

# КОРРЕКТНАЯ ОЦЕНКА МАССОПЕРЕНОСА ГАЗООБРАЗНЫХ ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЕЙ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ КАБЕЛЮ

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

В статье [1] была выведена формула для массопереноса газообразных взрывоопасных смесей вдоль кабеля в качестве первого приближения с некоторыми допущениями, заключавшимися в замене реальной воздушной полости в сердечнике кабеля прямолинейным круглым цилиндром. Однако элементы сердечника кабеля (токопроводящие жилы в изоляции), как правило, скручиваются между собой, поэтому, если воздушные полости заменять цилиндрами, то они должны также вращаться в пространстве по геликоиде с шагом вращения, равным шагу скрутки, изолированных токопроводящих жил. А это приводит к дополнительному снижению скорости массопереноса, что возможно целесообразно учитывать в некоторых оценочных расчётах.

Для наглядности рассмотрим два типичных кабеля массово применяемых в нефтегазовой сфере для систем автоматики: МКЭШВ 1x2x1,0 и КВВЭ 1x2x1,0. Уточним, что применяемые математические модели описывают конструкции реальных кабелей с некоторым приближением, определяемым технологией наложения экранов. Поперечные сечения сердечников этих кабелей представлены на Рис. 1. Буквой «S» обозначены площади, занимаемые воздушными промежутками в сердечниках кабелей.

Заменим воздушные промежутки ка-

налами цилиндрической формы с соответствующей площадью для каждого кабеля.

Представим на Рис. 2а. схематическое изображение поперечного сечения сердечника кабеля, не придерживаясь реальных конструктивных размеров. На Рис. 2б, показано, что в реальном кабеле воздушные полости укладываются по геликоиде с шагом скрутки токопроводящих жил «h».

К торцу кабеля Рис. 3 векторы давления «dP» и скорости «u» перемещения частиц газа направлены перпендикулярно, но далее они раскладываются на две составляющие: одну перпендикулярную стенке

изгибающегося по геликоиде цилиндра, другую – по касательной к центральной оси цилиндра в конкретной точке, согласно изображённому на Рис. 4.

В соответствии с Рис. 4а, имеем следующее соотношение для вектора давления

$$P_{\perp} = P \cos \alpha \quad (1)$$

Аналогично, для вектора скорости

$$u_{\perp} = u \cos \alpha \quad (2)$$

Решение задачи будем проводить

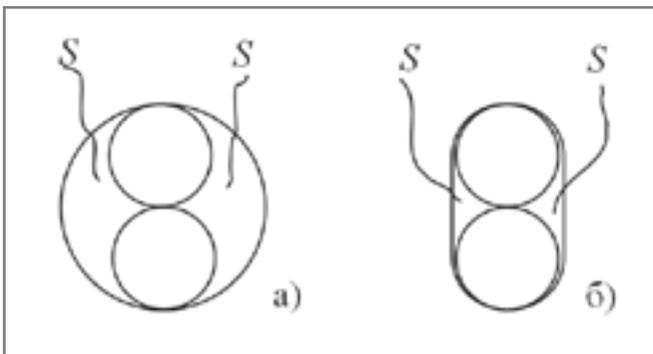


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения сердечника кабеля марок

а) МКЭШВ 1x2x1,0  
б) КВВЭ1x2x1,0

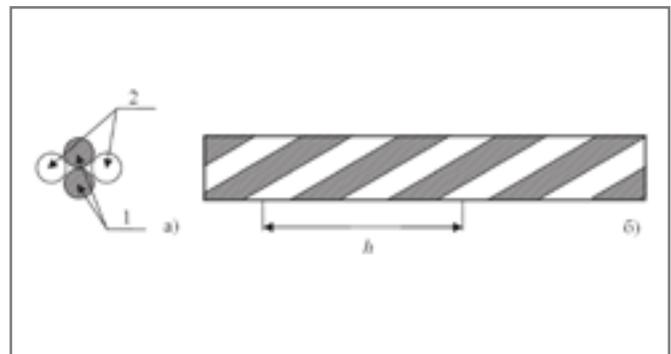


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения сердечника кабеля с воздушными промежутками в виде цилиндрических каналов

а) в поперечном сечении.  
1. Изолированные токопроводящие жилы кабеля.  
2. Условный канал цилиндрической формы, заменяющий воздушные пустоты в сердечнике однопарного кабеля.  
б) в проекции параллельной продольной оси.



Рис. 3. Схематическое изображение прямолинейного круглого цилиндра, для которого записывают традиционные уравнения, в соответствии с [2].

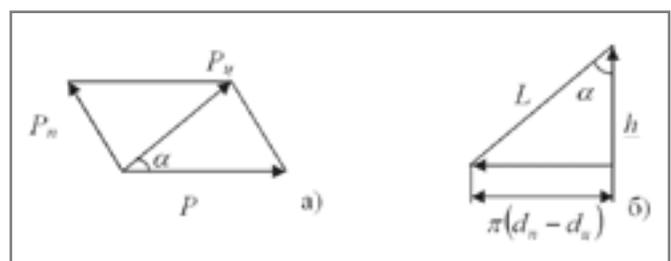


Рис. 4. Вспомогательные построения.

а) Разложение вектора давления «P» на входе в воздушный канал цилиндрической формы, вращающийся в пространстве по геликоиде.  
б) Развёртка одного шага скрутки канала цилиндрической формы.

аналогично изложенному в скалярной форме в [1]. Для определения массового расхода газа воспользуемся тремя уравнениями [2].

Уравнением энергии (Бернулли)

$$\frac{dP_z}{\rho} + u_s du_s + g dA_{mp} = 0 \quad (3)$$

уравнением постоянства массового расхода

$$G = S \rho u_s = \text{const} \quad (4)$$

и уравнением состояния

$$\frac{P_s}{\rho} = RT = \text{const} \quad (5)$$

В этих уравнениях введены обозначения  $P_u$  – компонента давления, направленная по образующей цилиндра;

$\rho$  – плотность газа;

$u_s$  – компонента средней скорости потока в сечении «S», направленная по образующей цилиндра;

$g dA_{mp}$  – работа сил вязкости (потери), отнесенная к единице массы в движущемся газе;

R – газовая постоянная;

T – температура газа;

G – массовый расход газа.

Подставляя (1) и (2) в (3), (4), (5) получаем

$$\frac{\cos \alpha dP}{\rho} + u \cos^2 \alpha du + g dA_{mp} = 0 \quad (6)$$

$$G = S \rho u \cos \alpha \quad (7)$$

$$\frac{P \cos \alpha}{\rho} = RT \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что

$$u = \frac{GRT}{S P \cos^2 \alpha} \quad (9)$$

Дифференцируя в (9) «u» по «P», получаем

$$du = - \frac{GRT}{S P^2 \cos^2 \alpha} dP \quad (10)$$

Работу сил трения на участке трубы «dl» приблизительно выразим гидравлической зависимостью Вейсбаха-Дарси [2]:

$$dA_{mp} = \xi_{mp} \frac{u^2}{2g} \frac{dl}{D} \quad (11)$$

В соответствии с Рис. 4б, «dl» выражается через «dx» по формуле

$$dl = \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (12)$$

Подставляя значения «u» и «dl» в (11), получаем

$$dA_{mp} = \xi_{mp} \frac{u^2 \cos \alpha}{2g} \frac{dx}{D} \quad (13)$$

Подставляя (9), (10) и (13) в (6) и, преобразовывая, получаем дифференциальное уравнение в окончательной форме

$$2 \frac{dP}{\rho} - \frac{2s^2 \cos^2 \alpha}{G^2 RT} P dP = \xi_{mp} \frac{1}{\cos \alpha} \frac{dx}{D} \quad (14)$$

Решая уравнение (14), получаем

$$\frac{s^2 \cos^2 \alpha}{G^2 RT} (P^2 - P_1^2) = \xi_{mp} \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\ell}{D} + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (15)$$

Выражая «G» из формулы (15), получаем окончательно

$$G = s \cos \alpha \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \left[ \xi_{mp} \frac{\ell}{\cos \alpha} + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \right]}} \quad (16)$$

где  $\frac{\ell}{D}$  – безразмерная длина трубы.

Проясним физический смысл полученного выражения. Отличие формулы (16) от формулы в работе [1] заключается в появлении «cosa» в двух местах: в знаменателе выражения, характеризующего влияние сил трения на массоперенос и стоящего под знаком радикала, и в качестве множителя перед знаком радикала.

В выражении, определяющем воздействие сил трения, «cosa» стоит в знаменателе, что приводит к увеличению воздействия сил трения. В свою очередь само выражение находится в знаменателе более общего выражения, стоящего под знаком радикала, и приводит к снижению массопереноса. Это соответствует реальному физическому процессу. Действительно, длина трубы, намотанной по геликоиде, увеличивается, что приводит к увеличению прохождения газом пути по трубе, при котором увеличивается воздействие сил трения.

Сомножители, стоящие перед знаком радикала следует рассматривать вместе. Они имеют вид  $S \cos \alpha$

Физический смысл этого выражения заключается в том, что площадь поперечного сечения оказывается повернутой на угол « $\alpha$ » по отношению к направлению давления газа на срез кабеля.

А это означает, что давление раскладывается на две компоненты и действительная часть давления, перемещающая газ в воздушной полости становится меньше по отношению к давлению, действующему на срез кабеля.

Значение «cosa» можно определить на основании Рис. 4б.

$$\cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{h^2 + [\pi (d_{ns} - d_{ns})]^2}} \quad (17)$$

где  $h$  – шаг скрутки жил в пару;

$d_{ns} = 2d_{ns}$  – диаметр пары изолированных жил, каждая из которых имеет диаметр « $d_{ns}$ ».

Диаметр цилиндра « $d_u$ » для кабеля каждой марки будет иметь своё значение, поэтому запишем формулы для определения « $d_u$ » кабеля конкретной марки.

Для кабеля марки МКЭШВ 1x2x1,0

$$S = 2S_{s1} = \frac{\pi d_{s1}^2}{4} - 2 \frac{\pi}{4} d_{s1}^2 \quad (18)$$

$$d_{s1} = \sqrt{\frac{4S_{s1}}{\pi}} \quad (19)$$

Для кабеля марки КВВЭ 1x2x1,0

$$S = 2S_{s1} - d_{s1}^2 - \frac{\pi}{4} d_{s1}^2 = \frac{4-\pi}{4} d_{s1}^2 \quad (20)$$

$$d_{s1} = \sqrt{\frac{4S_{s1}}{\pi}} \quad (21)$$

При этом следует отметить, что значения « $d_{ns}$ » для кабелей указанных марок различны.

Коэффициент сопротивления трения трубы « $\xi_{mp}$ » выражается через линейный

коэффициент сопротивления трения « $\lambda_{mp}$ » по формуле

$$\lambda_{mp} = \frac{\xi_{mp}}{L} \quad (22)$$

Линейный коэффициент сопротивления трения определим, как в работе [1]

$$\lambda_{mp} = \frac{A}{Re^{0,255}}$$

где  $A$  – константа, лежащая в пределах от 0,38 до 0,52 для чисел Рейнольдса, изменяющихся от 5000 до 120000;  $Re$  – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{u D_e}{\eta} \quad (23)$$

где  $D_e$  – гидравлический или эквивалентный диаметр;

$i$  – индекс, определяющий соответствие конкретной конструкции;

$\eta$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

При этом гидравлический диаметр рассчитывается по формуле

$$D_e = \frac{4S_u}{\Pi} \quad (24)$$

где  $\Pi = \pi d_u$  – периметр отверстия

Учитывая, что в формуле (16) в знаменателе второе слагаемое значительно меньше первого, можно упростить выражение

$$G = S \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \lambda_{mp} L}} \quad (25)$$

Заменяя коэффициент сопротивления трения через линейный коэффициент сопротивления трения по формуле (22) и безразмерную длину трубы «L» через « $\ell$ » и « $d_u$ » получим окончательно:

$$G = S \frac{d_u^2}{\ell} \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT \lambda_{mp}}} \quad (26)$$

Были произведены расчёты массопереноса газа по сердечникам кабелей марок МКЭШВ 1x2x1,0 и КВВЭ 1x2x1,0. Результаты расчётов показали, что по сравнению с результатами, полученными в работе [1] для моделей, в которых воздушные полости были представлены в виде прямых круглых цилиндров, массоперенос снизился примерно на 1,2%. Действительно, при шаге скрутки пары 70 мм образующая цилиндра вращается по окружности диаметром всего 2,69 мм, что очень незначительно отличается от прямой линии.

Следовательно, сделанное в работе [1] предположение о незначительности влияния шага скрутки кабеля на массоперенос газа было вполне правомочным и достигнутые результаты подтверждаются.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Д.В. Хвостов, В.В. Бычков «Массоперенос газообразных взрывоопасных смесей вдоль кабеля», журнал «Экспозиция. Нефть. Газ» 3/н (09) июнь 2010 г.
2. «Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник под общей редакцией В.А. Григорьева и В.Н. Зорина, 2-е издание, книга 2, М., «Энергоатомиздат», 1988 г.