

УДК 621.3.002.5: 006.354

Л.В. Квасова, старший преподаватель

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 НЕЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

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

Ранее считалось, что фрикционные «холодные» искры не являются источником воспламенения газо-, паро- и пылевоздушных смесей. Однако, неоднократные случаи взрывов газа метана в угольных шахтах, углеводородных смесей с кислородом и другими окислителями в химических и прочих производствах, в результате механических искр, вызвало необходимость регламентировать их как взрывоопасные. Поэтому в настоящее время к устройствам неэлектрического принципа действия, применяемым во взрывоопасных условиях, предъявляются требования по взрывозащите. К сожалению, для этих устройств, как и для устройств электрического принципа действия, отсутствуют расчетные методы оценки условий безопасности. В связи с этим математическое моделирование является актуальной задачей повышения безопасности их применения и упрощения экспериментальных оценок лимитирующих параметров воспламенения взрывоопасных смесей.

Целью данной работы является математическое моделирование условий взрывозащиты средств контроля для замены экспериментальных оценок взрывобезопасности расчетными методами.

Рассмотрим условие безопасности для выбора оборудования и средств контроля, относящихся к третьему типу устройств неэлектрического принципа действия, применяющихся в диэлектрических потоках или имеющих движущиеся элементы.

Для этого типа устройств выражение безопасности имеет вид [1]

$$W_{cp.3} \geq 0,4 W_{min.cm} \quad (1)$$

где $W_{cp.3}$ – энергия разряда электростатического заряда средства контроля; $W_{min.cm}$ – минимальная энергия зажигания взрывоопасной смеси.

Искровой разряд зарядов статического электричества может воспламенять газо-, паро-, или пылевоздушные смеси. Энергию искры W в джоулях, которая образуется под действием напряжения между пластиною (поверхностью устройства) и любым заземленным предметом, считают запасенной энергией. Она может быть вычислена по формуле [2]

$$W = 0,5 C \Phi U^2, \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора, Ф; U – напряжение, В.

Разницу потенциалов между заряженным телом и землей получают путем измерения в реальных условиях с помощью электрометров.

Минимальную энергию зажигания W_{min} рассчитывают по значению критического зазора ℓ_k и количеству тепла, необходимого для нагрева горючей смеси от ее начальной температуры t_n до температуры самовоспламенения $t_{cv.cm}$ по формуле [3]

$$W_{min.cm} = \alpha q \ell_k, \quad (3)$$

где $\alpha = 0,16$ – коэффициент пропорциональности; q – удельное обменное количество тепла, необходимое для нагрева смеси до температуры самовоспламенения, Дж/м³; ℓ_k – величина критического зазора, м.

Удельное объемное количество тепла рассчитывается по формуле

$$q \in \int_{t_n}^{t_{cv}} \frac{C_p}{\rho} dt, \quad (4)$$

где C_p – теплоемкость воздуха, Дж/кг °С; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Количество тепла q можно вычислить по диаграмме или принять из таблицы [2]. Критический зазор зажигания ℓ_k рассчитывают через максимальный экспериментальный безопасный зазор d по формуле $\ell_k = 2\psi d$.

Подставив выражения (2) и (4) в (1), получим условие безопасности для устройств третьего типа

$$0,5\psi C\psi U^2 \leq 0,4\psi_0 \psi_q \psi_{\ell_k}. \quad (5)$$

При несоблюдении этого неравенства необходимо изменять условия и режим эксплуатации средств контроля или другого устройства в частности, усиливать электропроводность электризирующихся поверхностей (элементов) и улучшать электростатический отток в землю путем их заземления.

Рассмотрим условие безопасности для средств контроля и других устройств четвертого типа незлектрического характера, подверженных трению движения, без возгорания их поверхностей. В этом случае возможны два варианта: открытые поверхности трения, контактирующие с взрывоопасной смесью и закрытые поверхности трения, находящиеся в оболочке с воздушным промежутком, или заполненной инертной к горению газом, маслом или инертным сыпучим материалом, контактирующей с внешней поверхностью с взрывоопасной смесью. В первом случае имеем дело с сухим трением и поверхностью трения контактирующей с воздухом или взрывоопасной смесью. Во втором случае имеем тоже самое при контакте с поверхностью трения с воздухом, инертным газом, или имеем мокрое трение при наличии на поверхности трения масла (смазки). Исходным выражением условия безопасности является следующее:

$$T_{cp,4} \leq 0,8\psi_{св.см}. \quad (6)$$

Рассмотрим открытую поверхность сухого трения в контакте с воздухом при равномерно распределенном источнике теплоты. Принимая тепловой поток в единицу времени в Вт и время процесса трения запишем известное выражение количества тепла [4]

$$Q = F\psi K_{cp}\Delta t \cdot \psi_{\tau}, \quad (7)$$

где F – поверхность трения (в каждом конкретном случае определяется по контактирующим элементам устройства); K_t – коэффициент теплоотдачи в $Вт/м^2\psi^0C$; Δt_{cp} – средняя разность температур между трущимися поверхностями; τ – продолжительность процесса трения.

Из (7) можно получить среднее значение $\bar{t}$ избыточной температуры в зоне поверхностей трения по выражению [5]

$$\bar{t} \approx \frac{\bar{P}\psi(1-\bar{\eta})}{K_t \psi A \psi (1+\psi) \psi_{\tau}}, \quad (8)$$

где $\bar{t}$ – среднее значение избыточной температуры в зоне поверхностей трения; A – детерминированная площадь охлаждаемая воздухом; ψ – детерминированная доля отводящей теплоты; $\bar{P}$ – среднее значение расходуемой мощности, Вт; $\bar{\eta}$ – среднее значение коэффициента полезного действия; τ – время работы механизма (время трения).

При работе механизма в повторно-переменном режиме время трения за один цикл равняется τ_i , а за общее время работы $\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i$, при этом $P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \psi_{\tau_i}}{\tau_{общ}}$, $A = F$ и для кратковременного непрерывного процесса $\tau_i=1$ и $\psi_i=0$.

С учетом (7) и (6) для кратковременного процесса получаем

$$\bar{t} \approx \frac{\bar{P}\psi(1-\bar{\eta})}{K_t \psi F \psi_{\tau_i}}. \quad (9)$$

Значение $\bar{K}_t$ приводиться в литературе, например в [5]. Выразив мощность P через работу и общее время процесса трения, можно записать

$$t_{mp} = \frac{N_{mp} \psi_{\ell} \psi (1-\bar{\eta})}{\tau_{общ} \psi K \psi F}, \quad (10)$$

где N_{mp} – сила трения (определяется в каждом конкретном случае в зависимости от контактирующих элементов устройства); l – длина (путь) трения, м.

Для второго случая, когда поверхность трения контактирует с воздухом, инертным газом, маслом в защитной оболочке, температура на поверхностях отмеченных сред и на внешней поверхности оболочки, контактирующей с взрывоопасной смесью, рассчитывается по выражениям [6] теплопроводности многослойной стенки. При этом исходная температура $t_i=t_{mp}$ рассчитывается как для поверхности трения по выражению (10).

Тогда выражение для температуры многослойного устройства, контактирующей с взрывоопасной смесью, принимает вид:

для плоскостенной поверхности

$$t_{cm.2} = \frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \cdot \frac{\chi}{\chi_i}} \cdot \chi Q}{F}; \quad (11)$$

для цилиндрической поверхности

$$t_{cm.2} = \frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{is}} \cdot \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2 \chi \pi \chi L}. \quad (12)$$

Выражения безопасности для устройств четвертого типа, подверженных трению, с учетом выражений (6), (10) – (12), имеет вид:

для открытой плоскостенной поверхности сухого трения

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} \leq 0,8 \chi \left(300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp.ф.}} \right) \quad \text{при } \ell \leq 5; \quad (13)$$

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} \leq 0,8 \chi \left(300 - 38 \chi \sqrt{\ell_{cp.ф.} \cdot 5} \right) \quad \text{при } \ell > 5; \quad (14)$$

для многослойной плоскостной поверхности

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \cdot \frac{\chi}{\chi_i}} \cdot \chi Q}{F} \leq 0,8 \chi \left(300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp.ф.}} \right) \quad \text{при } \ell \leq 5; \quad (15)$$

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{e^{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \cdot \frac{\chi}{\chi_i}} \cdot \chi Q}{F} \leq 0,8 \chi \left(300 - 38 \chi \sqrt{\ell_{cp.ф.} \cdot 5} \right) \quad \text{при } \ell > 5; \quad (16)$$

для многослойной цилиндрической поверхности

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{is}} \cdot \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2 \chi \pi \chi L} \leq 0,8 \chi \left(300 + 116 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp.ф.}} \right) \quad \text{при } \ell \leq 5; \quad (17)$$

$$\frac{N_{mp.} \cdot \chi \ell \chi (1 - \eta)}{\tau_{общ.} \cdot \chi K_t \cdot \chi F} - \frac{Q \chi e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{is}} \cdot \chi 2,31 \chi \lg \frac{d_n}{d}}}{2 \chi \pi \chi L} \leq 0,8 \chi \left(300 - 38 \chi \sqrt{5 - \ell_{cp.ф.}} \right) \quad \text{при } \ell > 5. \quad (18)$$

Для случая механических искр, образующихся в результате трения фрикционных муфт (устройств), условия безопасности являются аналогичными (13), (14), и (17), (18), так как наиболее опасными являются искры с максимальной температурой, а значит с температурой поверхности трения.

В случае невыполнения условий безопасности (13) – (18) необходимо снижать интенсивность режимов трения или усиливать теплоизоляцию устройств.

Для пятого типа средств контроля и других устройств неэлектрического принципа действия, которые при ударе (падении) или трении дают высокие температуры искр от поверхностей соприкосновения. При ударе падающих стальных тел (приборов, устройств) о другие стальные тела или скальные породы (камни), или ударе между собой стальных элементов устройств, соприкасающихся с взрывоопасной смесью, возникают температуры, способные воспламенить эти смеси.

Для этого случая исходное выражение условия безопасности по выбору средств контроля и других устройств имеет вид

$$T_{cp.} \leq 0,5 \chi T_{св.см.}. \quad (19)$$

Наиболее опасными для воспламенения взрывоопасной смеси являются образующиеся при ударе искры, имеющие максимальную температуру. Поскольку максимальная температура искр имеет место вблизи нахождения их от соприкасающихся при ударе поверхностей, то следует определять температуру поверхностей.

Выражение температуры поверхностей соприкосновения при ударе можно получить из [4]

$$Q = S \chi K_t \cdot \chi \Delta t; \quad (20)$$

где Q – удельный тепловой поток, Вт; S – поверхность соприкосновения; Δt – разность температур поверхностей при ударе $t_{y\partial}$ и начальной температуре t_n ($\Delta t = t_{y\partial} - t_n$).

Тепловой поток можно выразить через работу и время в виде мощности по выражению

$$Q = \frac{F_{y\partial} \cdot \ell}{\tau \cdot S \cdot K_t}, \quad (21)$$

где $F_{y\partial}$ – сила удара в Н; ℓ – расстояние (путь) пройденной ударенным телом, м; τ – время движения тела, с; K_t – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Подставив (21) в (20), можно записать выражение температуры удара в виде:

$$t_{y\partial} = \frac{F_{y\partial} \cdot \ell}{\tau \cdot S \cdot K_t} + t_n. \quad (22)$$

Общее выражение безопасности для устройств пятого типа, подверженных удару, с учетом выражений (19), (22) имеет вид:

$$\frac{t_{y\partial} \cdot \ell}{\tau \cdot S \cdot K_t} + t_n \leq 0,54 \left(300 + 116 \sqrt{5 - \ell_{cp.ср.}} \right) \quad \text{при } \ell \leq 5; \quad (23)$$

$$\frac{t_{y\partial} \cdot \ell}{\tau \cdot S \cdot K_t} + t_n \leq 0,54 \left(300 - 38 \sqrt{\ell_{cp.ср.} - 5} \right) \quad \text{при } \ell > 5. \quad (24)$$

Следует иметь в виду, что расчет, разработка и конструирование взрывозащищенных средств контроля и другого оборудования электрического и неэлектрического принципа действия для взрывоопасных условий и эксплуатация их в этих условиях являются очень сложными. Поэтому независимо от принятого метода расчета, необходимо испытывать оборудование по определенным методикам, например [7], в г. Донецке в Испытательном сертификационном центре взрывозащищенного электрооборудования.

Перспективой дальнейших исследований является уточнение предложенных расчетных выражений условий безопасности для обоснованного выбора средств контроля, путем экспериментальной проверки в стандартных условиях определения основных параметров воспламенения взрывоопасных смесей.

Выводы

1. Получены расчетные выражения условий безопасности по взрывозащите для выбора средств контроля неэлектрического принципа действия.
2. Совершенствование математического моделирования позволяет расчетным способом уточнить уровень взрывозащиты, что крайне желательно для обоснованного выбора средств контроля применяемых во взрывоопасных условиях.

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. Рожков А.П. Пожежна безпека: Навч. посібник / А.П. Рожков. — К.: Пожінформтехніка, 1999. — 256с.
3. Справочник. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность / А.Н. Баратов, Б.Н. Иванов, А.Я. Корольченко и др. — М.: Химия, 1987. — 270 с.
4. Макаров В.В. Основы защиты воздушного бассейна / В.В. Макаров. — учебн. пособие. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2003. — 282 с.
5. Решетов Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.В. Фадеев. — М.: Высш. шк., 1988. — 246 с.
6. Севриков И.В. Математическое моделирование условий безопасности по взрывозащите для выбора средств контроля электрического принципа действия / И.В. Севриков, А.В. Клемяшова, В.В. Севриков // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2008 — Вып. 87.
7. ГОСТ 22782.0-81. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытания. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 72 с.

Поступила в редакцию 21.01.2008 г.