

МАССОПЕРЕНОС ГАЗООБРАЗНЫХ ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЕЙ ВДОЛЬ КАБЕЛЯ

УДК (РАС S) 621.315.213.14

ХВОСТОВ Д.В.
БЫЧКОВ В.В.

генеральный директор ЗАО «СИМПЭК»
заместитель генерального директора ЗАО «СИМПЭК»

Москва
e-mail: simpec@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Взрывоопасная зона, взрывоопасная газообразная среда, массоперенос, электрический кабель, концентрационные пределы распространения пламени

В статье изложена методика расчёта массопереноса газообразных взрывоопасных смесей по воздушным полостям в сердечнике кабеля при образовании в аварийном режиме разности давлений между помещениями соединенными кабелями. Приведены результаты сравнительных расчётов массопереноса газа по кабелям разных конструкций.

Одним из действенных методов взрывозащиты является герметичное отделение взрывоопасных помещений от невзрывоопасных, либо разделение взрывоопасных помещений разных категорий взрывоопасности.

Однако существует широко применяемое в нефтегазовой промышленности изделие, которое прокладывается из взрывоопасного в невзрывоопасное помещение и имеет в себе естественные воздушные каналы, по которым, вообще говоря, возможен перенос газообразных взрывоопасных веществ из взрывоопасных помещений в невзрывоопасные. Это электрический кабель. Например: монтажный.

Правда, в ГОСТ Р 51330.13-99 в п. 9.1.5. [1] приводится требование:

«Электропроводка в трубах и, в специальных случаях, кабели (например, где имеется перепад давления) должны быть, при необходимости, уплотнены для предотвращения прохода жидкостей или газов».

Но это относится к помещениям, в которых искусственно достигается избыточное давление. А как быть в том случае, когда в штатном режиме разница в давлениях между взрывоопасным и невзрывоопасным помещениями отсутствует, но в результате аварии или разности температур, во взрывоопасном помещении возникает избыточное давление?

Для ответа на этот вопрос необходимо произвести расчёт массового переноса газа по воздушным каналам в кабеле.

Для определения массового расхода газа воспользуемся тремя уравнениями [2].

Уравнением энергии (Бернулли)

$$\frac{dP}{\rho} + udu + gdA_{mp} = 0 \quad (1)$$

уравнением постоянства массового расхода $G = Spu = const$ (2)

и уравнением состояния

$$\frac{P}{\rho} = RT = const \quad (3)$$

В этих уравнениях введены обозначения:
 P – давление;
 ρ – плотность газа;

u – средняя скорость потока в сечении S ;
 gdA_{mp} – работа сил вязкости (потери), отнесённая к единице массы в движущемся газе;

R – газовая постоянная;

T – температура газа;

G – массовый расход газа;

Выделим из уравнения (2) скорость « u »

$$u = \frac{G}{Sp} \quad (4)$$

а из уравнения (3) плотность газа

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (5)$$

Считая, что (2) и (3) выполняются одновременно, и подставляя (5) в (4), получаем также

$$u = \frac{GRT}{SP} \quad (6)$$

Дифференцируя « u » по « P », получаем

$$du = -\frac{GRT}{SP^2} dP \quad (7)$$

Работу сил трения на участке трубы длиной « dx » можно приблизительно выразить гидравлической зависимостью Вейсбаха-Дарси [2]

$$dA_{mp} = \xi_{mp} \cdot \frac{u^2}{2g} \cdot \frac{dx}{D} \quad (8)$$

где:

D – диаметр трубы;

ξ_{mp} – коэффициент сопротивления трения элемента трубы.

Подставляя (5) + (8) в уравнение (1), получаем

$$\frac{dPRT}{P} - \frac{G^2 R^2 T^2}{S^2 P^3} dP + \xi_{mp} \cdot \frac{G^2 R^2 T^2}{2S^2 P^2} \frac{dx}{D} = 0 \quad (9)$$

Деля все слагаемые уравнения (9) на « $\frac{G^2 R^2 T^2}{2S^2}$ », получаем

$$-\frac{2dP}{P^3} + \frac{2S^2 dP}{G^2 RTP} + \frac{\xi_{mp}}{P^2} \frac{dx}{D} = 0 \quad (10)$$

Умножая все члены уравнения на « $(-P^2)$ », получаем

$$2 \frac{dP}{P} - \frac{2S^2 PdP}{G^2 RT} = \xi_{mp} \frac{dx}{D} \quad (11)$$

Проинтегрируем уравнение (11) и окончательно получим

$$\xi_{mp} \cdot \frac{x}{D} = \frac{S^2}{RTG^2} (P_1^2 - P_2^2) + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (12)$$

Считая, что в сечении трубы на длине $x = l$ давление равно P_2 , получим выражение для определения массового расхода

$$G = S \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT(\xi_{mp} \cdot L + 2 \ln \frac{P_1}{P_2})}} \quad (13)$$

$L = \frac{l}{D}$ – безразмерная длина трубы.

Основной сложностью в формуле (13) является определение коэффициента сопротивления трения трубы « ξ_{mp} ». Для разных конкретных случаев этот параметр имеет своё значение и определяется эмпирическим путём.

Конечно, для кабеля с современными полимерными материалами этот параметр никто не определял. Наиболее близким случаем является канал в виде гладкой резиновой трубы.

Для этого случая известен линейный коэффициент сопротивления трения « λ_{mp} » [3]

$$\lambda_{mp} = \frac{A}{Re^{0,265}} \quad (14)$$

где:

A – константа;

Re – число Рейнольдса.

Известно, что константа « A » имеет значения от 0,38 до 0,52 (в зависимости от качества трубы) для чисел Рейнольдса изменяющихся от 5000 до 120000.

Здесь, по нашему мнению, следует сделать небольшое отступление. Указанный диапазон чисел Рейнольдса, вообще говоря, соответствует турбулентному движению. В то время, как из общих соображений, течение газа через кабель длиной 10 м и более будет ламинарное. Физически это представляется так: в начальный момент времени в переходной процесс движение может рассматриваться, как турбулентное. По окончании процесса течение ►

стабилизируется и становится ламинарным. Поэтому и расчёт, как будет видно далее, мы проводим, в два этапа. Число Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$R_e = \frac{uD_2}{\eta} \quad (15)$$

где:

D_2 – гидравлический или эквивалентный диаметр;

η – кинематическая вязкость, m^2/c .

Гидравлический диаметр рассчитывается по формуле

$$D_2 = \frac{4S}{\Pi} \quad (16)$$

где:

Π – периметр отверстия.

Линейный коэффициент сопротивления трения связан с коэффициентом сопротивления трения соотношением

$$\lambda_{мп} = \frac{\xi_{мп}}{L} \quad (17)$$

Для определённости выберем кабель марки КВВЭ 1х2х1,0. Площадь, занимаемую воздухом в поперечном сечении кабеля можно определить (учитывая, что данный кабель содержит сплошной наполнитель поверх экрана) по формуле:

$$S = \frac{4-\pi}{4} \cdot d_{из}^2 \quad (18)$$

$$d_{из} = d_o + 2\Delta_{из} \quad (19)$$

где:

$d_{из}$ – диаметр изолированной жилы

d_o – 1,29 мм – диаметр токопроводящей жилы, связанный с сечением (1,0 мм²) по ГОСТ 22483-77 [4];

$\Delta_{из}$ = 0,7 мм – толщина изоляции.

Схематическое изображение поперечного сечения кабеля марки КВВЭ 1х2х1,0 представлено на Рис. 1.

Расчёт показывает, что суммарная площадь сечения двух воздушных каналов равна $S = 1,55288 \text{ мм}^2 = 1,55288 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Но из формулы (13) видно, что влияние силы трения учитывается выражением, стоящим под знаком радикала, поэтому массовый расход должен рассчитываться по отдельности для каждого канала.

Известно, что для коротких отрезков труб, через которые протекает газ из некоторого объёма и которые называются (для данного случая) соплами, расчёт массового расхода газа производится по формуле Сен-Венана [5].

$$m = S \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (20)$$

где $k=1,4$ – показатель адиабаты для двухатомных газов;

v_1 – удельный объём воздуха в камере m^3/kg ; Возьмём предел от обеих частей выражения (13) при длине l стремящейся к нулю.

$$\lim_{l \rightarrow 0} G = \lim_{l \rightarrow 0} 2S_n \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT(\xi_{мп} \cdot L + 2 \ln \frac{P_1}{P_2})}} \quad (21)$$

Можно предположить, что в левой части мы получим расход по формуле Сен-Венана, обозначим его $G_{c-в}$.

Вычислим предел в правой части выражения (21)

$$G_{c-в} = 2S_n \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \cdot 2 \ln \frac{P_1}{P_2}}} \quad (22)$$

где цифра «2» перед знаком радикала учитывает два одинаковых канала сечением

$$S_n = 1,55288 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{2} \text{ м}^2$$

Газовая постоянная « R » в (22) является газовой постоянной воздуха, её можно рассчитать, используя универсальную газовую постоянную « μR » по формуле [6] и введя обозначения $R = R_{возд}$

$$R_{возд} = \frac{(\mu R)}{\mu_{возд}} \quad (23)$$

где $(\mu R) = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная;

$\mu_{возд} = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ – молекулярная масса воздуха [3].

Произведём расчёт по формуле (22) при следующих параметрах:

- повышенное давление в взрывоопасном помещении $P_1 = 350 \text{ кПа}$;
- давление за пределами взрывоопасного помещения, куда происходит истечение газа $P_2 = 100 \text{ кПа}$;
- температура кабеля и окружающей среды $T = 293^\circ \text{К}$.

Расчёт показывает, что через два отверстия с суммарной площадью $S_o = 1,55288 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ будет истекать $1135,34 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$ воздуха.

В то же время расчёт по формуле (20) показывает, что истечение воздуха через отверстие с той же суммарной площадью S_o будет равно $929,95 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$.

Как видим, рассчитанные значения массового расхода достаточно близки друг к другу. И всё-таки возникает вопрос: почему значение, рассчитанное по формуле Сен-Венана, меньше?

Воспользуемся уравнением состояния газа, записанным для 1 кг газа (воздуха) [6]:

$$P_1 v_1 = R_{возд} T_1 \quad (24)$$

Выразим « v_1 » из (24) и подставим его в (20):

$$m = S \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1^2}{R_{возд} T_1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (25)$$

Сравнивая (22) и (25) видим, что, несмотря на некоторое сходство функциональные зависимости от « P_1 » и « P_2 » несколько различаются. Кроме того, температура « T_1 » примерно в 1,4 раза больше

температуры « T », что позволяет сделать следующее предположение: на коротких длинах кабеля формула Сен-Венана даёт более правдоподобный результат. Действительно, при повышении давления в камере до величины « P_1 » происходит увеличение внутренней энергии газа с увеличением его температуры. Так как истечение газа происходит достаточно быстро, то газ истекает не успев остыть (приблизительно по адиабатическому закону). При относительно больших длинах кабеля включается вязкое трение, за счёт которого скорость истечения резко падает и, соответственно, газ в камере успевает остыть, то есть приобрести температуру окружающей среды, в связи с чем, процесс дальнейшего истечения можно считать изотермическим.

Произведём сравнительный расчёт для кабелей разных марок. Пусть это будут: КВВЭ 1х2х1,0 и МКЭШВ 1х2х1,0.

Схематическое изображение поперечного сечения кабеля марки МКЭШВ 1х2х1,0 представлено на Рис. 2.

Для расчёта массового расхода газа необходимо знать значение линейного сопротивления коэффициента трения « $\lambda_{мп}$ », а для этого необходимо знать число Рейнольдса, и, в конечном итоге, массовый расход газа, то есть величину, которую мы рассчитываем. Чтобы выйти из замкнутого круга, воспользуемся приблизительным равенством массового расхода через кабель с длиной близкой к нулю, при изотермическом процессе, и массовым расходом, рассчитываемым по формуле Сен-Венана.

А на этом основании можно приравнять скорости истечения газа, рассчитав её по формуле Сен-Венана.

Так как процесс по Сен-Венану является адиабатическим, то температура, которую приобретает газ при повышении давления до P_1 не успевает измениться. Её можно рассчитать по формуле [6]

$$T_1 = T_0 \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (26)$$

где:

$T_0 = 293^\circ \text{К}$, температура при нормальных климатических условиях окружающей среды; $P_0 = 100 \text{ кПа}$, давление при нормальных климатических условиях окружающей среды;

P_1 – конечное давление, при котором начинается истечение газа;

T_1 – конечная температура в помещении, при которой начинается истечение газа.

Другим неизвестным параметром для расчёта по формуле (20) является удельный объём воздуха в помещении « v_1 ». Рассчитаем его по формуле, преобразованной из уравнения состояния газа, записанного для 1 кг газа [5]

$$v_1 = \frac{R_{возд} \cdot T_1}{P_1} \quad (27)$$

Где:

$R_{возд} = 286,69 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, газовая постоянная воздуха, рассчитанная ранее по формуле (23). Зная « T_1 » рассчитываем « v_1 », после чего рассчитаем скорость истечения газа по формуле Сен-Венана ▶

$$C = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (28)$$

При известном значении скорости « $u=c$ » по формуле (15) рассчитываем число Рейнольдса с учетом кинематической вязкости воздуха « η », равной $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [3] при нормальных температуре и давлении.

В формуле (15) для расчёта числа Рейнольдса используется гидравлический диаметр « D_e », который рассчитывается по формуле (16). При этом периметр отверстия для разных кабелей рассчитывается по разным формулам.

Для кабеля марки КВВЭ 1x2x1,0 периметр отверстия рассчитывается по формуле

$$\Pi_{\text{КВВЭ}} = \frac{\pi d_{\text{вн}}}{2} + d_{\text{вн}} = \frac{\pi + 2}{2} d_{\text{вн}} \quad (29)$$

Для кабеля марки МКЭШВ 1x2x1,0 периметр отверстия рассчитывается по формуле

$$\Pi_{\text{МКЭШВ}} = \frac{\pi d_{\text{н}}}{2} + \pi d_{\text{вн}} = 2\pi d_{\text{вн}} = \pi d_{\text{н}} \quad (30)$$

Зная число Рейнольдса по формуле (14) рассчитаем линейный коэффициент сопротивления трения « $\lambda_{\text{тр}}$ ».

Подставляя известные значения, получаем:

$$\Pi_{\text{КВВЭ}} = 69154; \Pi_{\text{МКЭШВ}} = 15,6451$$

$$D_{\text{КВВЭ}} = 0,4491 \cdot 10^{-3}; D_{\text{МКЭШВ}} = 1,245 \cdot 10^{-3}$$

Для кабеля марки МКЭШВ будем иметь $d_0 = 1,29 \text{ мм}$. Толщина изоляции для токопроводящих жил сечением $1,0 \text{ мм}^2$ выбирается в соответствии с требованиями ГОСТ 23286-78 [7] равной 0,6.

У кабеля МКЭШВ 1x2x1,0 диаметр изолированной жилы равен $d_{\text{ис}} = 2,49 \text{ мм}$, пары изолированных жил $d_{\text{ис}} = 4,98 \text{ мм}$.

Так как в кабеле МКЭШВ 1x2x1,0 отсутствует наполнитель, то экран в виде оплётки ложится приблизительно по окружности. В этом случае, площадь, занимаемую воздухом в поперечном сечении кабеля можно рассчитать по формуле

$$S_0 = \frac{\pi d_{\text{н}}^2}{4} - 2 \frac{\pi d_{\text{ис}}^2}{4} \quad (31)$$

Расчёт даёт значение $S_0 = 9,7391$; $S_n = 4,8696$. Определим диаметр « D » в безразмерной длине трубы в формуле (13). Предположим, что вместо канала сложного сечения вращающегося в пространстве по спирали мы имеем равномерную длинную цилиндрическую трубку того же сечения « S_n ». Тогда её диаметр можно определить по формуле.

$$D = \sqrt{\frac{4S_n}{\pi}} \quad (32)$$

Для кабеля марки КВВЭ 1x2x1,0 он будет равен $D = 0,99 \approx 1,0 \text{ мм}$, для кабеля марки МКЭШВ 1x2x1,0 - $D = 2,49 \text{ мм}$

Обратим внимание на то, что для значений « L », характерных для кабелей, второе слагаемое в знаменателе формулы (13)

значительно меньше первого, в связи с чем формулу можно упростить.

$$G = S \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \xi_{\text{мп}} \cdot L}} \quad (33)$$

Подставляя в (28) значение « $\xi_{\text{мп}}$ » из (17) и выражая « L » через « ℓ » и « D », получим

$$G = \frac{SD}{\ell} \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \lambda_{\text{мп}}}} \quad (34)$$

где в качестве « S » будем подставлять $2S_n = S_0$.

Так как скорость, рассчитанная на выходе из помещений по формулам (26) - (28) будет завышенной по сравнению со скоростью массопереноса через кабель некоторой длиной « ℓ » будем производить расчёт методом итерации. При этом, определив массу газа, истекающую на длине « ℓ » с конца кабеля, по формуле (4) определим скорость истечения газа, а затем вновь производя весь расчёт, получим скорректированное значение массы. Расчёты показали, что уже после второго цикла скорость истечения практически стабилизируется, а вместе с ней стабилизируется масса истекающего газа.

Были произведены расчёты массопереноса газа по кабелям длиной 10 м при давлении газа во взрывоопасной зоне $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

При этом длина 10 м была выбрана, исходя из рекомендаций Приложения С к ГОСТ Р 52350.14-06 [8], а максимальное значение давления $4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – с целью учёта нормы избыточного давления при испытании разделительных уплотнений, устанавливаемых в трубах электропроводки в соответствии с п. 1.3.107 ПУЭ [9].

Результаты расчётов представлены на графиках на Рис. 3.

Далее заметим следующее: по мере заполнения невзрывоопасного помещения взрывоопасным газом статус помещения должен измениться. Возникает вопрос: при каком количестве (массе) перетекшего взрывоопасного газа это произойдёт?

Известно два показателя, определяющих способность взрывоопасного газа в смеси с воздухом распространять горение. Это «нижний концентрационный предел распространения пламени» (предел воспламенения) и «верхний концентрационный предел распространения пламени».

Дадим определения этим параметрам [10]

«Нижний концентрационный предел распространения пламени « $\phi_{\text{н}}$ » – это такая объёмная (массовая) доля горючего в смеси с окислительной средой (выраженная в процентах или г/м³), ниже которой смесь становится неспособной к распространению пламени»

«Верхний концентрационный предел распространения пламени « $\phi_{\text{в}}$ » – это такая объёмная (массовая) доля горючего в смеси с окислительной средой, выше которой смесь становится не способной к распространению пламени».

Таким образом, область распространения пламени (область воспламенения) – это область объёмных (массовых) долей горючего в смеси с окислительной средой,

закрывающаяся между нижним и верхним пределами воспламенения.

Согласно [11], нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени для одноразового взрывоопасного газа в смеси с воздухом рассчитывают по формуле

$$\Phi_{H(e)} = \frac{100}{1 + v_e} \quad (35)$$

где v_e - число молей воздуха, приходящееся на один моль взрывоопасного газа.

Для произвольного числа молей воздуха « $v_{\text{вх}}$ », « $v_{\text{вн}}$ » формула (35) примет вид

$$\Phi_{H(e)} = \frac{100 \cdot v_{\text{вн}(e)}}{(1 + v_e) \cdot v_{\text{вн}}} \quad (36)$$

где $v_{\text{вн}(e)}$ - число молей взрывоопасного газа, соответствующее числу молей воздуха « $v_{\text{вн}}$ » для нижнего и верхнего концентрационных пределов.

Зная концентрационные пределы « $\Phi_{H(e)}$ » и число молей воздуха « $v_{\text{вн}}$ » в невзрывоопасном помещении, в которое будет истекать взрывоопасный газ по воздушным каналам в кабеле в случае аварийного повышения давления во взрывоопасном помещении, где находится ближний конец кабеля, можно рассчитать число молей взрывоопасного газа, соответствующее нижнему и верхнему пределам по формуле

$$v_{\text{вн}(e)} = \frac{\Phi_{H(e)} \cdot (1 + v_e) \cdot v_{\text{вн}}}{100} \quad (37)$$

Число молей воздуха в помещении можно найти, зная объём помещения, на основании того, что один моль любого газа занимает объём $V_i = 22,4 \text{ м}^3$, по формуле

$$v_e \cdot v_{\text{вн}} = \frac{V}{V_i} \quad (38)$$

где V – объём помещения, в которое происходит истечение взрывоопасного газа.

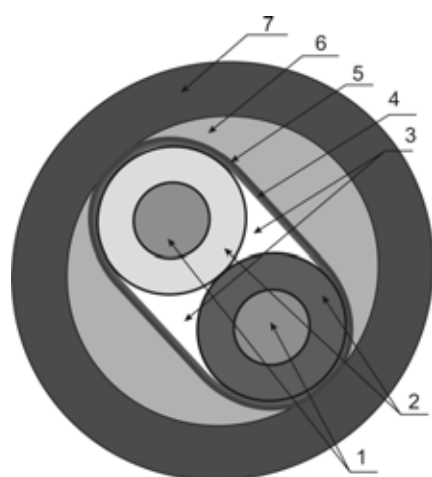
Критическую массу взрывоопасного газа, соответствующую нижнему и верхнему концентрационному пределам можно рассчитать по формуле [12].

$m_{H(e)} = M \cdot v_{\text{вн}(e)}$
где M - масса одного моля взрывоопасного газа.

Для проведения расчёта выберем конкретный газ. Пусть это будет метан, имеющий химическую формулу CH_4 . Известно [2], что нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени для метана равны $\phi_{\text{н}} = 5\%$; $\phi_{\text{в}} = 15\%$. Масса одного моля равна $M = 0,016 \text{ кг/моль}$.

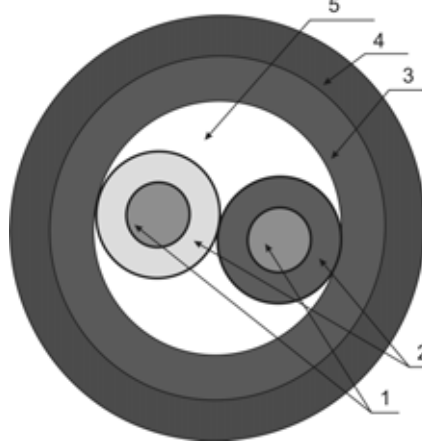
Пусть невзрывоопасное помещение, в которое истекает газ, будет иметь размеры $6 \times 12 \times 3 \text{ м}^3$. Объём, соответственно, равен $V = 216 \text{ м}^3$.

Расчёты показывают, что накапливаемая масса метана в данном помещении, соответствующая нижнему концентрационному пределу распространения пламени равна $8,1 \text{ кг}$, соответствующая верхнему концентрационному пределу распространения пламени равна $27,1 \text{ кг}$. Отложим эти значения в виде прямых, ►



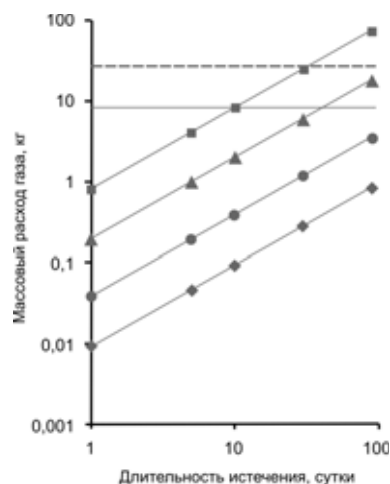
1. Токопроводящие жилы
2. Изоляция.
3. Воздушные полости в сердечнике.
4. Экран.
5. Обмотка лентой из полимерной плёнки.
6. Заполнитель из термопластичного материала.
7. Оболочка.

Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения кабеля марки КВВЭ 1х2х1,0.



1. Токопроводящие жилы
2. Изоляция
3. Экран
4. Оболочка
5. Воздушные полости

Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения кабеля марки МКЭШВ 1х2х1,0



Для кабеля марки КВВЭ 1х2х1,0

- ◆— 1. При длине 10м и давлении
- 2. При длине 10м и давлении

Для кабеля марки МКЭШВ 1х2х1,0

- ▲— 3. При длине 10м и давлении
- 4. При длине 10м и давлении

Нормируемые значения

- 5. Нижнего концентрационного предела распространения пламени
- - - 6. Верхнего концентрационного предела распространения пламени

Рис. 3. График зависимости массы газа вытекающего с конца кабеля в невзрывоопасной зоне от времени при давлении во взрывоопасной зоне и длине кабеля

параллельно оси абсцисс, на графике на Рис. 3.

Сопоставляя графики функции на Рис. 3, можно сделать следующие выводы. Масса метана, которая может распространяться по воздушным каналам кабеля марки КВВЭ 1х2х1,0 длиной 10 м в течение 90 суток не достигает нормируемой концентрации для воспламенения. А учитывая, что к невзрывоопасным помещениям не предъявляется требование герметичности, скорее всего, никогда не достигнет нормируемой концентрации для воспламенения. Речь, конечно, идёт об истекании газа в невзрывоопасное помещение объёмом 6х12х3 м³.

В то же время, при использовании кабеля марки МКЭШВ 1х2х1,0 той же длины, масса газа, соответствующая нижнему пределу концентрации (8,1 кг) для анализируемого помещения при разности давления 300 кПа может накопиться уже примерно через 10 суток. А это означает, что при соответствующем стечении обстоятельств возможно воспламенение и распространение пламени по метано-воздушной смеси, то есть помещение потеряет право считаться невзрывоопасным.

Предложенный алгоритм расчётов может использоваться для сравнительного анализа кабелей, применяемых во взрывоопасных зонах и выбора такого кабеля, который в условиях аварийной ситуации с повышением давления во взрывоопасной

зоне, где смонтирован ближний конец кабеля, не приведёт к массопереносу взрывоопасного газа по воздушным каналам в сердечнике и накоплению в месте крепления дальнего конца кабеля в невзрывоопасном помещении в объёмах достаточных для воспламенения.

Однако это не всё, предложенный алгоритм расчётов может также служить методикой оценки времени, в течение которого обслуживающий персонал объекта обязан обнаружить и устранить аварийную ситуацию во взрывоопасной зоне с повышением давления, до накопления у дальнего конца кабеля критической массы взрывоопасного газа, распространяющегося по воздушным каналам в сердечнике кабеля. А также – методикой оценки габаритных размеров невзрывоопасного помещения, в котором монтируется дальний конец кабеля, выходящий из взрывоопасного помещения, длины самого кабеля, которые рассчитываются из условия массопереноса взрывоопасного кабеля в количествах, не позволяющих достичь состояния воспламенения в смеси с воздухом. ■

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 51330.13-99 «Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)».
2. «Теоретические основы теплотехники.

Теплотехнический эксперимент», Справочник под общей редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина, 2-е издание, книга 2, М., «Энергоатомиздат», 1988 г.

3. И. Е. Идельчик «Справочник по гидравлическим сопротивлениям», М., «Машиностроение», 1975 г.
4. Н.И. Белорусов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева «Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник», М., «Энергоатомиздат», 1987 г.
5. Д.В. Хвостов, В.В. Бычков, А.Е. Дмитриев, В.М. Неведомский «Кабели во взрывоопасных зонах», «Gas Nefte Pram», октябрь 2008 г.
6. «Теплотехника» под редакцией А.П. Баскакова, М., «Энергоиздат», 1982 г.
7. ГОСТ 23286 «Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением».
8. ГОСТ Р 52350.14-2006 «Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)».
9. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), С-Пб, Издательство «ДЕАН», 2004 г.
10. Справочник «Пожарная безопасность. Взрывобезопасность», под редакцией А.Н. Баранова, М., «Химия», 1987 г.
11. ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования».
12. Ю.Т. Павленко «Начала физики», издательство «Экзамен», М., 2005 г.