

УДК 622.457.2

ПАРАМЕТРЫ СПОСОБА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ПОЖАРНО-ОРОСИТЕЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ВЗРЫВОМ ЗАРЯДА ВВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРА В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ

к.т.н. Сухоруков В.П. (НИИГД)

Рассмотрен процесс транспортирования заряда ВВ по горизонтальному пожарно-оросительному трубопроводу к месту его разгерметизации с целью подачи инертных газов к очагу пожара. Приведены аналитические зависимости для расчета технических параметров управления этим процессом.

PARAMETERS OF THE METHOD OF FIRE-SPRINKLING PIPE-LINE DEPRESSURIZATION BY EXPLOSIVE CHARGE BLASTING FOR FIRE SUPPRESSION IN BLUNT-END WORKING

Suhoruckov V.P.

A process of explosive charge transportation by horizontal fire-sprinkling pipe-line to depressurization point for inert-gas delivery to ignition site is considered. Analytical dependences are given to calculate technical parameters for control over the process.

При возникновении пожара в тупиковой выработки доступ к нему возможен только со стороны исходящей струи воздуха. В этом случае для ликвидации очага горения активным способом подают огнегасящие или инертные вещества по вентиляционному трубопроводу [1], если он находится в работоспособном состоянии, или пожарно-оросительному трубопроводу [2], для чего последний должен быть оборудован концевым устройством, обеспечивающим возможность его дистанционной разгерметизации [3]. Однако конструктивные недостатки концевых устройств не позволяют сохранить их работоспособность в процессе эксплуатации в режиме ожидания в шахтных условиях и они не срабатывают.

В аварийных условиях разгерметизацию пожарно-оросительного трубопровода можно было бы осуществить с помощью комплекта оборудования [4], которое используется для оказания помощи пострадавшим, оказавшимся за завалом в результате обрушения горной выработки. Однако технические характеристики этого оборудования позволяют его использовать для разгерметизации пожарно-оросительного трубопровода длиной не более 50м [5].

В тупиковых же выработках запорная арматура устанавливается на расстоянии не менее 400м друг от друга [6], что обуславливает необходимость разработки специального оборудования, которое способно осуществить разгерметизацию пожарно-оросительного трубопровода в промежутках между запорной арматурой.

Это оборудование должно с одной стороны доставить устройство разгерметизации пожарно-оросительного трубопровода в любое место между запорной арматурой, а с другой – осуществить безопасную разгерметизацию этого трубопровода в условиях угрозы взрыва метановоздушной смеси.

Как показали экспериментальные исследования [7], проведенные на стальных трубах с внутренним диаметром 100мм и толщиной стенки 5-6мм, применяемых на шахтах для изготовления пожарно-оросительного трубопровода, в качестве устройства разгерметизации наиболее приемлемым является использование заряда предохранительного взрывающегося вещества (ВВ) высокого уровня безопасности с точки зрения выгорания патрона и образования ядовитых продуктов взрывания. Устройство разгерметизации представляет собою контейнер диаметром 56мм и общей массой 400г, состоящий из заряда ВВ массой 100-150г изготовленного из аммонита 1V класса марок Ф-5 или Г-5 и размещенного в виде патрона в оболочке из взрывозащитного порошка КСВ-30.

Анализ существующих способов и средств транспортирования показал, что для указанных параметров устройства разгерметизации, технических характеристик пожарно-оросительного трубопровода и условий эксплуатации последнего в шахтах [8] наиболее перспективным является доставка контейнера с зарядом ВВ с помощью установки, использующей способ прокладки гибкого рукава путем его выворачивания на изнанку давлением [9]. Особенностью данного способа является то, что процесс прокладывания гибкого рукава осуществляется при двух режимах его выворачивания на изнанку. На первом режиме масса не вывернутой части рукава увеличивается по линейному закону, что обуславливает уменьшение скорости ее перемещения, а на втором- масса этой части рукава уменьшается по этому же закону, что способствует увеличению скорости ее движения.

Использование заряда ВВ для разгерметизации пожарно-оросительного трубопровода сопряжено с необходимостью управления процессом доставки контейнера к месту взрывания. Очевидно, что управление процессом транспортирования контейнера в аварийных условиях подразумевает возможность осуществления постоянного контролирования места нахождения заряда ВВ и регулирования скорости его перемещения по длине пожарно-оросительного трубопровода. Для осуществления этого процесса необходимо знать закономерности, позволяющие контролировать скорость перемещения не вывернутой части гибкого рукава и обеспечивающие ее управляемое изменение.

Анализ работы [9] показал, что приведенная в ней зависимость описывает динамику перемещения не вывернутой части рукава на максимальную длину, при которой скорость ее движения в конце прокладки на первом этапе равна нулю, и поэтому не может быть использована для осуществления контроля скорости этого процесса в промежуточных пунктах. При этом в работе [9] не рассмотрен процесс перемещения не вывернутой части рукава в режиме, когда его масса уменьшается по линейному закону.

Целью настоящей работы является установление зависимостей обеспечивающих возможность управления процессом перемещения не вывернутой части гибкого рукава и транспортирования контейнера с зарядом ВВ с постоянной скоростью по длине пожарно-оросительного трубопровода.

Процесс транспортирования контейнера с зарядом ВВ состоит из трех этапов. На первом этапе скорость не вывернутой части рукава изменяется от нуля в исходном пункте до заданной величины V на расстоянии L от него, на втором – протяженностью $(L - x_k)$ скорость движения рукава равна V и на третьем – длиной x_k скорость рукава уменьшается от значения V до нуля в конечном пункте и таким образом контейнер с зарядом ВВ доставляется к месту разгерметизации пожарно-оросительного трубопровода.

Для решения поставленной задачи рассмотрим процесс прокладывания трубопровода исходя из закона сохранения энергии. При этом примем следующие допущения и предпосылки:

-гибкий рукав является герметичной конструкцией;

-рабочее тело является ньютоновской жидкостью.

Дистанционное прокладывание гибкого рукава по горизонтальному пожарно-оросительному трубопроводу на первом этапе описывается уравнением динамики переменной массы [9], которое имеет вид

$$mx \frac{dV}{dt} + mV^2 = kPS - mqxf, \quad (1)$$

где m - масса 1 п.м гибкого рукава, кг/м ;

V - скорость перемещения не вывернутой части рукава, м/с;

t - время, с;

P - давление прикладываемое к торцу рукава, Па;

q - ускорение свободного падения, м/с²;

k - коэффициент использования тяговой силы при выворачивании рукава на изнанку;

f - коэффициент трения скольжения не вывернутой части рукава о вывернутую;

x - переменная координата длины рукава, м;

S - площадь поперечного сечения рукава, м².

Затраты энергии на перемещение гибкого рукава на первом этапе его прокладывания по пожарно-оросительному трубопроводу описываются уравнением [10]

$$\frac{dP}{dx} = \frac{2mqf}{(1-k)S} + rQ^2, \quad (2)$$

где r - удельное гидравлическое сопротивление гибкого рукава, Па·с²/м⁷;

Q - расход жидкости, нагнетаемой насосом в рукав, м³/с.

Из аэродинамики известно [11], что давление в промежуточном пункте по длине герметичного трубопровода можно определить с помощью равенства

$$7P = P_1 - rQ^2x, \quad (3)$$

где P_1 - давление создаваемое насосом в начале гибкого рукава, Па.

С учетом выражения (3) и допущения о том, что гидравлическое сопротивление гибкого рукава пренебрежимо мало по сравнению затратами энергии на транспортирование в нутрии него не вывернутой его части, уравнение (1) преобразуется

$$mx \frac{dV}{dt} + mV^2 = kSP_1 - mqxf$$

Решение этого уравнения при граничных условиях $t=0, x=0$ и $P_H = 0$ является выражение

$$mV^2 = kSP_1 - \frac{2}{3}mqfx \quad (4)$$

Из равенства (4) после выполнения соответствующих преобразований получим зависимость для расчета времени прокладывания рукава на расстояние равное L

$$t_1 = \frac{3}{2qf} \left(\sqrt{\frac{kS}{m} P_1} - \sqrt{\frac{kS}{m} P_1 - \frac{2}{3} qfL} \right), \quad (5)$$

где L - длина прокладывания рукава на первом этапе транспортирования заряда ВВ, м.

При выполнении граничных условий $x = L$ и $V = V_L$ выражение (4) принимает вид

$$mV_L^2 = kSP_1 - \frac{2}{3}mqfL, \quad (6)$$

Второй этап прокладывания рукава по пожарно-оросительному трубопроводу является наиболее ответственным, так как осуществляется транспортирование контейнера с зарядом ВВ. Этот процесс описывается системой уравнений

$$[m_0 + m(L-x)] \frac{dV}{dt} - mV^2 = kSP - qf[m_0 + m(L-x)], \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dx} = rQ^2 - \frac{2mqf}{(1-k)S}, \quad (8)$$

где m_0 - масса контейнера с зарядом ВВ, кг.

Данная система уравнений характеризует изменение количества движения гибкого рукава при линейном законе уменьшения массы под действием сил, воздействующих на его торцевую часть (7), и удельной энергии (8), затрачиваемой насосом для осуществления рассматриваемого процесса [10].

Для повышения безопасности и осуществления возможности управления процессом перемещения контейнера с зарядом ВВ принято условие, что последний транспортируется с постоянной скоростью $V_L = const$. Соблюдение этого условия возможно при выполнении равенства $\frac{dV}{dt} = 0$. В этом случае уравнение (7) принимает вид

$$mV^2 = qf[m_0 + m(L-x)] - kSP \quad (9)$$

Из системы уравнений (8) и (9) с учетом известных соотношений $V = 2V_1$, $Q = SV_1$ и выполнения соответствующих преобразований получим уравнение

$$\frac{dP}{dx} + aP = t + b(L-x), \quad (10)$$

$$a = \frac{rkS^3}{4m}, \quad b = \frac{rS^2 qf}{4}, \quad t = \frac{rS^2 qf m_0}{4m} - \frac{2mqf}{(1-k)S},$$

решением которого при соблюдении граничных условий $x=0$ и $P=P_2$ является выражение

$$P = \frac{b(L-x)}{a} + \frac{(at+b)}{a^2} + \left[P_2 - \frac{a(t+bL)+b}{a^2} \right] e^{-ax}, \quad (11)$$

где P_2 - давление на торцевую часть гибкого рукава, длина которого равна L , Па.

Выражения (11) содержит параметр P_2 , который характеризует затраты энергии давления на осуществление движения контейнера и не вывернутой части рукава в момент перехода из режима увеличения его массы по линейному закону на первом этапе в режим ее уменьшения по этому же закону на втором этапе. Для определения P_2 преобразуем уравнение (9) с учетом граничных условий $x=0$, $V=V_L$ и $P=P_2$.

$$P_2 = \frac{qf(m_0 + mL) - mV_L^2}{kS} \quad (12)$$

Общие затраты энергии давления на осуществление данного процесса находим в результате суммирования выражений (6) и (12).

$$P_1 = \frac{qf}{kS} \left(m_0 + \frac{5}{3} mL \right) \quad (13)$$

Выражения (6) и (12) содержат параметр V_L , определяющий величину критической скорости не вывернутой части рукава в момент перехода из одного режима его движения в другой. Зависимость для расчета V_L находим из совместного решения равенств (6) и (13)

$$V_L \geq \sqrt{qf \left(\frac{m_0}{m} + L \right)} \quad (14)$$

Для определения параметров управления рассматриваемым процессом на третьем этапе преобразуем выражение (11) с учетом граничных условий $x = L - x_K$ и $P = P_K$. В результате преобразований получим зависимость

$$P_K = \frac{bx_K}{a} + \frac{(at+b)}{a^2} + \left[P_2 - \frac{a(t+bL)+b}{a^2} \right] e^{-a(L-x_K)}, \quad (15)$$

которая позволяет определить давления P_K при известном значении параметра x_K .

Для определения параметра x_K рассмотрим уравнение (7). Решением этого уравнения при соблюдении граничных условий $x=0$, $V=0$ и $P=P_0$ является выражение

$$mV^2(\beta + L - x)^2 = 2mqf \left[(\beta + L)(L - x)(\beta - x) + \frac{L^3 - x^3}{3} \right] -$$

$$- 2kS \left[(\beta + L)(P_0 L - Px) - \frac{P_0 L^2 - Px^2}{2} \right]$$

$$\beta = \frac{m_0}{m}, \quad P_0 = m_0 q f_0$$

где f_0 - коэффициент трения скольжения контейнера о внутреннюю поверхность рукава.

Это равенство при соблюдении граничных условий $x = L - x_K$, $V = V_L$ и $P = P_K$ и выполнения соответствующих преобразований примет вид

$$mV_L^2(\beta + x_K)^2 = \frac{2}{3}mqf(3\beta^2 + 3\beta x_K + x_K^2)x_K + 2kS[(2\beta + L + x_K)(L - x_K)P_K - (2\beta + L)LP_0] \quad (16)$$

Из системы уравнений (15) и (16) при заданных значениях технических характеристик гибкого рукава и контейнера с зарядом ВВ на ПЭВМ находим численные значения P_K и x_K .

При известных значения x_K и V_L время транспортирования контейнера с зарядом ВВ на втором этапе определяется из выражения

$$t_2 = \frac{L - x_K}{V_L} \quad (17)$$

Из выражения (16) с учетом неравенств $L > x_K > \beta$, $L \gg \beta$ и выполнения соответствующих преобразований получим зависимость для расчета времени транспортирования контейнера на третьем этапе

$$t_3 = \sqrt{m} \int_{x_K}^0 \frac{(\beta + x)dx}{\sqrt{\frac{2}{3}mqf(3\beta + x)x^2 + kS[(L^2 - x^2)P_K - L^2P_0]}} \quad (18)$$

Для осуществления процесса транспортирования контейнера с зарядом ВВ по пожарно-оросительному трубопроводу необходимо иметь насос, гидравлическая характеристика которого обеспечивала бы требуемые для этого давление и расход. Это обуславливает необходимость разработки аналитических зависимостей для расчета давления и расхода, на основании которых собственно и будет выбран насос.

Анализ уравнения (2) показывает, что возможность его интегрирования определяется видом функциональной зависимости $Q = f(x)$ или $V = f(x)$. При этом из выражений (6) и (13) следует, что при соблюдении граничного условия $x = L$ для перемещения контейнера с зарядом ВВ необходимо, чтобы соблюдалось равенство $V = V_L = const$. Выполнение этого требования позволяет из уравнения (2) с учетом выражения (14) и приведенных выше соотношений получить зависимость для расчета давления

$$P_{Нр} = \frac{2mqf}{(1-k)S} L + P_0 + \frac{r}{4} S^2 qf \left(\frac{m_0}{m} + L \right) L \quad (19)$$

Выражение для расчета расхода $Q_{Нр}$ насоса находим из равенства (14) и вышеприведенных соотношений

$$Q_{Нр} = 0,5S \sqrt{qf \left(\frac{m_0}{m} + L \right)}, \quad (20)$$

где $P_{Нр}$, $Q_{Нр}$ - расчетное значение давления и расхода насоса, Па, м³/с соответственно;

P_0 - давление на торец рукава в момент начала его прокладывания по пожарно-оросительному трубопроводу, Па.

На основании расчетов по выражениям (19) и (20) выбираем тип насоса [12], гидравлическая характеристика которого имеет вид

$$P_H = a - bQ_H^2, \quad (21)$$

где a, b - гидравлические характеристики насоса;

P_H - давление насоса, Па;

Q_H - расход насоса, м³/с.

Для осуществления рассматриваемого процесса необходимо иметь устройство, которое обеспечивало бы на втором этапе транспортирование контейнера с зарядом ВВ с постоянной скоростью V по пожарно-оросительному трубопроводу с помощью гибкого рукава под действием воды, имеющей расход Q и давление P .

Принципиальная схема устройства, которое обеспечит подачу в рукав воды с необходимыми параметрами Q и P , приведена на рисунке. Устройство состоит из емкости 1 и расположенного в ней гибкого рукава 2, передний конец которого вывернут на изнанку и зафиксирован на патрубке 3, герметично подсоединенного к емкости. Патрубок 3 снабжен высоконапорным шлангом 4, который подсоединен к насосу 5. Между насосом 5 и патрубком 3 на шланге 4 установлен отвод 6 для слива воды в накопительную емкость 7. Емкость 7 с помощью всасывающего шланга 8 соединена с всасом насоса 5. На сопряжении отвода 6 и шланга 4 установлен регулятор 9, который обеспечивает слив излишков воды в емкость 7. Патрубок 3 оборудован манометром, а отвод 6 и шланг 8 датчиками расхода воды.

Для обеспечения возможности транспортирования контейнера с зарядом ВВ по пожарно-оросительному трубопроводу с постоянной скоростью и ее контролируемого изменения при необходимости на втором этапе необходимо, чтобы соблюдалось равенство

$$Q_H - Q_y = Q, \quad (22)$$

где Q_y - расход воды в отводе, обеспечивающего ее слив в накопительную емкость, м³/с.

Из анализа работы выше приведенного устройства следует, что поток воды, подаваемый насосом, перемещается в двух направлениях, а именно: первое - в патрубок к гибкому рукаву, второе - на слив в накопительную емкость. Изменением давления потока воды в направлении гибкого рукава в общем виде можно представить равенством

$$P_H - P_{1c} - P_{2c} - P_{3c} = P_1, \quad (23)$$

где P_{1c} , P_{2c} , P_{3c} - потери давления на преодоление гидравлического сопротивления в напорном шланге между насосом и отводом, отводом и патрубком и во всасывающем шланге, Па.

Выражение (23) после подстановке в него известных зависимостей и выполнения соответствующих преобразований примет вид

$$Q_H = \frac{a - R_2 Q^2 - P_1}{b + R_1 + R_3}, \quad (24)$$

где R_1 , R_2 , R_3 - гидравлическое сопротивление в напорном шланге между насосом и отводом, отводом и патрубком и во всасывающем шланге, Па.с²/м⁶, [11].

Изменением давления потока воды в направлении накопительной емкости можно представить в виде равенства

$$P_H - P_{1c} - P_{4c} - P_{3c} = 0,$$

которое после подстановки в него известных зависимостей преобразуется в выражение

$$R_2 Q^2 + P_1 = R_4 Q^2, \quad (25)$$

где: P_{4c} - потери давления на преодоление гидравлического сопротивления в отводе, обеспечивающего слив воды в накопительную емкость, Па;

$R_4 = R_M + R_{4T}$ - общее гидравлическое сопротивление отвода [11], которое состоит из местного сопротивления R_M и сопротивления R_{4T} , обусловленного шероховатостью внутренней поверхности отвода, Па.с²/м⁶.

С учетом вышесказанного, а также зависимостей (22), (25), известного выражения для R_M и выполнения соответствующих преобразований получим равенство

$$\frac{\xi \rho}{2S_0^2} = \frac{R_2 (SV_L)^2 + P_1}{(Q_H - SV_L)^2} - R_{4T}, \quad (26)$$

где ξ - коэффициент местного гидравлического сопротивления регулятора [11];

S_0 - площадь сечения проходного окна регулятора, м².

Выражение (26) содержит неизвестные параметры ξ и S_0 , которые функционально связаны между собою. Для установления этой зависимости были использованы экспериментальные данные для простой задвижки, перекрывающей цилиндрическую трубу [13]. В результате обработки этих данных, методами указанными в работе [14], получена зависимость

$$\xi = 0,238 \left(\frac{S_0}{S_{OT}} \right)^{-3}, \quad (27)$$

где S_{OT} - площадь поперечного сечения отвода, м².

Из системы равенств (26) и (27) после выполнения соответствующих преобразований получим выражение для расчета площади проходного окна

$$S_0 = 0,6535 \sqrt{\frac{\rho S_{OT}^3 (Q_H - SV_L)^2}{P_1 + R_2 (SV_L)^2 - R_{47} (Q_H - SV_L)^2}} \quad (28)$$

Таким образом, в результате проведенных аналитических исследований получены зависимости, которые позволяют выбрать насос для осуществления транспортирования контейнера с зарядом ВВ по пожарно-оросительному трубопроводу и рассчитать параметры управления этим процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков Ю.Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах.- Донецк: ДонГТУ, 2001.-270с.
2. Греков С.П., Калюсский А.Е. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях.- М.: Недра, 1975.- 120с.
3. А.с. 1000641 СССР, МКИ F 16 J 13/08, E 21 F 11/00, Устройство для герметизации тупиковых участков шахтных воздухопроводов, Оpubл. в БИ №8, 1983.
4. Медгаус В.М. Система жизнеобеспечения находящихся за завалом пострадавших // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. /НИИГД.- Донецк, 1999.-С. 149-155.
5. Чистюхин В.В., Кудинов В.П., Папушин А.Ю. Анализ аварий, связанных с обрушением пород в горных выработках //Горноспасательное дело: Сб. науч. тр./НИИГД,-Донецк,1994.- С.22-26.
6. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах. т.2, Київ. 2003, 416с.
7. Сухоруков В.П., Песоцкий М.К. Экспериментальные исследования разрушения пожарно-оросительного трубопровода взрывом ВВ в метановоздушной среде //Физико-технические проблемы горного производства: Сб. науч. тр. /ИФГП НАН Украины.-Донецк, 2004, Вып.7. С.195-203.

8. Ющенко А.Ю. Оптимальные сроки службы шахтных трубопроводов водоотлива и водоснабжения до их очистки // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. /НИИГД.-Донецк, 1999.- С. 46-50.
9. Сухоруков В.П., Кузнецов В.В. Расчет параметров установки дистанционной прокладки гибкого трубопровода.// Разраб. Месторождений полезных ископаемых: Респ. Межвед. Науч.-техн. Сб.-1991.- Вып.89. С.93-98.
- 10.Сухоруков В.П. Изменение энергии воздушного потока при выворачивании на изнанку гибкого трубопровода // Горно-спасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД.- Донецк , 2004.- С.152-160.
- 11.Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975. - 560с.
- 12.Шлипченко З.С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. К.: Техника. 1976.- 368с.
- 13.Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергия. 1975.- 600с.
- 14.Смирнов Н.В, Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969.- 512с