е. следует

$$t_2 = t_1 - \frac{Q \chi \delta}{\lambda \chi F}, \quad (16)$$

где F – поверхность теплообмена изоляции в зоне короткого замыкания, м 2 .

Если плоская стенка состоит из слоев, отличающихся друг от друга теплопроводностью и толщиной, то температуры на поверхностях слоев можно рассматривать в последовательности $t_1 - t_2, t_2 - t_3, \dots, t_{n-1} - t_n$, т.е. температура на второй поверхности предыдущего слоя является температурой на первой поверхности последующего слоя. При этом, как и для однослойной стенки, задаваясь значениями температур $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ на вторых поверхностях слоев, исходя из значимых свойств их материала, например, плавления, кипения, самовоспламенения и других, получим по (15) значения $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$.

Известная формула расчета количества теплоты [4], проходящей через многослойную стенку, с различной теплопроводностью и толщиной слоев, как представлено на рисунке 2, б, имеет вид

$$Q = \frac{e^{(t_1 - t_j)_i} \chi F_i}{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \chi}}. \quad (17)$$

Учитывая, что толщины слоев δ_i небольшие и можно принимать поверхности теплообмена слоев равными между собой, т.е. $F_1 \approx F_2 \approx \dots \approx F_n$. В этом случае выражение (17) принимает вид

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) \chi F}{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \chi}}. \quad (18)$$

Из (18) нетрудно записать расчетную формулу температуры поверхности многослойной стенки (изоляция, оболочки), контактирующей с взрывоопасной смесью

$$t_2 = t_1 - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \chi} Q}{F}. \quad (19)$$

С учетом выражений (13) (14), (17), (18) условия безопасности для устройств 2-го типа:

– для однослойной стенки (изоляции)

$$t_n + \frac{I_{\kappa.3}^2 \chi R \chi t_{\kappa.3}}{C_{np} \chi m_{np}} - \frac{\delta \chi Q}{\lambda \chi F} \leq 0,7 \chi (300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp}}) \quad \text{при } \ell_{cp} \leq 5; \quad (20)$$

$$t_n + \frac{I_{\kappa.3}^2 \chi R \chi t_{\kappa.3}}{C_{np} \chi m_{np}} - \frac{\delta \chi Q}{\lambda \chi F} \leq 0,7 \chi (300 - 38 \chi \sqrt{\ell_{cp} - 5}) \quad \text{при } \ell_{cp} \geq 5; \quad (21)$$

– для многослойной стенки (изоляции)

$$t_{ncp} + \frac{I_{\kappa.3}^2 \chi R \chi t_{\kappa.3}}{C_{np} \chi m_{np}^{cp}} - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \chi} Q}{F} \leq 0,7 \chi (300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell}) \quad \text{при } \ell \leq 5; \quad (22)$$

$$t_n + \frac{I_{\kappa.3}^2 \chi R \chi t_{\kappa.3}}{C_{np} \chi m_{np}} - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \chi} Q}{F} \leq 0,7 \chi (300 - 38 \chi \sqrt{\ell_{cp} - 5}) \quad \text{при } \ell_{cp} \geq 5. \quad (23)$$

Рассмотрим передачу теплоты теплопроводностью через цилиндрическую стенку (рисунок 3)

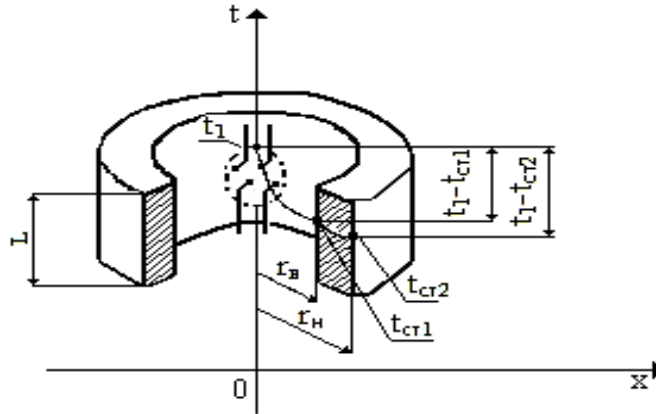


Рисунок 3 – Расчетная схема теплопроводности цилиндрической стенки

Цилиндрические и аналогичные или шаровые оболочки с искроопасными электрическими цепями также бывают однослойные и многослойные. Источниками теплоты в них являются электрическая дуга короткого замыкания проводников, размыкание и замыкание контактов рубильников, выключателей, разъемов и других элементов электрических цепей. Эти элементы размещаются внутри электрических устройств, с внешней оболочкой, выполненной чаще из металла, реже из полимерных диэлектрических материалов. В зоне электрической дуги нагреваются проводники до температуры $t_{np}=t_1$ для повышения взрывозащиты электрических устройств внутренние полости, где расположены искроопасные элементы бывают воздушными или заполненными инертным к горению газом, маслом, или сыпучим инертным материалом, которые с точки зрения теплопроводности следуют рассматривать как слои цилиндрической оболочки.

В рассматриваемой задаче представляет интерес выражение температуры внешней поверхности защитной оболочки $t_{cr,2}$, которая контактирует с взрывоопасной смесью. Сначала необходимо определить температуру стенки $t_{cr,1}$ внутренней цилиндрической поверхности. Ее можно рассчитать по выражению (16) для однослойной стенки, которое применительно к цилиндрической поверхности имеет вид

$$t_{cr,1} = t_1 - \frac{Q \chi r_e}{\lambda \chi F_y}, \quad (24)$$

где F_y – поверхность теплообмена (согласно рисунка 3, $F_y = 2\pi \chi r_e \chi L$); r_e – внутренний радиус цилиндра; L – высота элемента теплообмена внутренней среды; λ – коэффициент теплопроводности внутренней среды.

Для многослойной стенки количество теплоты Q , передаваемое путем теплопроводности к внешней поверхности оболочки, может быть рассчитана по известному выражению [5]

$$Q = \frac{2\pi \chi L \chi (t_{1cr} - t)}{e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i\theta}} \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}, \quad (25)$$

где d_n – наружный диаметр цилиндра; i – порядковый номер слоя стенки.

Из (25) нетрудно записать выражение температуры внешней поверхности $t_{cr,2}$, контактирующей с взрывоопасной смесью в виде

$$t_{cr,2} = \frac{2\pi \chi L \chi t_1 - Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i\theta}} \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2\pi \chi L} = t_1 - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i\theta}} \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2\pi \chi L}. \quad (26)$$

Принимая к учету выражения (4), (5), (13), (14), (26) запишем условие безопасности для цилиндрических устройств 2-го типа:

$$t_n + \frac{I_{K,3}^2 \chi R \chi t_{K,3}}{C_{np} \chi m_{np}} - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i\theta}} \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2\pi \chi L} \leq 0,7 \chi (300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp}}) \quad \text{при } \ell_{cp} \leq 5; \quad (27)$$

$$t_n + \frac{I_{K,3}^2 \chi R \chi t_{K,3}}{C_{np} \chi m_{np}} - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i\theta}} \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2\pi \chi L} \leq 0,7 \chi (300 - 38 \chi \sqrt{\ell_{cp} - 5}) \quad \text{при } \ell_{cp} \geq 5. \quad (28)$$

В случае несоблюдения условий (27), (28) необходимо принимать конструктивные меры к устройствам 2-го типа по условию их взрывозащиты.

Выводы

1. Обоснованы математические модели условий безопасности по взрывозащите для выбора средств контроля электрического принципа действия с использованием уравнений Ю.Х. Шаулова по определению критического зазора защитной оболочки, уравнений Монахова В.Т. по расчету температуры самовоспламенения и уравнения теплопроводности Фурье.

2. Определение условий безопасности расчетным способом представляет интерес для обоснования уровня взрывозащиты средств контроля на этапах разработки, проектирования и эксплуатации, а также упрощает в возможной степени необходимость экспериментального определения лимитирующих параметров стандартными методиками.

Перспективой дальнейших исследований является математическое моделирование условий безопасности по взрывозащите для выбора средств контроля неэлектрического принципа действия.

Библиографический список

1. Севриков В.В. Рациональный выбор средств контроля по условию их исполнения для взрывоопасных объектов / В.В. Севриков, Ю.А. Хашин, А.В. Клемяшова // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 10. — С. 134 – 139.

2. Охрана труда в химической промышленности / Н.В. Соловьев, Н.А. Стрельчук, П.И. Ермилов, Б.Л. Канер. — М.: Химия, 1969. — 528 с.

3. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ / В.Т. Монахов. — М: Химия, 1979. — 42 с.

4. Справочник. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность / А.Н. Баратов [и др.]. — М.: Химия, 1987. — 270 с.

5. Макаров В.В. Основы защиты воздушного бассейна / В.В. Макаров. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. — 282 с.

Поступила в редакцию 13.11.2007 г.